

ENRIQUE RAS

TRANSFORMADORES

de potencia, de medida y de protección

7ª edición



 **marcombo**
ediciones técnicas

ENRIQUE RAS

TRANSFORMADORES

de potencia
de medida y
de protección

7^a edición

marcombo

BOIXAREU EDITORES





Javier Rivera Rodríguez
4º EsII (E)
TFNO. 4638126

**TRANSFORMADORES
DE POTENCIA,
DE MEDIDA Y
DE PROTECCIÓN**

Amigo lector:

La obra que usted tiene en sus manos posee un gran valor. En ella, su autor, ha vertido conocimientos, experiencia y mucho trabajo. El editor ha procurado una presentación digna de su contenido y está poniendo todo su empeño y recursos para que sea ampliamente difundida, a través de su red de comercialización.

Usted puede obtener fotocopias de las páginas del libro para su uso personal. Pero desconfíe y rehúse cualquier ejemplar "pirata" o fotocopia ilegal del mismo porque, de lo contrario, contribuiría al lucro de quienes, consciente o inconscientemente, se aprovechan ilegítimamente del esfuerzo del autor y del editor.

La reprografía indiscriminada y la piratería editorial, no solamente son prácticas ilegales, sino que atentan contra la creatividad y contra la difusión de la cultura.

**PROMUEVA LA CREATIVIDAD
RESPETE EL DERECHO DE AUTOR**

TEXTOS MONOGRÁFICOS DE ELECTROTECNIA

TRANSFORMADORES

DE POTENCIA,
DE MEDIDA Y
DE PROTECCIÓN

7.ª edición renovada

Enrique Ras Oliva, Dr. Ing. Ind.

Profesor Emérito de la
Universidad Politécnica de Barcelona
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Antiguo Director de la fábrica de transformadores e interruptores de
AEG Industrial, S.A.



marcombo
BOIXAREU EDITORES
BARCELONA - MÉXICO

© E. Ras, 1991

Reservados todos los derechos
de publicación, reproducción, préstamo, alquiler
o cualquier otra forma de cesión
del uso de este ejemplar en cualquier idioma por
MARCOMBO, S.A.
Gran Via de les Corts Catalanes, 594
08007 Barcelona (España)

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del «Copyright», bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, así como la exportación e importación de esos ejemplares para su distribución en venta, fuera del ámbito de la Comunidad Económica Europea.

ISBN: 84-267-0690-8

Depósito legal: B. 14.856 - 1991

Impreso en España

Printed in Spain

Imprenta: Vanguard Gràfic, S.A. Joan Miró, 17-19. 08930 Sant Adrià de Besòs (Barcelona)

ÍNDICE DE MATERIAS

Prólogo	XI
Prólogo a la sexta edición	XIII

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

	<u>Págs.</u>
1-1. Fundamento de los transformadores de potencia	1
1-2. Finalidad de los transformadores	5
1-3. Tipos de transformadores, designaciones y simbolismos	7
1-4. Constitución de un transformador monofásico	8
1-5. Potencia nominal de un transformador	17
1-6. Visión econométrica del transformador	18
1-7. Otra ejecución de arrollamientos	19

CAPÍTULO II

TEORÍA DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE POTENCIA

II-1. Corriente de excitación o de vacío en el transformador. Corriente en la bobina de reactancia con núcleo de hierro	20
II-2. Diagrama vectorial del transformador en vacío: resistencia y reactancia de dispersión en el primario, ensayo del transformador en vacío	28
II-3. Transformador en carga	34
II-4. Reducción de los valores de un transformador a la tensión de uno de sus arrollamientos	45
II-5. Esquema equivalente al transformador	52
II-6. Esquema equivalente simplificado. Resistencia y reactancia de cortocircuito de un transformador	53
II-7. Ensayo del transformador en cortocircuito. Tensión de cortocircuito	55
II-8. Pérdidas y rendimientos en un transformador	60
II-9. Balance energético	63
II-10. Comparación económica de transformadores	64
II-11. Caída de tensión en un transformador: Efecto Ferranti	68
II-12. Corriente de cortocircuito	73
II-13. Corriente de conexión de un transformador	77
II-14. Trabajo en paralelo de transformadores monofásicos	79
II-15. Alteraciones de las principales características de un transformador de potencia al variar la tensión o la frecuencia aplicadas	89

CAPÍTULO III

TRANSFORMACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS

	<u>Págs.</u>
III-1. Bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos	92
III-2. Transformador de tres columnas	93
III-3. Teoría de los transformadores trifásicos en régimen equilibrado	96
III-4. Armónicas en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones.	101
III-5. Estudio de transformadores trifásicos estrella-estrella con cargas de- sequilibradas	107
III-6. Arrollamientos terciarios o de compensación	113
III-7. Conexiones en los transformadores trifásicos: desfases, trabajo en pa- ralelo	115
III-8. Cargas desequilibradas en los tipos de acoplamientos normalizados	127
III-9. Terceras armónicas en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones secundarias de los acoplamientos normalizados	130
III-10. Resumen de propiedades de diversos grupos de conexión. Ejemplos de aplicación	132
III-11. Cálculo de tensiones de cortocircuito correspondientes a conjuntos de transformadores. Aplicaciones	135

CAPÍTULO IV

REGULACIÓN DE TENSIONES

IV-1. Autotransformadores monofásicos; potencia de paso y potencia propia	142
IV-2. Autotransformadores trifásicos	149
IV-3. Reguladores de inducción	150
IV-4. Transformadores con tomas	153

CAPÍTULO V

TRANSFORMACIONES ESPECIALES

V-1. Transformadores con tres arrollamientos	163
V-2. Conexión de transformadores en V	166
V-3. Transformación de sistemas trifásicos en monofásicos	167
V-4. Transformación de sistemas trifásicos en exafásicos	170
V-5. Transformación de sistemas trifásicos en dodecafásicos	173

CAPÍTULO VI

TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN

VI-1. Transformadores de medida y de protección. Objetivos básicos	174
VI-2. Primeras ideas sobre transformadores de corriente	176
VI-3. Primeras ideas sobre los transformadores de tensión	179
VI-4. Funcionamiento del transformador de corriente	180
VI-5. Errores de intensidad, o de relación, y de fases. Exigencias	184

	<u>Págs.</u>
VI-6. Carga y potencia de precisión en los transformadores de corriente . . .	186
VI-7. Definiciones y clases de precisión según normas	189
VI-8. Influencia de los núcleos. Transformadores con varios núcleos . . .	194
VI-9. Intensidades límites dinámica y térmica	196
VI-10. Elección del transformador de corriente	199
VI-11. Conexiones y formas de trabajo en transformadores de corriente . .	200
VI-12. Funcionamiento del transformador de tensión inductivo	203
VI-13. Errores de tensión, o de relación, y de fase	203
VI-14. Conexiones y formas de trabajo en transformadores de tensión . .	205

APÉNDICE I

**CARGAS PERMISIBLES SEGÚN CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO;
TEMPERATURAS DE REFRIGERANTES, CICLOS DE CARGAS,
ALTURAS DE INSTALACIÓN**

Ap. I-1. Cargas admisibles en diversos casos de funcionamiento	207
Ap. I-2. Disminuciones de cargas admisibles en los casos de refrigerantes con temperaturas superiores a las normales	207
Ap. I-3. Reducciones de potencias por instalaciones en altitudes elevadas . .	208

APÉNDICE II

ASPECTOS TÉRMICOS EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. II-1. Temperaturas de los medios de refrigeración	209
Ap. II-2. Límites de calentamientos en los elementos integrantes de los trans- formadores	209

APÉNDICE III

PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. III-1. Naturaleza de las pérdidas en los transformadores de potencia . .	211
Ap. III-2. Nuevo estudio de la corriente de vacío. Ciclos de histéresis estático y dinámico	211
Ap. III-3. Pérdidas en el ensayo en vacío	213
Ap. III-4. Pérdidas en el ensayo en cortocircuito	213
Ap. III-5. Pérdidas que se considerarán	214
Ap. III-6. Medición de las pérdidas en vacío. Variación con la temperatura .	215
Ap. III-7. Medición de las pérdidas en cortocircuito. Variación con la tempe- ratura	215

APÉNDICE IV

ACOPLAMIENTOS DE EMPLEO GENERAL SEGÚN CEI 76

Acoplamiento de empleo general según CEI 76	217
---	-----

APÉNDICE V

LOS DESFASES Y LA PUESTA EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

	<u>Págs.</u>
Ap. V-1. Posibilidad de obtención de otros desfases (índices horarios) . . .	219
Ap. V-2. Posibilidades de puesta en paralelo de transformadores con distintos índices horarios	220
Ap. V-3. Proceso sistemático para la puesta en paralelo de transformadores con índices horarios ignorados	221
Ap. V-4. Determinación experimental de índices horarios	222

APÉNDICE VI

ANÁLISIS DEL DESEQUILIBRIO FASE-FASE EN LOS TRANSFORMADORES CON CONEXIONES Dy

Análisis del desequilibrio fase-fase en los transformadores con conexiones Dy	224
---	-----

APÉNDICE VII

TRANSFORMADORES CON TRES ARROLLAMIENTOS

Ap. VII-1. Esquemas equivalentes en transformadores monofásicos	227
Ap. VII-2. Esquemas equivalentes en transformadores trifásicos	228
Ap. VII-3. Ensayos para la determinación de parámetros	229
Ap. VII-4. Caídas de tensión	233
Ap. VII-5. Determinación de pérdidas en transformadores con tres arrollamientos	234

APÉNDICE VIII

IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR, EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. VIII-1. Impedancias de cortocircuito inversas	235
Ap. VIII-2. Impedancias homopolares de cortocircuito	236
Ap. VIII-3. Banco trifásico Yd , a base de transformadores monofásicos, con neutro puesto a tierra	237
Ap. VIII-4. Transformador Yd con núcleo de tres columnas y neutro puesto a tierra	239
Ap. VIII-5. Banco trifásico Yy , con los dos neutros puestos a tierra, a base de transformadores monofásicos	240
Ap. VIII-6. Transformador Yy , con núcleo trifásico (sin columna de retorno), y con los dos neutros puestos a tierra	241
Ap. VIII-7. Banco trifásico Yy , a base de transformadores monofásicos, con sólo el neutro primario puesto a tierra (o solamente el secundario).	241
Ap. VIII-8. Transformador, con núcleo de tres columnas, Yy , con sólo el neutro primario puesto a tierra (o solamente el secundario)	242
Ap. VIII-9. Otros casos	243

APÉNDICE IX

**DESIGNACIONES DE TRANSFORMADORES SEGÚN LOS MEDIOS
Y MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN, DE ACUERDO CON LA
RECOMENDACIÓN CEI 76**

	<u>Págs.</u>
Ap. IX-1. Símbolos que se utilizarán	244
Ap. IX-2. Disposición de símbolos	245

APÉNDICE X

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE POLARIDADES

Ap. X-1. Método por corriente continua	246
Ap. X-2. Método por corriente alterna	246

APÉNDICE XI

**TOLERANCIAS EN LOS VALORES NOMINALES
Y EN LOS DE GARANTÍA DE LOS TRANSFORMADORES**

Tolerancias en los valores nominales y en los de garantía de los transformadores	248
--	-----

APÉNDICE XII

**CLASES DE PRECISIÓN EN TRANSFORMADORES DE MEDIDA.
CONSUMOS DE LOS APARATOS ALIMENTADOS, USOS SEGÚN
CLASES DE PRECISIÓN**

Ap. XII-1. Gráficos de errores límite en los transformadores de corriente para medida	249
Ap. XII-2. Consumos de las bobinas amperimétricas de los aparatos alimentados.	249
Ap. XII-3. Usos de los transformadores de corriente, según clases de precisión	252
Ap. XII-4. Clases de precisión para transformadores de tensión para medida y para los de protección	252
Ap. XII-5. Consumo de las bobinas voltimétricas de los aparatos alimentados .	255
Ap. XII-6. Usos de las clases de precisión	256

APÉNDICE XIII

EL ACEITE EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. XIII-1. Función	258
Ap. XIII-2. Naturaleza	258
Ap. XIII-3. Envejecimiento	259
Ap. XIII-4. Características principales de un aceite nuevo	259
Ap. XIII-5. Características del aceite en servicio, Control	260

APÉNDICE XIV

VENTILACIÓN DE CELDAS PARA TRANSFORMADORES

	Págs.
Ap. XIV-1. Importancia de la previsión. Datos básicos	262
Ap. XIV-2. Cálculo de la ventilación necesaria	263
Ap. XIV-3. Complementos útiles en el proyecto	266

APÉNDICE XV

CAÍDAS DE TENSIÓN EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. XV-1. General	268
Ap. XV-2. Diversidad de impedancias de cortocircuito según las tomas	268
Ap. XV-3. Expresión de la caída de tensión unitaria	269

APÉNDICE XVI

ESQUEMA EQUIVALENTE: CÁLCULO DE VALORES

Ap. XVI-1. Valores característicos en el esquema equivalente al transformador	272
---	-----

APÉNDICE XVII

**TRANSFORMADORES DE FRECUENCIA VARIABLE.
TRANSFORMADORES DE ADAPTACIÓN**

Ap. XVII-1. Transformadores de frecuencia variable	274
Ap. XVII-2. Transformadores de adaptación o de máxima potencia	279

APÉNDICE XVIII

DIELECTRICOS MÁS RESISTENTES AL CALOR PARA TRANSFORMADORES

Ap. XVIII-1. Dieléctricos líquidos más resistentes al calor	282
Ap. XVIII-2. Dieléctricos sólidos	283

PRÓLOGO

*¡Qué vergüenza ser tan vana!,
dijo la palabra a la obra,
y la obra a la palabra:
¡Cuando te veo, comprendo lo pobre que soy!*

RABINDRANATH TAGORE

En los cursos básicos de Electricidad y Electrotecnia, preponderan los capítulos teóricos, con miras a crear una amplia base. Con el espectacular desarrollo de las aplicaciones de la Electricidad, la enseñanza de los fundamentos científicos es, cada vez, más abstracta. Y así ha de ser, si el cerebro humano necesita abarcar más y más. Pero, con tan loables propósitos, se corre el riesgo de limitarse a la creación de la base matemática, sin estimular la intuición ni motivar el sentido de realización.

Lejos de desmentir las ventajas de los métodos abstractos de vasto alcance, pero a modo de contrapeso, hasta espíritu tan amplio como Max Planck, afirma que una teoría no cumple su misión simplemente por ser más general, sino tanto mejor si, al ser más particular, aporta respuestas definidas a las cuestiones que se plantean. La vivencia demuestra que lo óptimo no está en una zona, ni siquiera en el punto medio, sino en el sabio uso de la cara y de la cruz.

Concuera con cuanto se ha dicho, la reiterada comprobación de que, en la formación humana en general, y en la del ingeniero en particular, es inútil pretender que un método sea superior a los restantes, siendo la variedad la que aporta los debidos complementos y evita perniciosas deformaciones. A tal fin y como contrapartida a una exclusiva formación teórica, parece útil el estudio de los transformadores con criterios prácticos y utilitarios. Más aún, opinamos que este capítulo de la Electrotecnia básica se presta más que otros. Esta es la razón de que, en relación con otras de sus obras, el autor haya adoptado un método de estudio más pragmático. Se procura señalar las finalidades, se intenta promover el sentido ingenieril, se destaca el valor de las normas y de las recomendaciones existentes,...

Creemos que lo último merece una breve observación. Las normas y las recomendaciones nacionales e internacionales son producto y condensación

de amplia experiencia. Nos sorprende que no se use más tan excelente fuente didáctica, siempre que se emplee hábilmente.

Desacostumbrada extensión se ha otorgado al estudio detenido de los transformadores de medida. Existe muy escasa literatura que se les refiera, incluso en los idiomas técnicos más cultivados. Y no obstante es una realidad demasiado generalizada la defectuosa aplicación de tales elementos. Con el fin de colmar tan evidente laguna, sin duda se ha incurrido en minuciosidad excesiva para el principiante.

Por cuanto se ha dicho, abrigamos la esperanza de que esta obra pueda ser útil, no tan sólo a los estudiantes, sino a los propios ingenieros. No obstante, con lectura limitada a los apartados oportunos, de naturaleza más conceptual, esperamos no desvirtuar la orientación didáctica que se persigue.

No escapará al lector que las metas señaladas y el fin didáctico —que es el principal— de este trabajo, son difícilmente conjugables. Por tal motivo, y pese al cariño con que ha sido escrita, es indudable que, más a que otra, le ha de resultar saludable la crítica. Sería un timbre de honor merecerla.

Como punto final, no quiero omitir mi reconocimiento a los excelentes amigos y colaboradores, Sres. O'Callaghan, Bravo, Capella y Furió por sus inteligentes observaciones.

E. RAS

Barcelona, octubre 1969

PRÓLOGO A LA SEXTA EDICIÓN

No se imaginó la amplia aceptación concedida a esta obra *, patentizada por su sexta edición. En la bruma de dudas que acompaña a todo autor o docente, responsable de las horas que ocupa de la juventud estudiosa, la renovación de las reflexiones es necesaria. Pensamos que en la enseñanza de la ingeniería han de abundar asignaturas y materias que fomenten el espíritu de la realización. Éste es el encargo que de la ciencia recibe el tecnólogo: realización en beneficio de la sociedad y su entorno. Ciertamente, sin caer en la deformación, pues la equilibrada educación del ingeniero requiere desde una base científica suficiente hasta la formación humana, herramienta, esta última, cada día más indispensable, incluso para el especialista.

Si la ciencia da vuelos a la tecnología, no son pocos los casos en que la técnica se anticipó a la ciencia, caso de la máquina de vapor a la termodinámica. Leonardo da Vinci precedió a Copérnico, a Galileo y a Newton. La innovación industrial debe mucho a la intuición, a la observación y a la perseverancia.

Observemos que especialmente los países anglosajones han practicado la interacción ciencia-tecnología y cosechado los mejores frutos. ¡Cuánta avanzada preparación técnica invierten en la investigación científica! Los países cuna de la ciencia occidental no parecen apreciar, en igual grado, los beneficios de aquella interfecundación. ¿Es, quizás, esta obra una modesta aportación al cultivo del espíritu de realización, basado en el estudio de la máquina, también modesta, que es el transformador? ¿Espejismo? En cualquier caso nos parece indudable que, ya en la juventud, hay que fomentar la curiosidad crítica por el entretrejado de recursos y medios técnicos variados que posibilitan una realización.

Fieles, pues, al propósito inicial de esta obra, se ha acentuado aquel carácter, sin ceder a la tentación de recargar excesivamente con pérdida de valor didáctico, pero también sin condensar en meras abstracciones. Lo primero se ha tratado de lograr añadiendo apéndices que enriquezcan en visiones ingenieriles prácticas. El texto general de la obra también ha sido inno-

* Premio anual (1971) al mejor libro técnico, otorgado por la Asociación Nacional de Ingenieros Industriales, Agrupación de Bilbao. Nota del Editor.

vado, especialmente el capítulo reservado a los transformadores de medida. No se ha olvidado la adaptación a la evolución de los reglamentos, recomendaciones y normas, cuya aridez se procura superar desvelando su rico contenido en ciencia y experiencia.

Finalmente, no podemos omitir nuestra manifestación de reconocimiento por las variadas sugerencias y aportaciones de nuestros colaboradores Dr. Salichs y Sr. Capella.

E. RAS

Barcelona, noviembre de 1984

ADVERTENCIA IMPORTANTE

CONFECCION DE PROGRAMAS DE ESTUDIO

Se recomienda, a la mayoría de los principiantes, una lectura limitada a las ideas básicas, dejando para un segundo examen otra más profunda y detenida.

A tal fin, aun a trueque de reiteración, se ha intentado que cada nuevo apartado tenga la menor dependencia posible en relación con los precedentes, y, cuando fue inevitable, se procuró dar una clara referencia que conduzca al estudioso. Con ello se pretende facilitar la posibilidad de la «lectura a saltos».

Pocos son los afortunados libros objeto de lectura completa. Por el contrario, el hombre culto ha de «entreleer» abundante literatura. De ahí que, para facilitar la posible confección de diversos programas de estudio, se ha forzado, hasta límites prudentes, la máxima autonomía de apartados a que se aludió.

Como el tiempo disponible es muy dispar según los diversos centros, cabe confeccionar programas parciales de lectura, que no obstante son, en sí, completos, dentro de su nivel. A título de ejemplo se ofrece el siguiente:

Transformadores monofásicos

I-1; I-2; I-4; II-1; II-2; II-3; II-4; II-5; II-6; II-7; II-11;
II-12; II-14.

Transformadores trifásicos

III-1; III-2; III-3; III-4; III-5; III-7 (parcial)

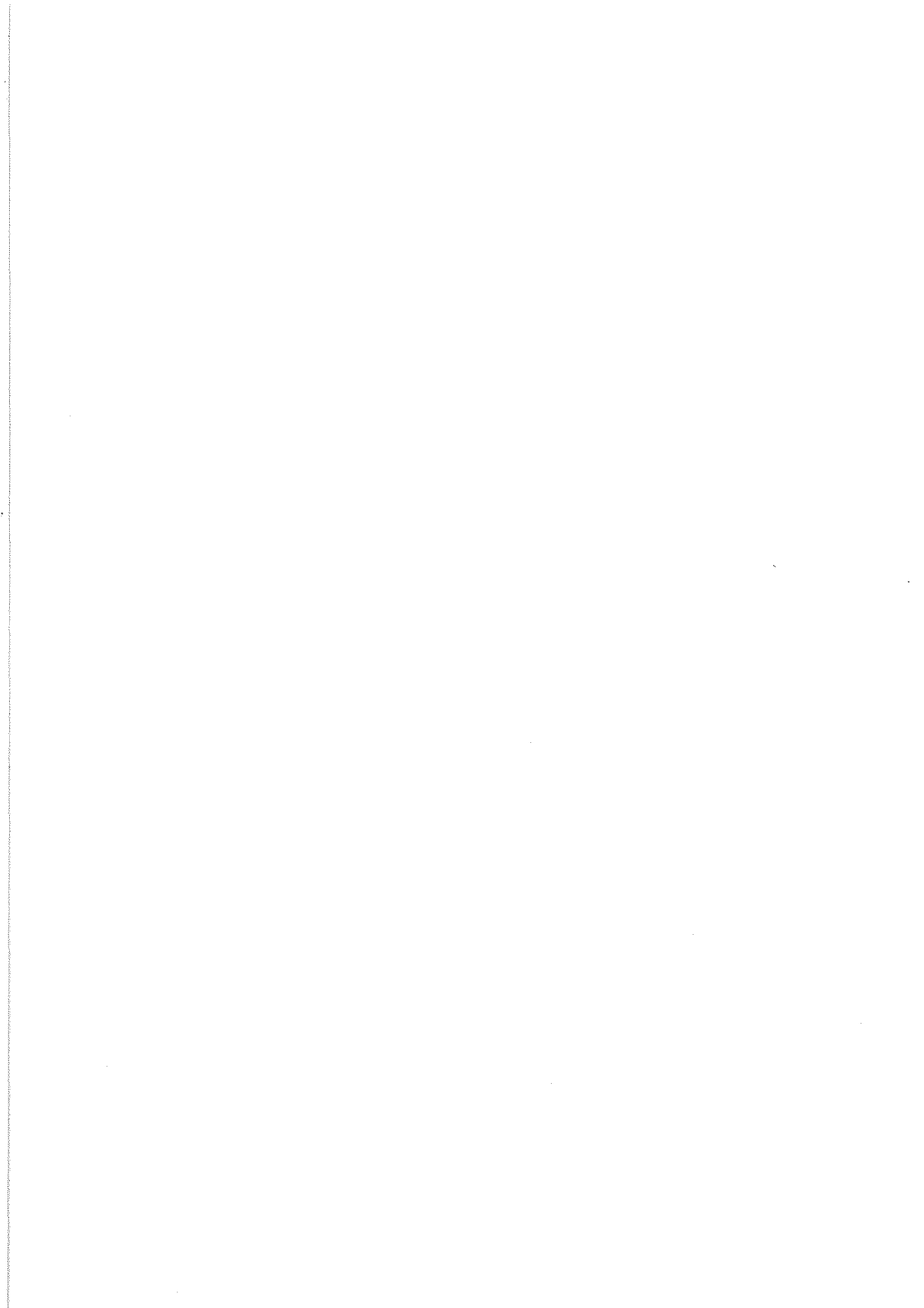
Autotransformadores

IV-1; IV-2

Transformadores de medida

VI-1; VI-2; VI-3; VI-4; VI-12

Constituye un programa bastante completo, a ningún Profesor ha de resultar difícil establecer otros más simples o, por el contrario, más ambiciosos.



CAPÍTULO I
GENERALIDADES

§ I-1. Fundamento de los transformadores de potencia.

Supóngase un circuito magnético en el que se ha dispuesto un arrollamiento, según figura I-1,1a. Se tiene constituida una *bobina de reactancia*.

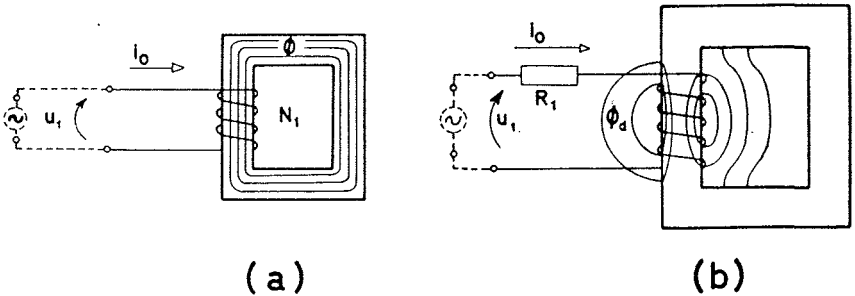


Fig. I-1,1

En las N_1 espiras del arrollamiento se origina, por autoinducción, una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) e_1 ,

$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [I-1.1]$$

Despreciando las caídas de tensión por resistencia (supóngase $R_1 = 0$), puede admitirse, en primera aproximación, que *la f.c.e.m. es igual y de signo contrario a la tensión aplicada*,¹

$$u_1 + e_1 = 0,$$

¹ No se cumplirá exactamente, pues implicaría $i_0 = 0$ (no se olvide que, realmente, $R_1 \neq 0$)

o sea que,

$$u_1 = - e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [I-1.2]$$

Se recuerda que el valor eficaz de e_1 es

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_1 \Phi_m \approx 4,44 f N_1 \Phi_m = 4,44 N_1 f s B_m, \quad [I-1.3]$$

siendo s la sección en hierro del núcleo y B_m la inducción máxima.

En la realidad, el arrollamiento tiene una resistencia R_1 . Además, el flujo Φ no queda totalmente «conducido» por (confinado en) el circuito ferromagnético. Una parte (Φ_d) se establece en el aire. Es el llamado *flujo de dispersión*, se estudiará en el § II-2.2. En la figura I-1,1b, se ha representado la bobina de reactancia real (R_1 y Φ_d). Para mejor visión, se ha exagerado el flujo de dispersión, dejándose de dibujar el flujo «conducido». La resistencia tiene valores relativamente reducidos³. En esta primera visión, se seguirá considerando la bobina ideal ($R_1 = 0$, $\Phi_d = 0$).

Si al núcleo se agrega un segundo arrollamiento, figura I-1,2, se tendrá constituido un transformador.

Imagínese el *transformador en vacío*, es decir, con el segundo arrollamiento abierto (*sin carga*). En tal arrollamiento se induce la f.e.m. alterna senoidal

$$e_2 = u_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad [I-1.4]$$

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_2 \Phi_m \approx 4,44 f N_2 \Phi_m \quad [I-1.5]$$

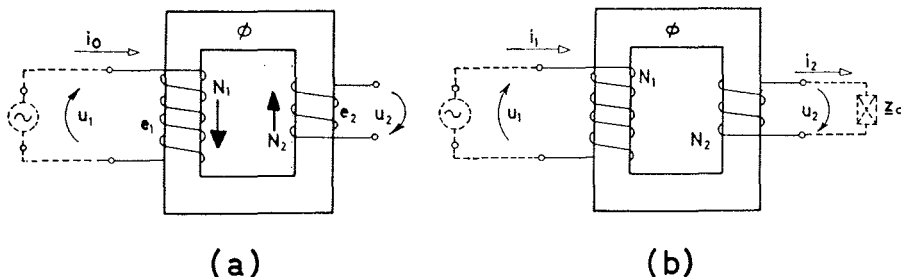


Fig. I-1,2

¹ Obsérvese que, si la tensión aplicada u_1 es senoidal, según se viene suponiendo, el flujo Φ también lo es (atrasado $\pi/2$), aun cuando se alcance la saturación del núcleo. El lector puede prescindir de esta observación, que se considerará en el § II-1.

² Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § II-10.

³ Se ha de interpretar en el sentido de que la caída de tensión $R_1 i_0$ es pequeña frente a u_1 .

(1.) Nota: Debido a las resistencias parásitas en la bobina y al flujo de dispersión en el hierro. En vacío no hay dispersión en el hierro (?)

Al ser $i_2 = 0$ (vacío), $e_2 = u_2$, con lo que, prescindiendo del signo (sentidos), resulta:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{U_{1m}}{U_{2m}} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

La relación de transformación nominal de un transformador es el cociente

$$r_{tn} = \frac{U_{1, \text{nominal}}}{U_{2, \text{vacío}}}, \quad (1) \quad \text{[I-1.6]}$$

estando el transformador en vacío ($i_2 = 0$).

En virtud de lo visto,

$$r_{tn} = \frac{U_{1, \text{nominal}}}{U_{2, \text{vacío}}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{[I-1.7]}$$

A continuación, supóngase que al segundo arrollamiento se conecta la impedancia de carga Z_c (lineal), figura I-1,2. Esto motiva una corriente i_2 , senoidal por serlo e_2 . Por el primer arrollamiento circula una corriente i_1 , que nada autoriza a suponer que tenga que ser igual a la i_0 que circulaba con el transformador en vacío. Habiéndose aplicado una tensión $U_1 = U_{1, \text{nominal}}$ al primer arrollamiento, en el segundo aparece otra, U_2 , que discrepa algo, pero no excesivamente, de $U_{2, \text{vacío}}$ (véanse § II-3 y § II-11), luego

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{U_{1, \text{nominal}}}{U_{2, \text{vacío}}} = r_{tn} \quad \text{[I-1.8]}$$

Los procesos que se producen al aplicar la carga serán estudiados detenidamente. Ahora bien, en esta primera visión, simplificada, del fundamento del transformador, se elude el estudio minucioso, que se suple por unas consideraciones de tipo energético.

Supóngase que el transformador tiene muy pocas pérdidas². Por el principio de la conservación de la energía,

¹ La recomendación CEI estipula que r_t será la relación entre la tensión más elevada y la menor, por lo tanto, nunca será inferior a la unidad. Así que:

α) transformador, reductor, $r_t = U_{1n}/U_{2, \text{vacío}}$; β) transformador elevador $r_t = U_{2, \text{vacío}}/U_{1n}$.

En este texto, y salvo indicación en contra, los transformadores se supondrán reductores (relación según α).

² Los transformadores son máquinas con elevados rendimientos. Como orientación se informa que:

Transformadores de distribución, entre 10 kVA y 1 000 kVA, suelen poseer rendimientos comprendidos entre 96% y 99%.

Transformadores grandes, entre 10 000 kVA y 100 000 kVA, los tienen de cuantías entre 99% y 99,7%.

Ver pérdidas y rendimientos en § II-8.

(sigue en próxima página)

$$U_1 I_1 \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad [\text{I-1.9}]$$

$$U_1 I_{1, \text{act}} \approx U_2 I_{2, \text{act}}$$

Otra relación aproximada es

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2 \cos \varphi_2}{U_1 \cos \varphi_1} \approx \frac{1}{r_{\text{tn}}} \frac{\cos \varphi_2}{\cos \varphi_1} \quad [\text{I-1.10}]$$

A plena carga, puede aceptarse, en general, y como primera aproximación,

$$\varphi_1 \approx \varphi_2, \quad [\text{I-1.11}]$$

luego:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{r_{\text{tn}}} \quad [\text{I-1.12}]$$

Las conclusiones [I-1.9], [I-1.11] y [I-1.12] son simplistas¹, pero ofrecen una primera visión, idealizada y útil, de la función del transformador.

Realmente, los valores que anteceden se refieren a transformadores trifásicos (a plena carga). Los rendimientos de los transformadores monofásicos suelen ser algo inferiores.

Por lo demás, el estudio correspondiente a los capítulos I y II de esta obra, ha de constituir la base para el de los transformadores trifásicos (capítulo III). Por ello, en este caso, y en próximos, parece más efectivo proporcionar valores relativos a transformadores trifásicos.

¹ El resultado

$$\frac{U_1}{U_2} \approx r_{\text{tn}}$$

va perdiendo rigor a medida que aumentan las cargas. Por el contrario, los resultados

$$\frac{I_2}{I_1} \approx r_{\text{tn}} \text{ y } \varphi_1 \approx \varphi_2$$

lo pierden tratándose de cargas pequeñas, llegando a ser inadmisibles en regímenes cercanos al de vacío.

También, en primera aproximación, puede escribirse

$$U_1 I_1 \sin \varphi_1 \approx U_2 I_2 \sin \varphi_2, \quad [\text{I-1.13}]$$

siempre que la carga reactiva del segundo arrollamiento sea importante. Las potencias reactivas están destinadas al hacer y deshacer de campos magnéticos y eléctricos. $U_2 I_2 \sin \varphi_2$, los campos correspondientes a la carga Z_2 . $U_1 I_1 \sin \varphi_1$, los mismos anteriores más los relativos al flujo en el núcleo y a los flujos de dispersión. Si los últimos son despreciables, frente a $U_2 I_2 \sin \varphi_2$, se tendrá la igualdad aproximada [I-1.13]. Esta y la [I-1.9] permiten deducir [I-1.11], con las reservas indicadas.

Con las mismas reservas (para regímenes cercanos a la plena carga, y con carácter de aproximación) se tiene

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \quad (\varphi_1 \approx \varphi_2)$$

Es decir, las potencias aparentes absorbida (primario) y cedida (secundario), son, aproximadamente, iguales. La máxima, para la que ha sido construido el transformador, cumpliendo las garantías impuestas (p. ej. determinado calentamiento), recibe el nombre de *potencia (aparente)* del transformador (véase § I-5).

§ I-2. Finalidad de los transformadores.

Los transformadores se definen como máquinas estáticas que tienen la misión de transmitir, mediante un campo electromagnético alterno, la energía eléctrica de un sistema, con determinada tensión, a otro sistema con tensión deseada.

Sacrificando rigor, para ganar concreción, y en términos ideales útiles, puede añadirse que la función de esta máquina consiste en transformar la energía (potencia), en el sentido de alterar sus factores según la relación

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \quad (\varphi_1 \approx \varphi_2)$$

Hay que agregar que esta función se realiza con simplicidad y económica-mente (escaso mantenimiento, elevado rendimiento y coste bajo, en comparación con máquinas rotatorias).

Puede afirmarse que, en la preponderancia de la corriente alterna, el transformador juega un papel principal.

El lector no habrá dejado de observar que esta máquina no permite la transformación de la corriente continua. Razone lo que sucede si $u_1 = U_1 = \text{constante}$.

Véase, a título de ejemplo, el esquema simplificado de un sistema de generación, transporte y distribución de energía eléctrica, figura I-2,1. En cada sector se utiliza la tensión más económica, atendiendo a la potencia a transmitir, longitud de la línea y otras circunstancias.

En el esquema unifilar de la figura I-2,1 se han utilizado símbolos de la CEI (*Comisión Electrotécnica Internacional*), también IEC (*International Electrotechnical Commission*). G, generador; T_E, transformador elevador; T_R, transformador reductor.

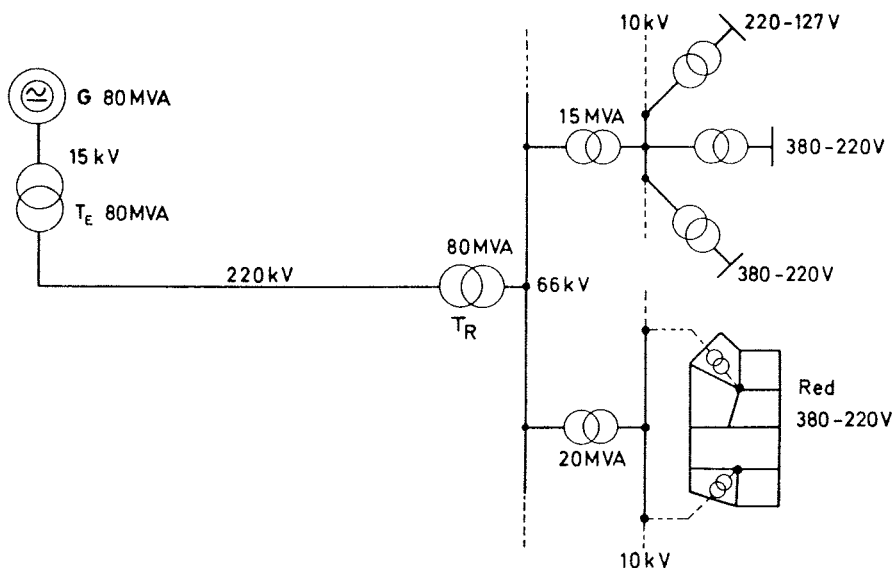


Fig. I-2,1

Existen fórmulas que orientan sobre la tensión más económica para un transporte. Es conocida la de STILL,

$$\text{tensión compuesta } U(\text{kV}) = 5,5 \sqrt{\frac{L (\text{km})}{1,609} + \frac{P (\text{kW})}{100}}$$

Se refiere a líneas trifásicas con longitudes superiores a 30 km.

Por supuesto, hay que adoptar tensiones normalizadas.¹

Queda de manifiesto la cómoda adaptabilidad que a los sistemas confieren los transformadores.

¹ Las tensiones nominales trifásicas establecidas son:

Entre 100 y 1 000 V (t. compuestas): 220, 380, 440 V.

La norma UNE 20039 recomienda, para las nuevas instalaciones:

Tensiones superiores a 1 000 V (t.c.): (1 000), 3 000, 6 000, 10 000, (15 000), (30 000), 45 000, 66 000, (110 000), 132 000, 220 000.

Se procurará evitar los valores entre paréntesis. Por razones históricas, en parte de España se emplea la tensión 25 000 V.

Para tensiones superiores recúrrase a la *Publication 38 (1975)* de la CEI:

Tensiones más elevadas para el material, en kV:

(300), (362), 420, 525, 765

Se entenderán los mayores valores de las tensiones que se pueden presentar en un instante y en cualquier punto de la red en condiciones de explotación normales. Estos valores no tienen en cuenta las variaciones transitorias, por ejemplo, debidas a maniobras en la red.

§ I-3. Tipos de transformadores, designaciones y simbolismos.

Los transformadores pueden estar destinados a transformar potencias de cierta consideración, alimentados por tensión y frecuencia fijas (*transformadores de potencia*, § II). Pueden usarse en circuitos de la Técnica de la comunicación, previstos para trabajar con tensiones y frecuencias diversas (*transformadores de comunicación*, § II-16). Otra aplicación consiste en facilitar la conexión adecuada de aparatos de medida o de protección (*transformadores de medida* § VI).

Por los sistemas de tensiones, se clasifican en *monofásicos*, *trifásicos*, *trifásicos-exafásicos*, *trifásicos-dodecafásicos*, *trifásicos-monofásicos*, etc.

Según aumenten la tensión o la disminuyan, se denominan *transformadores elevadores* o *transformadores reductores* (T_E y T_R en figura I-2,1).

Según el medio ambiente para el que estén preparados, en *transformadores para interior* o *tipo intemperie*.

De acuerdo con el elemento refrigerante que requieran, en *transformadores en seco*, *en baño de aceite*, *con pyraleno* (*askarel*, § I-4.4).

Según puedan proporcionar permanentemente su potencia nominal (§ I-5) con refrigeración natural o no, se distinguen los *transformadores con refrigeración natural* de los *transformadores con refrigeración forzada*.

El arrollamiento que recibe la energía activa se llama *primario*; el que la suministra, *secundario*.

El arrollamiento con mayor tensión recibe el nombre de *devanado de alta* (AT) o, aunque menos usual, mejor *devanado de tensión superior*, el de menor tensión es el de *devanado de baja* (BT) o *devanado de tensión inferior*. Los conceptos devanado de alta y devanado de baja, no coinciden, necesariamente, con los correspondientes a devanados o arrollamientos primario y secundario. Pueden existir transformaciones alta-alta, baja-baja, alta-baja y baja-alta.

Los principales símbolos para la representación de transformadores son, figura I-3,1:

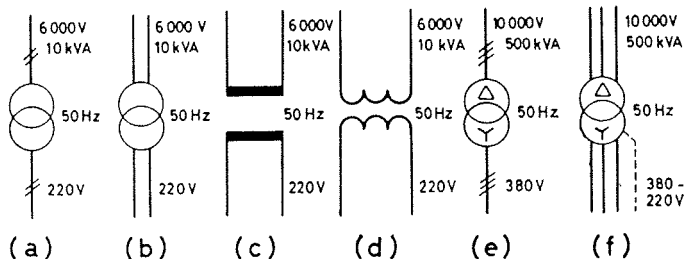


Fig. I-3,1

- a) transformador monofásico 10 kVA, 50 Hz, 6 000/220 V,
- b) id. id.,
- c) id. id.,
- d) id. id.,
- e) f) transformador trifásico 500 kVA, 50 Hz, 10 000/380 V, conexiones respectivas triángulo y estrella.

De los anteriores símbolos fundamentales derivan otros que se verán.

§ I-4. Constitución de un transformador monofásico.

§ I-4.1. CIRCUITOS MAGNÉTICO Y ELÉCTRICOS.

Existen dos circuitos eléctricos (primario y secundario), y un circuito magnético, para el flujo Φ . En la figura I-4,1 se ven varias disposiciones posibles, equivalentes en el aspecto cumplir con la misión del transformador, explicada en § I-2.

La figura I-4,1a, ofrece una disposición simple. El primario y el secundario están montados en distintas columnas del circuito magnético del transformador.

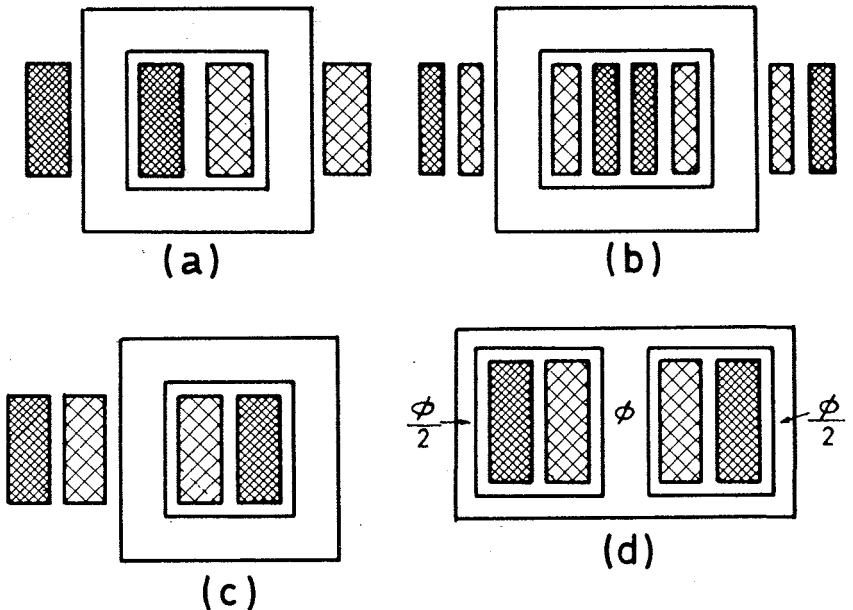


Fig. I-4,1

En la figura I-4,1b, se han arrollado la mitad de las espiras del primario en la columna de la izquierda y la otra mitad en la de la derecha. Análogamente se ha procedido con el secundario.

En la figura I-4,1c, ambos arrollamientos se han montado en una columna.

En los tres casos vistos, figuras I-4,1a, b y c, los circuitos magnéticos son análogos.

En la figura I-4,1d, los arrollamientos están dispuestos en una columna, pero el circuito magnético se completa por dos caminos en derivación. Existen tres columnas. En la central se establece un flujo Φ (sección de columna s), en cada una de las extremas el flujo es $\Phi/2$ (sección $s/2$).

Los transformadores a base de núcleos según (a), (b) y (c), son los *normales*. Los concebidos según núcleos tipo (d), son los llamados *acorazados*.

§ I-4.2. CIRCUITO MAGNÉTICO.

Con el fin de disminuir las pérdidas por corrientes parásitas, los núcleos están constituídos por chapas ferromagnéticas eléctricamente aisladas (figura I-4,2a).

La chapa utilizada es de acero aleado a base de silicio (del orden del 3% al 5%). Recibe el nombre de *chapa magnética*. La aportación del silicio tiene las finalidades de reducir las pérdidas por histéresis y de aumentar la resistividad del acero. Con lo último se logra, lógicamente, disminuir las pérdidas por corrientes parásitas. Además, el silicio estabiliza la chapa, en el sentido de prácticamente evitarle el envejecimiento (aumento de las pérdidas, con el tiempo, principalmente por la acción continuada del calor).

La ordinaria *chapa magnética normal* se lamina en caliente. Modernamente se utiliza la llamada *chapa magnética de grano orientado* o *laminada en frío*¹. El acero silicioso cristaliza en el sistema regular centrado (figura I-4,2b). Tal cristalización ofrece una anisotropía magnética. Por supuesto que una masa de acero no es un monocristal, sino que está formada por cristales de mayor o menor tamaño según el proceso de fabricación y tratamiento que sufre. Cada cristal tiene una malla cristalina con determinada orientación. El conjunto de cristales, aun cuando cada uno anisótropo, forma un cuerpo isótropo. Por fuertes laminados en frío, los cristales tienden a orientarse. Con el fin de eliminar tensiones internas, el material se somete a un tratamiento térmico. Con ello mejoran las características magnéticas, conservándose la orientación. La dirección definida por el eje cuaternario es la más favorable desde el punto de vista magnético. Esto motiva que la chapa magnética de grano orientado sea, en conjunto, claramente anisótropa, y que la dirección magnéticamente más favorable sea la de la laminación. En tal sentido, μ tiene valores más elevados. Además, en campos alternativos, las pérdidas son mínimas. Consecuentemente, la buena utilización de la chapa magnética laminada en frío requiere que el flujo magnético ofrezca sus líneas según la dirección del laminado.

Actualmente, en la fabricación de transformadores, se emplea, con carácter casi exclusivo, la chapa magnética de grano orientado. No obstante, hay que tener presente que

¹ No es exclusivamente por el laminado que se diferencia tal tipo de chapa. La proporción de silicio suele oscilar entre el 3% y el 3,5%. Se parte de acero más puro y con menor contenido en carbono que para la chapa magnética ordinaria.

buen número de los transformadores en servicio se fabricaron a base de chapa laminada en caliente. El espesor de las chapas utilizadas es de, aproximadamente, 0,35 mm. Las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas suelen darse en vatios por kilogramo de material, referidas a 50 Hz y 1 T (1 Tesla = 10 000 Gauss), se añade el valor relativo a 1,5 T.

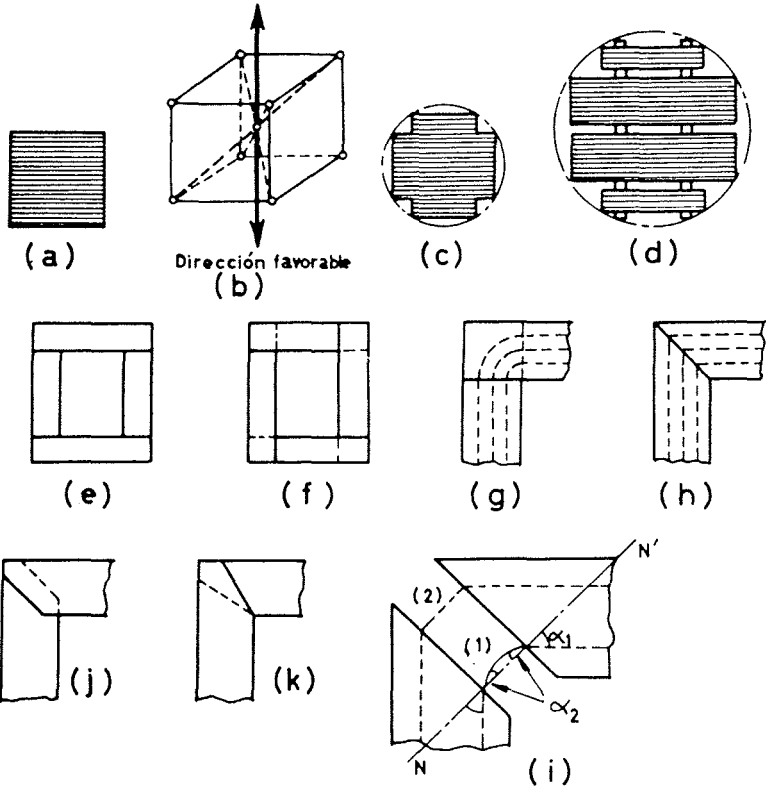


Fig. I-4,2

Para orientación se indica que la chapa magnética (siliciosa) ordinaria (laminada en caliente 0,35 mm), para transformadores, suele tener pérdidas del orden de $0,8 \div 1,3$ W/kg (1T). La chapa de grano orientado ofrece valores del tipo $0,4 \div 0,5$ W/kg (1T), y $1 \div 1,2$ W/kg (1,5 T). Por supuesto que los valores relativos a la chapa de grano orientado se refieren a la dirección del laminado. Los transformadores de actual fabricación suelen proyectarse con inducciones que oscilan entre 1,5 y 1,85 T.

Los datos anteriores ponen en evidencia el gran progreso conseguido, en los últimos años, con la chapa de grano orientado. Permite reducir las pérdidas, o disminuir el peso (volumen) del núcleo, o bien, parcialmente, alcanzar ambos objetivos a la vez.

El aislamiento entre chapas magnéticas puede ser de diversa naturaleza. Fue de general uso el papel, que se pegaba antes del corte en una de las caras de la chapa magnética. Posteriormente, se utilizó barniz (silicato sódico).

Actualmente, las chapas de grano orientado vienen preparadas mediante un tratamiento especial (termoquímico, nombre comercial «*carlite*»), que proporciona el necesario aislamiento (ambas caras). En consecuencia, el aislamiento ya no es operación que deba efectuar el constructor, como lo fue con los métodos anteriores. También es notable el progreso conseguido en otro aspecto. Se llama *factor de relleno, o de aprovechamiento*, al cociente de dividir la sección en hierro del núcleo, también llamada útil, por la sección total (hierro más aislamiento). Factores de relleno en núcleos para transformadores (chapas 0,35 mm), con diversos aislamientos:

Papel (una cara)	0,88
Silicato sódico (una cara) ..	0,9
« <i>carlite</i> » (dos caras)	0,95 ÷ 0,97

El último factor de relleno debe su elevado valor no tan sólo al tipo de aislamiento, sino, también, al hecho de que la chapa laminada en frío es más lisa que la normal.

Como se verá (§ I-4.3), existe razón de conveniencia para que los arrollamientos primario y secundario tengan las bobinas de forma circular (figura I-4,4). En estas condiciones, lo lógico sería que la sección del núcleo ferromagnético fuese, a su vez, circular. Esto resulta inconveniente desde el punto de vista corte de las chapas (distintos anchos) y de la confección del núcleo. Tratándose de transformadores pequeños, se usa la solución, más simple, a base de núcleos de sección cuadrada (figura I-4,2a). En unidades mayores, para lograr un mejor aprovechamiento, se recurre a núcleos, según figura I-4,2c, d, incluso con mayor festoneado. De esta forma, y por motivos de economía, cuanto mayor sea el transformador más tiende al círculo la sección del núcleo.

Con el fin de disipar el calor producido en la masa del núcleo (pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas), los núcleos grandes no se proyectan macizos, intercalándose canales de refrigeración (figura I-4,2d).

Las chapas magnéticas pueden cortarse para montar los *núcleos a tope* (figura I-4,2e), o bien *al solape* (figura I-4,2f). Con cualquiera de las dos soluciones, existen trechos en los cuales el flujo no se establece longitudinalmente, en relación con la dirección del laminado (figura I-4,2g). Esto origina, en tales zonas, tratándose de chapas con grano orientado, un aumento de pérdidas (disminución de rendimiento, calentamiento). Para evitarlo, al aparecer las chapas de grano orientado (anisotropía), se ha recurrido al llamado *corte a 45°* (figura I-4,2h).

En la figura I-4,2i, para mejor apreciar lo que ocurre en el entrehierro, se han representado, con detalle, las refracciones de las líneas de campo magnético. Es sabido que,

dados los elevados valores de μ para los materiales ferromagnéticos, los ángulos α_2 en el aire (véase línea (1)) son, prácticamente, nulos, (las líneas emergen casi normalmente (2)).

Este tipo de corte también admite la *disposición al solape*, figuras I-4,2j y k. Análogas disposiciones en núcleos trifásicos véanse en la figura III-2,1.

§ I-4.3. ARROLLAMIENTOS. CIRCUITOS ELECTRODINÁMICOS.

En su función básica, lo esencial de los arrollamientos es el número de espiras (véase § I-1), siendo de interés secundario la forma de tales espiras y la disposición de los arrollamientos.

Dos disposiciones constructivas pueden verse en la figura I-4,3. La representada en (a) es a base de *arrollamientos concéntricos* o *por capas*, separados por un cilindro de material aislante. La figura en (b) es a base de *arrollamientos alternados* constituidos por *discos*, *galletas* o *bobinas*.

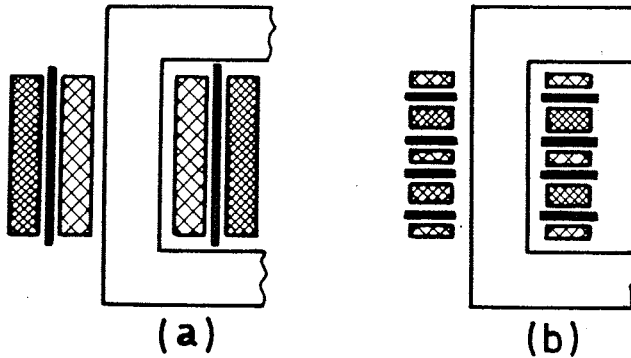


Fig. I-4,3

En la disposición (a), el arrollamiento de baja suele ser el interior. En la (b), suelen serlo las bobinas extremas.

Las espiras son, normalmente, circulares.

Téngase presente que, en caso de recorrer los arrollamientos una corriente elevada (cortocircuito), se producirán esfuerzos dinámicos de consideración. En la figura I-4,4 se ha representado una espira circular (en trazo seguido), y, en ella, dos elementos de corriente diametralmente opuestos. Se pueden asimilar a dos corrientes con direcciones paralelas y sentidos contrarios. Está claro que los esfuerzos dinámicos ($F-F'$) son de repulsión. Por lo tanto, si la bobina no hubiese tenido, previamente, la forma circular, por ejemplo la dibujada en trazos de la figura, los esfuerzos dinámicos tenderían a dársela.

Se ha deseado dar una idea simple de los esfuerzos dinámicos. No obstante, el problema no es tan sencillo, ya que hay que considerar todas las espiras a la vez (primario y secun-

dario). Todas las corrientes se afectan dinámicamente. Así, en el caso de arrollamientos concéntricos, figura I-4,3, se producen esfuerzos radiales que tienden a comprimir las espiras del arrollamiento interno y a extender las del externo. También se producen esfuerzos axiales. Véanse § II-3.6 y § IV-4.1 (figura IV-4,2).

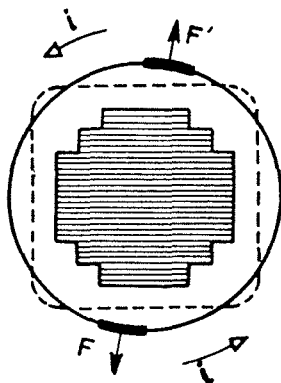


Fig. I-4,4

Lo anterior justifica la preferencia por la forma constructiva a base de espiras circulares, que mejor soportan aquellos esfuerzos.

§ I-4.4. REFRIGERACIÓN.

Las pérdidas en los arrollamientos, en el núcleo, y en otros elementos (apéndice III), motivan el calentamiento de la máquina, que hay que limitar (apéndice II).

Los principales medios refrigerantes que se utilizan, en contacto inmediato con los arrollamientos, son el aire y el aceite mineral.¹ En sustitución de este último se emplean líquidos incombustibles especiales llamados *askarel* (nombres comerciales «*pyraleno*», «*clophen*»). Esto establece una primera clasificación: *transformadores en seco* y *transformadores en baño de aceite* (o *askarel*).

El uso del aceite, frente al aire, está justificado por sus mejores características térmicas y eléctricas.

El aceite tiene mejor conductividad térmica. Además, posee mayor calor específico al propio tiempo que más elevado peso específico. Ambos factores, combinados, proporcionan buena capacidad de almacenamiento térmico, por unidad de volumen. Es de es-

¹ De composición variable según procedencia del producto bruto (EE.UU., Venezuela, Asia, URSS, etc.). Sobre aceites para transformadores véase el apéndice XIII.

pecial interés en el caso en que las máquinas están sometidas a sobrecargas pasajeras. En relación con el interesante tema de las sobrecargas, véase el apéndice I que pone de relieve la ventaja del aceite frente al aire.

Eléctricamente, hay que añadir que el aceite tiene una rigidez dieléctrica notablemente más favorable que el aire.

La parte activa del transformador va sumergida en aceite, dispuesta en un tanque o caja, figura I-4,5. La caja puede tener una superficie de refrigeración considerable, a base de construirla con ondas (a), con tubos (b), o con radiadores adosados (eventualmente desmontables para el transporte) (d).

La caja elimina el calor, fundamentalmente por convección y por radiación. La refrigeración externa de la caja (ondas, tubos, o radiadores), puede efectuarse por convección natural, o bien forzada. Esto último se consigue disponiendo ventiladores que activen la circulación del aire (especialmente útil en el caso de radiadores). Ello motiva la clasificación: *transformadores con refrigeración natural* y *transformadores con refrigeración forzada*.

En lo anterior, se ha venido suponiendo que el aceite, dentro de la caja, tiene un favorable movimiento natural de convección que realiza el transporte del calor entre las partes activas y la caja. El aceite puede tener circulación forzada mediante una bomba. Por circuito cerrado, se le hace pasar por un refrigerador (por ejemplo, a base de agua).

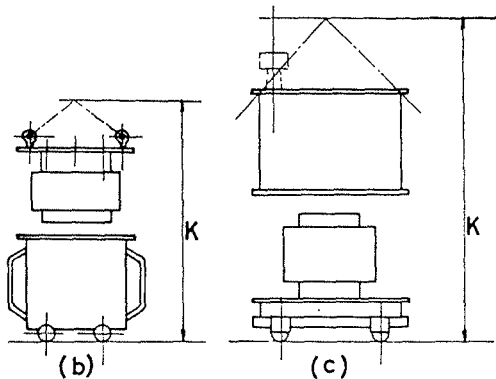
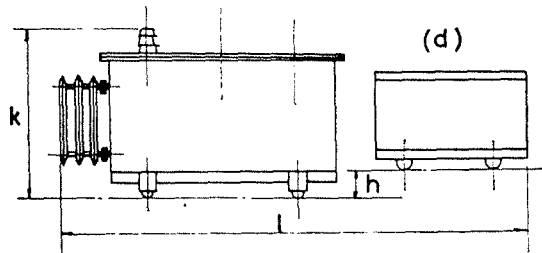
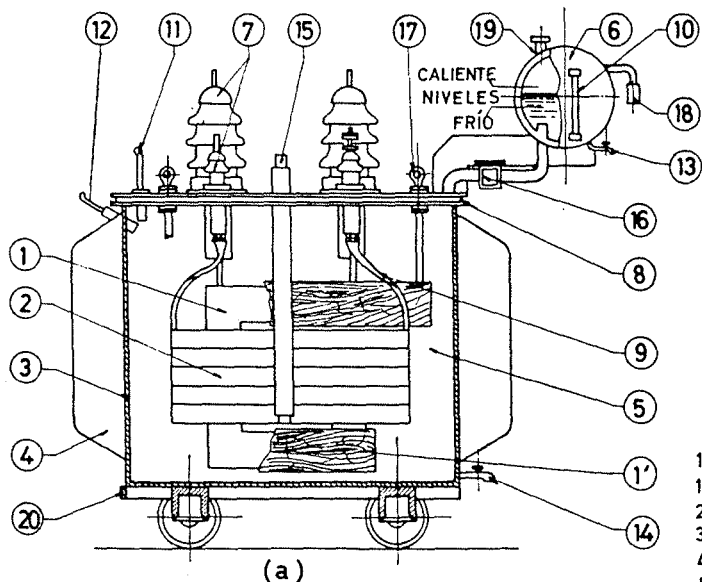
Las designaciones de los transformadores, según los medios y métodos empleados para la refrigeración, puede verse en el apéndice IX.

Como sea que la potencia de un transformador viene limitada por un valor máximo de calentamiento admisible (apéndice II), se comprende que la ventilación forzada sea un medio eficaz para aumentar la potencia (economía en el coste). Esto conduce a la fabricación de ciertos transformadores caracterizados por dos potencias: potencia a base de ventilación natural y potencia con ventilación forzada (ejemplo: transformador 15 000 — 18 000 kVA)¹

El problema de la refrigeración de las máquinas eléctricas en general, y de los transformadores en particular, aumenta en dificultad a medida que crecen las potencias. Es fácil de intuir, pero puede verse razonado en el ejercicio de § I-6. Lo anterior explica que los transformadores pequeños (para radio, etc.) se construyan, de la forma más económica, en seco con ventilación natural por aire, sin ninguna complicación. Los transformadores usuales de distribución ($10 \div 1\,000$ kVA) se proyectan, normalmente, a base de baño de aceite con refrigeración natural. En las potencias más bajas, a base de caja lisa. A medida que aumentan las potencias, a base de caja con crecientes superficies de ondas o tubos. Para transformadores grandes se recurre a radiadores, que proporcionan mayores superficies. Además, pueden entrar en consideración las refrigeraciones forzadas por ventiladores o mediante bombas.

La parte activa de los transformadores debe ser inspeccionable. Para ello ha de ser posible el «desencubado», es decir, sacar la parte activa de la cuba, según se representa

¹ Transformadores especialmente indicados en aquellos casos en que la máxima potencia solamente ha de servirse durante escasas horas «punta». El servicio normal se cubrirá con ventilación natural, el de «puntas» con ventilación forzada.



- 1- Núcleo
- 1'-Prensaculatas
- 2- Devanados
- 3- Caja, cuba o tanque
- 4- Ondas de refrigeración
- 5- Aceite
- 6- Depósito de expansión
- 7- Atravesadores de alta y de baja
- 8- Junta
- 9- Conexiones
- 10- Nivel de aceite

- 11- Termómetro de contactos
- 12- Termómetro indicador
- 13- Grifo de vaciado
- 14- Grifo de vaciado y toma de muestras
- 15- Conmutador de tensiones
- 16- Relevador Buchholz
- 17- Cáncamos de elevación
- 18- Desecador de aire
- 19- Tapón de llenado
- 20- Puesta a tierra

Fig. I-4,5

en la figura I-4,5b. Basta vaciar de aceite el depósito de expansión. Son datos interesantes el peso de la parte elevable y la cota de «desencubado» K . La indicada es la ejecución normal. Tratándose de transformadores grandes, y con el fin de economizar grúa (reducida capacidad de elevación), se puede prever la ejecución de la *caja en campana* (figura I-4,5c), que obligará a un vaciado casi total del aceite. Si, por circunstancias especiales del proyecto, interesa, además, reducir la cota K al máximo, puede recurrirse a la ejecución *caja en tunel*, figura I-4,5d. El «desencubado» es por tracción lateral. Requiere disponibilidad en planta, e implica vaciado total, pero evita grúa.

Sobre ventilación de transformadores véase el apéndice XIV.

§ I-4.5. CONSERVACIÓN DEL ACEITE.

En relación con el aceite, puede verse el apéndice XIII.

El transformador es una máquina que apenas necesita conservación. El elemento que mayor atención requiere es el aceite. Los aceites minerales tienden a alterarse («envejecimiento»)¹, es decir, a oxidarse y a polimerizarse. Estas alteraciones merman las cualidades electrotécnicas del aceite. El «envejecimiento» es activado por la temperatura, la humedad, y el contacto con el oxígeno del aire, formando lodos y productos ácidos.

Para atenuar el «envejecimiento» se disponen los *depósitos de expansión* o *conservadores de aceite*, figura I-4,5. Al calentarse el transformador, con la carga, el aceite se dilata, con lo que fluye una parte hacia el depósito de expansión. Este depósito tendrá un nivel mínimo (transformador frío), y un nivel máximo (en caliente). Así se consigue que la superficie del aceite en contacto con el oxígeno del aire sea menor. Además, el aceite del depósito de expansión está más frío que el de la capa superior de la caja.

Por lo expuesto, las normas *VDE 0532*, § 41 permiten que, en la capa más caliente (en la caja), el aceite alcance una sobret temperatura de 60 °C, si hay depósito de expansión, y solamente 55 °C si no existe (apéndice II).

Además, el aceite puede absorber humedad, lo que provoca un sensible descenso de su rigidez dieléctrica. El depósito de expansión contribuye a evitar la humedad. En la entrada de aire del conservador puede disponerse un desecador químico («*silicagel*»).

§ I-4.6. OTROS DIELECTRICOS.

En ocasiones (lugares públicos, industrias químicas, barcos, locales peligrosos, ahorro en primas de seguros, etc.) se sustituye el aceite por dieléctricos resistentes al calor (*askarel*). En España se usa el «*pyraleno*». Se trata de hidrocarburos clorados, mezclados en convenientes proporciones a fin de lograr viscosidades no excesivas.

¹ Modernamente, se usan «*inhibidores*» que, adecuada y oportunamente añadidos al aceite, retrasan los procesos de «envejecimiento».

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS COMPARADAS

	Aceite	«Pyraleno»
Peso específico: a 15 °C	0,88	1,56
a 100 °C	0,83	1,47
Rigidez dieléctrica kV/cm	220	220
Índice dieléctrico: a 15 °C	2,4	4,5
a 100 °C	2,4	4

El «pyraleno» no origina con el calor mezclas explosivas con el oxígeno. Incluso con temperaturas relativamente elevadas es estable, o sea que no sufre alteraciones («envejecimientos») en contacto con el aire. En cambio es volátil y fácilmente absorbe humedad. Por este conjunto de características, y por su desagradable olor, los transformadores con «pyraleno» se suelen construir sin «respiración», habiéndose previsto un «pulmón» de aire, suficiente para que pueda compensar las variaciones de volúmenes, evitando excesivas presiones. En ocasiones se prevén con respiración, con desecador, y con una válvula especial que evita los desagradables olores.

El «pyraleno» tiene una densidad superior a la unidad. Por lo tanto, la toma de muestras, para comprobar la humedad, hay que efectuarla en la parte superior del transformador, contrariamente a lo que ocurre con el aceite. Es gran disolvente de barnices, resinas, aceites, pinturas grasas, etc. Por consiguiente, la previsión del uso de aquel dieléctrico, implica la construcción especial del transformador, evitándose el empleo de los mencionados productos. No se mezclará «pyraleno» con aceite.

Los transformadores con «pyraleno» son más costosos (aproximadamente 20 %) que a base de aceite, también más pesados.

El arco eléctrico, además de gasificarlo, descompone al «pyraleno», originando productos nocivos, si bien inexplorados. Tras largo empleo, actualmente el uso de los *askarel* es objetado, véase el apéndice XVIII de esta obra.

Tratándose de transformadores pequeños (sin dificultad en la refrigeración), se utilizan otros dieléctricos sólidos (incluso combustibles) que, colándolos a temperatura, embiben los devanados (parafina, asfalto, etc.)

§ I-5. Potencia nominal de un transformador.

La alusión a la potencia nominal de un transformador siempre se refiere a la potencia aparente (S).

Por definición, *potencia nominal* (kVA o MVA) de un transformador monofásico es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal correspondiente¹. *Tensiones y corrientes nominales* son aquellas para

¹ La *CEI Transformadores de potencia* señala que, estando el transformador en carga con la tensión nominal en bornes de primario, la potencia aparente que puede proporcionar el secundario difiere de la nominal en virtud de la caída interna del transformador, véase § II-11. Aquella potencia es igual a la tensión secundaria real por la intensidad nominal correspondiente.

las cuales el transformador ha sido proyectado (ha de cumplir las garantías ofrecidas) y serán los valores base de ensayos. La CEI añade que, en transformadores con dos arrollamientos, para ambos se asignará la misma potencia nominal que será la del transformador.

En consecuencia, se ve que la potencia nominal de un transformador es un valor convencional de referencia. Esto se va a aclarar, aun cuando sin entrar en detalles cuya explicación requiere conceptos que han de verse más adelante.

El transformador, en régimen de trabajo, se calienta en virtud de las pérdidas en el hierro (núcleo) y en los arrollamientos (efecto JOULE). En términos prácticos usuales, se considera que un transformador podrá trabajar, en régimen permanente y en condiciones nominales (potencia, tensión, corriente y frecuencia), sin deterioro alguno (prácticamente sin «envejecimiento»). Esto requiere que las temperaturas de las distintas partes constituyentes del transformador no excedan ciertos límites (apéndice II).

Lo dicho no significa que la potencia nominal que se asigne a un transformador responda a que éste alcance las temperaturas límites permisibles. Si así fuese, podría afirmarse que la potencia de un transformador estaría fijada por una cuestión térmica. Por razones diversas, puede desearse un transformador cuyas temperaturas extremas (en condiciones nominales de servicio) queden por debajo de aquellos límites. En tal caso se asignará al transformador una potencia nominal inferior (también intensidad nominal y efecto JOULE más pequeños) a la que, atendiendo a los aspectos térmicos, podría atribuírsele.

El servicio térmicamente correcto de un transformador implica su instalación en adecuadas condiciones de ventilación, véase apéndice XIV.

§ I-6. Visión econométrica del transformador.

Ejercicios

A base de supuestos simplificados, y en relación con transformadores, se pueden establecer leyes sencillas, relativas a potencias, volúmenes, pesos, pérdidas, superficies de refrigeración, potencia de refrigeración por unidad de superficie, etc.

Supóngase que se proyecta una serie de transformadores con semejanza geométrica. En todos se prevén las mismas inducciones y densidades de corriente en los arrollamientos.

Si a la relación entre dos dimensiones (longitudes) correspondientes se la representa

$$m = \frac{L_2}{L_1}$$

resultan las siguientes proporcionalidades aproximadas:

- | | |
|-----------------------------------|-------|
| 1) Flujos en núcleos | m^2 |
| 2) Tensiones inducidas | m^2 |
| 3) Intensidades en arrollamientos | m^2 |
| 4) Potencias (S) | m^4 |

5) Volúmenes y pesos	m^3
6) Pérdidas absolutas (P)	m^3
7) Pérdidas % $\left(\frac{P}{S} 100\right)$	m^{-1}
8) Superficie de refrigeración	m^2
9) Pérdidas por disipar/unidad de superficie 8)	m

Se pone de manifiesto, 4) y 5), que las potencias aumentan en mayor proporción que los pesos. Luego los kVA/kg aumentan con la potencia del transformador. Por lo tanto, su economía.

El resultado 7) justifica el mejor rendimiento de los grandes transformadores.

El punto 9) demuestra la dificultad creciente en refrigerar transformadores al aumentar la potencia.

En la práctica, influyen otros factores en el proyecto de transformadores. A título de ejemplo, se dirá que, cuando la refrigeración está resultando difícil, por el aumento de tamaño, se pasa a otro tipo de ventilación, es decir a otra serie de transformadores que no guardan semejanza. En los grandes transformadores, y a efectos del gálibo máximo permitido por los ferrocarriles, su crecimiento es exclusivamente en longitud. Por lo tanto, las conclusiones se considerarán de mera orientación.

§ 1-7. Otra ejecución de arrollamientos.

Han aparecido transformadores con arrollamientos a base de folio o banda de aluminio. En tal ejecución, el ancho de cada espira es igual al de la bobina. Folio o banda se arrollan conjuntamente con otro folio de material aislante. Se trata de una técnica análoga a la de fabricación de condensadores. Los arrollamientos de alta tensión (secciones reducidas) suelen ser a base de folios, y, frecuentemente, constituidos por varias bobinas en serie. Por el contrario, los de baja tensión a base de banda de aluminio, que suelen tener el ancho de ventana de núcleo. No es económica la ejecución mediante cobre en folios, pero sí cabe cobre en bandas (alta tensión folio de aluminio, baja tensión banda de cobre).

Estos transformadores se construyen a base refrigeración con aceite (o «askarel») o bien en seco. En esta última ejecución los arrollamientos pueden estar aislados e impermeabilizados, mediante una colada con resinas. De esta forma se dispone de un nuevo tipo de transformador especialmente interesante por su total protección frente a la humedad (transformadores con largos períodos fuera de servicio). Los transformadores en seco, folio-resina, son sensiblemente más caros, pero los refrigerados con aceite pueden tener costes parecidos a los clásicos a base de cobre (influye la relativa cotización aluminio-cobre).

Las principales ventajas atribuidas a esta ejecución son:

a) mejor utilización de los aislantes (tensión entre folios uniforme, frente a los arrollamientos a base de espiras que ofrecen tensiones entre dos de ellas iguales al doble de la tensión de capa);

b) más favorable comportamiento frente a cortocircuitos;

c) mejor distribución de tensiones en el ensayo a base de ondas de choque.

CAPÍTULO II

TEORÍA DEL TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE POTENCIA

§ II-1. Corriente de excitación o de vacío en el transformador. Corriente en la bobina de reactancia con núcleo de hierro.

§ II-1.1. CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR SIN PÉRDIDAS.

En el § I-1 se consideró, en primer examen, la bobina de reactancia con núcleo de hierro (figura I-1,1). Seguidamente se vio el transformador en vacío, figura I-1,2a. Nótese que la presencia del secundario (abierto) no motiva alteración alguna en los procesos del primario, ni tampoco en el circuito ferromagnético. Al estar abierto el secundario, y pese a la f.e.m. inducida

$$e_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

no existe corriente ($i_2 = 0$). En consecuencia, tal arrollamiento no aporta fuerza magnetomotriz nueva ($N_2 i_2 = 0$). Por lo tanto, el estudio de la *corriente de vacío, o de excitación*, i_0 , de un transformador es el mismo que el de la corriente de la bobina de reactancia.

En la parte izquierda de la figura II-1,1c, se ha dibujado la característica H - B del material ferromagnético del circuito, figura II-1,1a. En el primer estudio, se supone que el área del ciclo de histéresis es nula. Equivale a admitir que el material carece de pérdidas por histéresis. Interesa observar que la característica $i_0 - \Phi$, correspondiente al circuito magnético, viene dada por la misma curva H - B , usando nuevas escalas. Para ello, basta demostrar las proporcionalidades existentes entre i_0 y H , por un lado, y entre Φ y B , por otro, referidas siempre, al circuito (a). En efecto:

s = sección ferromagnética

del núcleo,

$$B \sim Bs = \Phi$$

[II-1.1]

$$l = \text{longitud de la trayectoria media del flujo,} \quad H \sim Hl = N_1 i_0 \sim i_0 \quad [II-1.2]$$

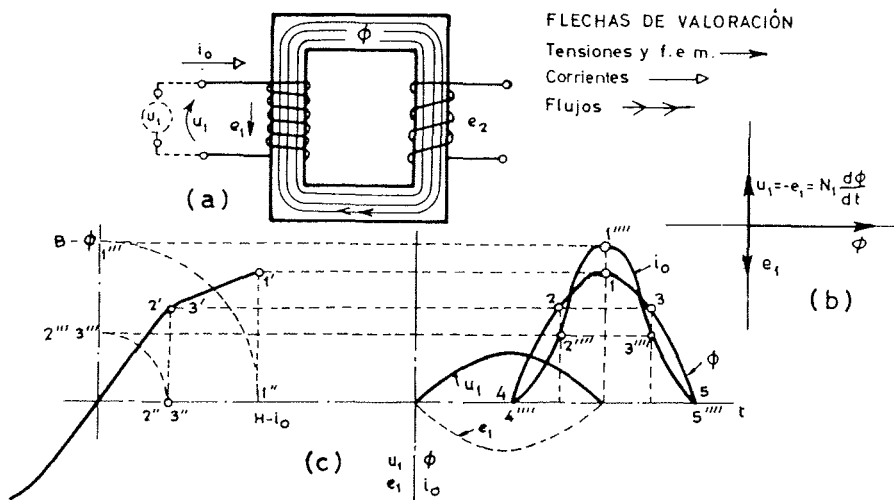


Fig. II-1,1

En la parte derecha de la figura (c), se han dibujado u_1 , e_1 y Φ . Para que resulte más claro, se han trazado, simplemente, semiondas. No precisa gran aclaración, se trata de la representación cartesiana de las magnitudes que, vectorialmente, se han dado en (b), basta recordar:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [II-1.3]$$

$$u_1 + e_1 = 0; \quad u_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [II-1.4]$$

Con lo anterior se está en condiciones de determinar, por puntos, la corriente i_0 . Por ejemplo, el flujo representado por el punto 1 (flujo máximo) requiere, en virtud de la correspondencia $\Phi \dot{=} i_0$, la corriente dada por la abscisa $1''$. Este valor $1''$ se sitúa (como ordenada) en $1'''$, pasando por $1''''$. Análogamente se procede con los puntos 2 y 3 (flujos), a los que corresponden las corrientes $2''''$ y $3''''$, etc.

¹ No es más que la ley de la fuerza magnetomotriz de las corrientes o, si se prefiere, la primera ecuación de MAXWELL.

Por la construcción anterior, aparece la semionda de corriente i_0 , con su característica forma de campana. Reconsidérese el proceso, que es bien simple:

1.º La aplicación (causa) de la f.e.m. senoidal u_1 , requiere que e_1 también tenga el carácter senoidal. Se parte de $u_1 + e_1 = 0$, lo que supone que se estima despreciable la resistencia $R_1 (R_1 i_0 = 0)$.

2.º La exigencia e_1 senoidal implica que Φ también lo sea (senoide atrasada 90° en relación con u_1 , figura II-1,1).

3.º Luego, si Φ ha de tener, necesariamente, naturaleza senoidal, i_0 no podrá serlo, ya que $\Phi - i_0$ tiene una relación no lineal.

Es evidente que, si Φ_m (punto 1) no alcanzara a tener el valor correspondiente al codo de saturación de la característica $\Phi - i_0$, la i_0 sería senoidal, véase figura II-1,2.

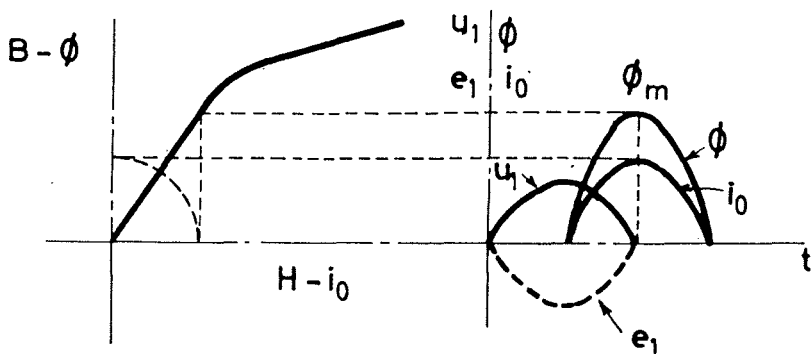


Fig. II-1,2

§ II-1.2. ARMÓNICAS EN LA CORRIENTE DE VACÍO.

En la práctica, razones de economía suelen imponer trabajar con valores de $B(\Phi)$ entrados en el codo de saturación. Por lo tanto, para la corriente de vacío (o de excitación) de los transformadores, hay que contar, en general, con la forma en campana, más o menos acusada.

Examínese la figura II-1,3, en la que se han trazado una semionda, que se toma como fundamental, así como una tercera armónica en determinada posición relativa. Súmense las ordenadas de ambas senoideas y se obtendrá una curva en campana. Desde luego, no puede afirmarse que la curva en cam-

pana de la figura II-1,1 esté integrada, simplemente, por la suma de una senoide fundamental (con el período T de las funciones u_1 , e_1 , Φ) y una tercera armónica. El análisis armónico de tal curva dependerá de la característica

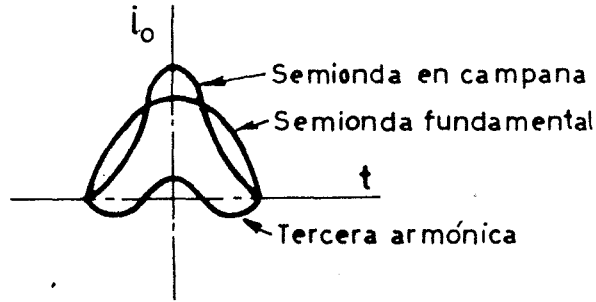


Fig. II-1,3

$H-B$ y de que se trabaje más o menos en la zona de saturación. No obstante, puede admitirse que, si i_0 adopta claramente la forma en campana, su análisis armónico proporcionará una onda fundamental y una tercera armónica, como términos más acusados, sin perjuicio de otras armónicas de orden superior¹.

La prescripción VDE 0532 §49c dice: «La medición de las armónicas de orden superior puede ser objeto de un acuerdo. Por lo general, se limita a la medición de las armónicas 3, 5 y 7.»

A título de orientación, se dan valores, resultantes de análisis, en tantos por ciento, referidos a la onda fundamental:

Tercera armónica	10 ÷ 60 %
Quinta armónica	0 ÷ 30 %
Séptima armónica	0 ÷ 20 %

§ II-1.3. AVANCE DE LA CORRIENTE DE VACÍO EN EL TRANSFORMADOR CON PÉRDIDAS.

Un paso más hacia la realidad lo va a constituir la consideración de un circuito ferromagnético con pérdidas por histéresis.² El método de dibujo por puntos proporciona la semionda i_0 que se ve en la figura II-1,4. La nueva curva puede considerarse como la de la figura II-1,1 con cierta deformación.

¹ En cambio, no existirán armónicas pares, en virtud de la simetría de semionda. Véase *Análisis de Fourier y cálculo operacional aplicados a la electrotecnia*, del mismo autor.

² Por razones didácticas, por el momento se prescinde de las pérdidas por corrientes de Foucault. Tras el estudio del transformador en carga, resulta fácil su consideración. Véase apéndice III-2.

El punto 1'''' no sufre alteración, pero los de la rama ascendente, tal como el 2''', ven aumentadas sus ordenadas. Por el contrario, los de la rama

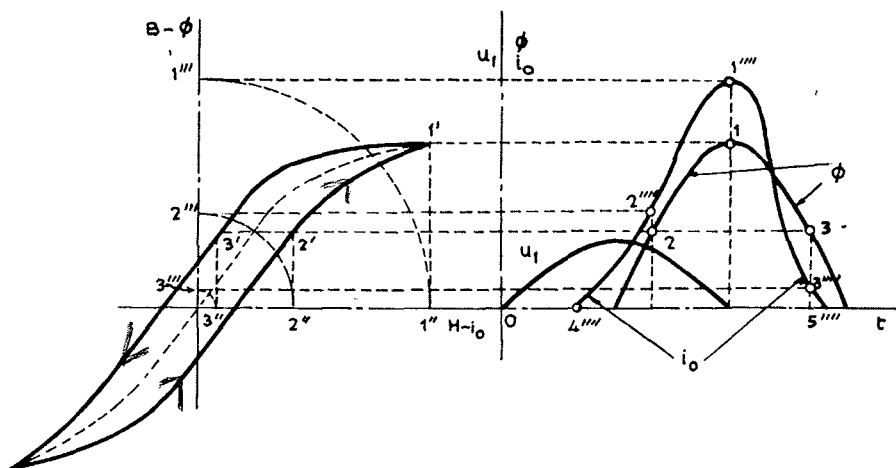


Fig. II-1,4

descendente, tal como el 3''', las ven disminuidas. Esto motiva que la curva en campana se deforme, con dos particularidades:

- a) Pasa a ser asimétrica, en relación con el eje $1 - 1''''$.¹
- b) La deformación equivale a un avance (hacia el origen 0) de la curva i_0 , si bien quedando su valor máximo, $i_{0,m}$, en su lugar.

Es útil representar, en el plano de GAUSS, todas las magnitudes que intervienen. Se hará caso omiso de que i_0 no sea senoidal,² ya que, de otra forma, no admitiría este tipo de representación.

En el diagrama (a), de la figura II-1,5, se ha supuesto el caso, ideal, del transformador en vacío, sin pérdidas en el hierro. El (b) corresponde al caso real. Obsérvese que, en el segundo, I_0 está algo avanzado en relación con Φ . El ángulo φ_0 , aun cuando cercano a 90° , ya no tiene tal valor. Es lógico que así sea, puesto que la potencia absorbida de la red ha de valer

¹ Esto conduce a que, así como en el caso anterior, con adecuada elección de ejes, la función i_0 era par o impar, ahora deja de serlo. Significa que, en el caso anterior admitía desarrollos, según FOURIER, puramente a base de senoides (o de cosenoides) con ángulos de fase inicial nulos, en cambio ahora ya no es posible. Véase *Análisis de Fourier y cálculo operacional aplicados a la electrotecnia*.

Puede observarse que persiste la simetría de semionda.

² Seguidamente se definirá la llamada senoide equivalente a la curva de i_0 no senoidal.

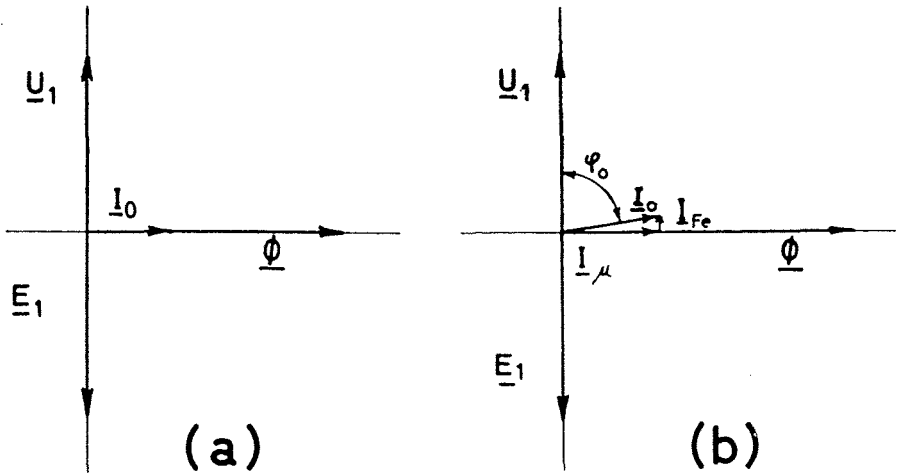


Fig. II-1,5

$U_1 I_0 \cos \varphi_0 = U_1 I_{Fe} =$ pérdidas en el núcleo ferromagnético.

No se olvide que se viene suponiendo $R_1 = 0$ y que, por lo tanto, no existen pérdidas por efecto JOULE.

Queda clara, pues, la razón del avance de I_0 en el transformador con pérdidas por histéresis.

La corriente I_0 se descompone en I_μ e I_{Fe} :

$$I_\mu = \text{componente reactiva de } I_0 = I_0 \sin \varphi_0$$

$$I_{Fe} = \text{componente activa de } I_0 = I_0 \cos \varphi_0$$

Luego las pérdidas en el hierro valen

$$U_1 I_{Fe}$$

Fácilmente se justifican las siguientes denominaciones:

$I_0 =$ corriente de vacío o de excitación del transformador

$I_\mu =$ componente magnetizante

$I_{Fe} =$ componente de pérdidas.

Es conveniente tener idea de órdenes de magnitud de estas corrientes que, evidentemente, dependerán de la calidad de la chapa magnética y de la inducción,

$$B_m = \frac{\Phi_m}{s},$$

con que llegue a trabajarse en el núcleo, en particular de que se alcance, en mayor o menor cuantía, la zona de saturación.

Siendo I_{1n} la *corriente primaria nominal* del transformador, es decir, la *corriente de plena carga*:

- a) En transformadores modernos (chapa de grano orientado, laminada en frío)

$$I_0 = 0,6 \div 8\% I_{1n}$$

$$I_{Fe} = 1 \div 15\% I_0$$

En consecuencia, I_u es del orden de magnitud de I_0 .

- b) En transformadores antiguos (chapa laminada en caliente)

$$I_0 = 4 \div 14\% I_{1n}$$

$$I_{Fe} = 5 \div 14\% I_0$$

§ II-1.4. SENOIDE EQUIVALENTE A LA CURVA DE LA CORRIENTE DE VACÍO.

Se ha visto la conveniencia de considerar a i_0 como de naturaleza senoidal. Ello implica la necesidad de definir, unívocamente, la senoide, que, convencionalmente, va a sustituir a la curva real (i_0). Ciertamente, tal *senoide equivalente* no lo será a todos los efectos, pero sí, para buen número de consideraciones y estudios, con aproximación suficiente.

Se conviene en adoptar, como senoide equivalente, aquella que¹:

1.º tenga el mismo valor eficaz (I_0) que la curva real de la corriente de vacío,

2.º posea una componente activa ($I_{0, \text{act}} = I_{Fe}$) que justifique las pérdidas en el núcleo.

Está claro que la primera condición determina el módulo del vector I_0 (figura II-1,5b). Tal dato lo proporciona el amperímetro² de la figura II-1,6.

¹ Caben otros convenios. Por ejemplo, podría adoptarse, como senoide equivalente, la correspondiente a la onda fundamental de i_0 . La práctica demuestra que la convención que se elige es de mayor utilidad.

² Recuérdese que los amperímetros de hierro móvil (y los electrodinamométricos) proporcionan, al medir corrientes periódicas, incluso no senoidales, valores eficaces.

La segunda, al establecer $I_{0, \text{act}}$, da la posición (argumento) del vector I_0 , en relación con la tensión aplicada U_1 . $I_{0, \text{act}}$, (I_{Fe}), se obtiene por la lectura del vatímetro ($U_1 I_{Fe}$) de la figura II-1,6.

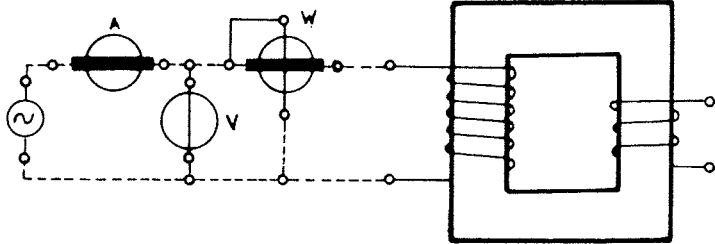


Fig. II-1,6

Con el fin de justificar la elección de senoide equivalente, se señala que los valores determinantes (I_0 , I_{Fe}) son proporcionados, de forma simple, por los aparatos de medida de la figura II-1,6. Además, cuando se considere la resistencia del primario (R_1), y con ella las pérdidas por efecto JOULE, resultará que, tales pérdidas, vendrán proporcionadas por $R_1 I_0^2$. Este no sería el caso si se hubiese adoptado la convención indicada en la nota¹ del pie de la página precedente.

§ II-1.5. EJERCICIOS.

Basándose, principalmente, en las ecuaciones [I-1.2] y [I-1.3], razone el lector lo siguiente, con referencia a un transformador previsto para unas tensiones concretas:

- i. Si se disminuyen los números de espiras N_1 y N_2 (en la misma proporción para mantener r_t), aumentan las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el núcleo, la corriente de vacío es mayor y está más deformada.
- ii. Si se disminuye la sección en hierro (o útil) del núcleo, también aumentan sus pérdidas y la corriente de vacío.
- iii. En consecuencia, transformadores con pocas pérdidas en el hierro y con corrientes de vacío bajas (con poco contenido en armónicas) son unidades pesadas y caras.
- iiii. Si un transformador se utiliza aplicando a su primario mayor tensión que la prevista, aumentan las pérdidas en el hierro, la corriente de vacío y su contenido en armónicas.
- iiiii. Si a un transformador (o bobina de reactancia) se le aplica una tensión alterna de mayor frecuencia (sin aumentar su valor eficaz, luego tampoco el máximo), su inducción disminuirá en proporción inversa a la frecuencia, véase la ecuación [I-1.3]. Por lo tanto disminuirán las pérdidas en el hierro (puede admitirse que las pérdidas por histéresis varían según $k_1 f B_m^2$ y las debidas a corrientes parásitas según $k_2 f^2 B_m^2$), la corriente de vacío y su contenido en armónicas.

Ejemplos

Se dispone de un transformador monofásico 6 000/380 V, 50 Hz. La sección del núcleo es 170×170 mm, y el factor de relleno 0,92. El primario tiene 750 espiras. Las pérdidas en el hierro son 400 W.

La inducción es [I-1.3]

$$B_m \approx \frac{6\,000}{4,44 \cdot 50 \cdot 750,0172,0,92} = 1,35 \text{ Tesla} = 13\,500 \text{ Gauss}$$

Si se alimentara a 6 300 V (+ 5%), la inducción aumentaría en igual proporción y admitiendo que las pérdidas totales en el hierro crezcan con el cuadrado de B_m , las nuevas pérdidas serían 442 W. Por supuesto que la tensión secundaria sería 399 V.

Si se sustituye el arrollamiento primario por otro con 800 espiras y se sigue alimentando con 6 300 V,

$$B_m = 1,33 \text{ Tesla}$$

$$\text{Pérdidas en el núcleo} = 388 \text{ W}$$

Finalmente, si el transformador original vuelve a alimentarse a 6 000 V, pero con una frecuencia de 60 Hz (como es normal en U.S.A.), la inducción máxima pasa a ser

$$B_m = 1,35 \frac{50}{60} = 1,12 \text{ Tesla}$$

§ II-2. Diagrama vectorial del transformador en vacío: resistencia y reactancia de dispersión en el primario, ensayo del transformador en vacío.

Otro paso hacia el transformador real es la consideración de la resistencia no nula (R_1) del arrollamiento primario, y del flujo de dispersión. También el secundario posee resistencia (R_2), mas como se estudia el transformador en vacío, su existencia no tiene efecto alguno, $e_2 = u_2$.

§ II-2.1. PRIMARIO CON RESISTENCIA R_1 .

Con la consideración de la resistencia R_1 , la ecuación [II-1.4] pasa a ser

$$u_1 - i_0 R_1 + e_1 = 0 \quad ; \quad u_1 = i_0 R_1 - e_1 \quad \text{[II-2.1]}$$

Pero la ecuación [II-1.3] persiste

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{[II-2.2]}$$

Dibujando R_1 , simbólicamente, separada de la bobina primaria, queda

claro el esquema de la figura II-2,1, y su correspondiente diagrama vectorial. No presenta más novedad que la diferenciación de \underline{U}_1 en relación con $-\underline{E}_1$.

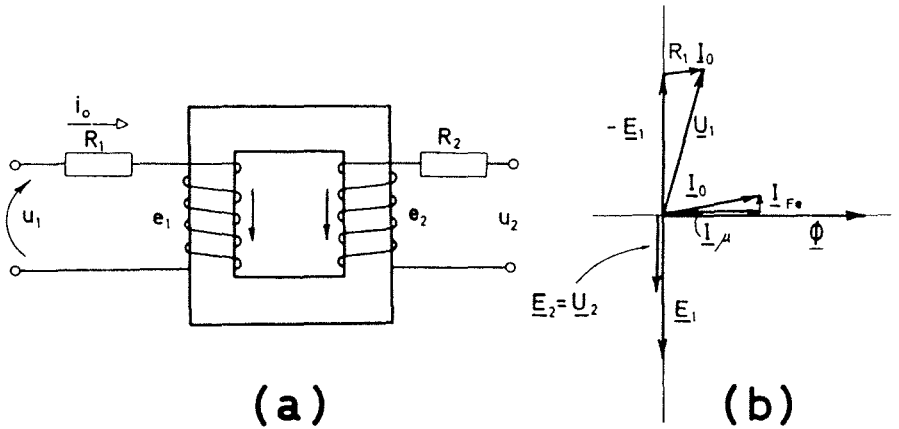


Fig. II-2,1

§ II-2.2. FLUJO DE DISPERSIÓN DEL PRIMARIO.

En la primera visión del transformador, dada en el § I-1, se supuso que todo el flujo originado por el primario era «conducido» por el circuito ferromagnético (se establecía totalmente en el circuito), o sea que concatenaba con el secundario. La realidad es que existe un pequeño *flujo de dispersión*, Φ_{d1} . En la figura II-2,2a, se representa por dos de sus líneas. Siendo Φ el flujo totalmente «guiado» (*principal, común o útil*), y Φ_1 el total creado por el primario, resulta

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{d1} \quad [\text{II-2.3}]$$

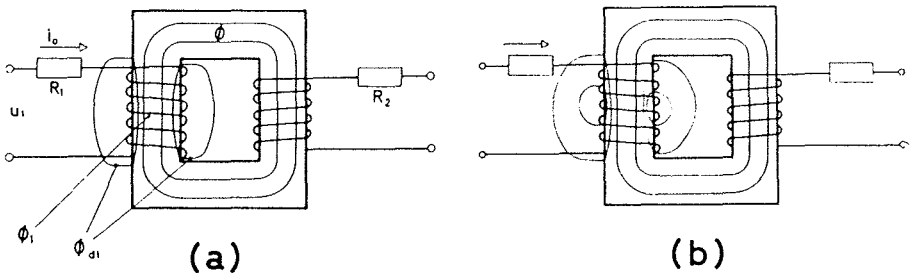


Fig. II-2,2

Si se desea profundizar más la cuestión, deberá observarse que el flujo de dispersión no concatena, igualmente, a todas las N_1 espiras. En la figura II-2,2b se ha representado flujo

en tales condiciones. Existen líneas que concatenan un número limitado de espiras. Sea Φ'_{d1} el flujo de dispersión que concatena a N' espiras del primario, Φ''_{d1} el que concatena a N'' espiras, etc. Escríbase

$$\sum \Phi'_{d1} N^{(i)} = N_1 \Phi_{d1}$$

Así queda definido un flujo ficticio de dispersión Φ_{d1} (del primario) que, idealmente, concatena a la totalidad de las N_1 espiras. Es el flujo Φ_{d1} a que se alude en [II-2,3], y que se representa en la figura II-2,2a. Esta será la figura de referencia, que se corresponderá con nuestros conceptos y ecuaciones.

En estas condiciones, el flujo abarcado por el primario ($\Phi + \Phi_{d1}$) no es el mismo que el concatenado por el secundario (Φ). Esto introduce una complicación, la idea del flujo común era simple y práctica. Con la finalidad de conservar tal idea, el flujo común (Φ) y el de dispersión Φ_{d1} se van a representar separadamente, según la figura II-2,3a. Para ello imagínese:

1.º Que la bobina primaria, hasta ahora considerada, carece de flujo de dispersión. No produce más flujo que el Φ , que transcurre (se establece) íntegramente por el circuito ferromagnético.

2.º Que en serie con la anterior, existe otra bobina, con el mismo número de espiras¹ que la principal, dimensionada de tal forma que produce, al circular una corriente (por ejemplo i_0), el mismo flujo (Φ_{d1}), que tal corriente producía en la principal (figura II-2,2a), en concepto de flujo de dispersión.

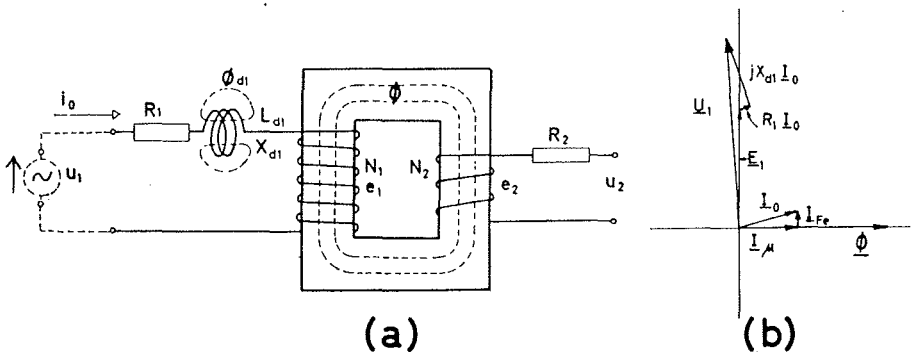


Fig. II-2,3

El flujo de dispersión se establece en los conductores, y en los dieléctricos sólidos, líquidos y gaseosos. En los transformadores en seco, en gran parte, en el aire. Todos ellos son materiales no ferromagnéticos. Como habrá que aludir frecuentemente a ello, por brevedad

¹ Esta hipótesis, referente al número de espiras, no es indispensable, pero sí útil desde el punto de vista didáctico.

se dirá que el flujo de dispersión «pasa por el aire». La reluctancia correspondiente a su camino es casi constante. En efecto, se compone de la reluctancia correspondiente al trecho por el aire, más la del trecho en el núcleo. La última (variable) despreciable frente a la primera (constante). Por otro lado, la participación del flujo de dispersión en las pérdidas en el hierro del transformador es muy pequeña (frente a las que origina el flujo principal). Por estas razones, es lícito adoptar una bobina en el aire para idealizar, separadamente, el flujo de dispersión.

Vista la idea anterior, no debe omitirse señalar que una parte del «camino» (asiento) de ciertas líneas de dispersión es la caja, lo que no cambia, esencialmente, los conceptos.

Está claro que los circuitos primarios de las figuras II-2,2a y II-2,3a, son equivalentes, ya que corresponden a las ecuaciones:

$$\text{Figura II-2,2a} \quad u_1 - N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = i_0 R_1 ;$$

$$\text{Figura II-2,3a} \quad u_1 - N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_0 R_1 \quad [\text{II-2.4}]$$

Además, tal separación aporta la ventaja de poner en evidencia que el flujo (Φ) se refiere a un circuito ferromagnético ($\mu \neq \text{Cte}$, $R_m \neq \text{Cte}$, $L \neq \text{Cte}$), mientras que Φ_{d1} puede considerarse, prácticamente, con circuito no ferromagnético. Por ello, a la bobina representativa del flujo de dispersión se le puede asignar una L_{d1} constante, definida por

$$- N_1 \frac{d\Phi_{d1}}{dt} = - L_{d1} \frac{di_0}{dt}$$

En consecuencia, posee una reactancia, también constante, X_{d1} . Luego, la ecuación [II-2.4] podrá escribirse:

$$u_1 - L_{d1} \frac{di_0}{dt} - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_0 R_1 ;$$

$$u_1 - i_0 R_1 - L_{d1} \frac{di_0}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{II-2.5}]$$

O, en términos vectoriales,

$$\underline{U}_1 - I_0 R - I_0 j X_{d1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{II-2.6}]$$

Como se venía haciendo, cuando no se considera el flujo de dispersión, la f.e.m. inducida en el primario por el flujo común (Φ), se seguirá designando por E_1 . Así resulta:

$$E_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\underline{U}_1 = - \underline{E}_1 + \underline{I}_0 R_1 + \underline{I}_0 j X_{d1} \quad [\text{II-2.7}]$$

Ecuación que se ha representado en el diagrama vectorial (transformador en vacío) de la figura II-2,3b.

§ II-2.3. INTERÉS PRÁCTICO DEL ENSAYO DEL TRANSFORMADOR EN VACÍO.

Se empezará por distinguir entre *relación de transformación nominal* r_{tn} [I-1.6], y *relación de transformación por espiras* r_{te} , definidas:

$$r_{tn} = \frac{U_{1n}}{U_{2, \text{vacío}}} \quad [\text{II-2.8}]$$

$$r_{te} = \frac{N_1}{N_2} \quad [\text{II-2.9}]$$

Cuando no interese la distinción entre r_{tn} y r_{te} , por ser, en la práctica, valores muy parecidos, se escribirá, simplemente, r_t , *relación de transformación*.

Los resultados de interés, que proporciona el ensayo del transformador en vacío, son:

1.º relación de transformación $r_{tn} = \frac{U_{1n}}{U_{2, \text{vacío}}} \approx \frac{N_1}{N_2} = r_{te}$;

2.º pérdidas en el hierro (núcleo);

3.º corriente de vacío I_0 .

Se van a examinar cada uno de estos puntos.

El diagrama vectorial del transformador en vacío es el de la figura II-2,3b. En la práctica, R_1 y X_{d1} tienen valores pequeños, como también I_0 . Por lo tanto, los productos $X_{d1} I_0$ y $R_1 I_0$ lo son, resultando despreciables frente a U_1 .

Para tener idea del orden de magnitud de las caídas $R_1 I_0$ y $X_{d1} I_0$, se indicará que suelen valer entre 0,01 % y 0,1 % U_1 . En consecuencia, con buena aproximación, puede aceptarse $U_1 = E_1$.

Lo anterior justifica que, en lugar de aquel diagrama vectorial, se emplee, con ventaja, el simplificado de la figura II-2,4. En éste, además de las magnitudes correspondientes al primario ($U_1, E_1, I_0, I_\mu, I_{Fe}$), se han trazado los vectores relativos al secundario:

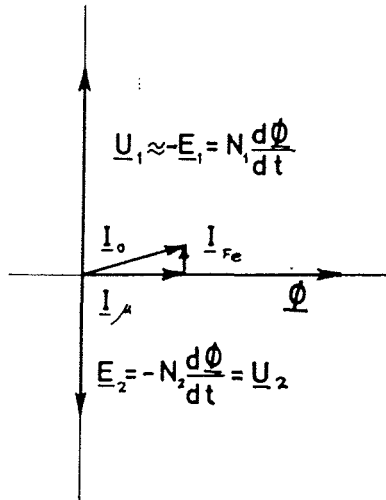


Fig. II-2,4

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}; E_2 = U_2$$

Las lecturas de U_{1n} y $U_{2, \text{vacío}}$, facilitan, por definición,

$$r_{tn} = \frac{U_{1n}}{U_{2, \text{vacío}}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = r_{te} = r_t$$

En el ensayo en vacío, las pérdidas por efecto JOULE son despreciables, frente a las pérdidas en el hierro. Las pérdidas JOULE en el secundario no existen ($I_2 = 0$). En el primario, $R_1 I_0^2$ son muy reducidas, en virtud de la pequeñez de I_0 (frente a I_1).

Para tener órdenes de magnitud, se va a proceder a un cálculo simple. Supóngase un transformador con rendimiento 98% (a plena carga y $\cos \varphi = 1$)

pérdidas totales en carga.....	2%
pérdidas en el cobre a plena carga, $R I_{1n}^2$	1,6%

pérdidas en el hierro¹..... 0,4%
 corriente de vacío $I_0 = 0,01 I_{1n}$ ²
 pérdidas en el cobre, con transformador
 en vacío, $R_1 I_0^2 = R_1 I_{1n}^2 \cdot 0,01^2 = 0,00008 \%$,

evidentemente despreciables.

En el ensayo en vacío (figura II-1,6), el vatímetro no mide, prácticamente, más que pérdidas en el hierro. Al estudiar el transformador en carga (§ II-3.2), se verá que las pérdidas en el hierro son sensiblemente constantes, cualquiera que sea la carga (vacío, media carga, plena carga). En resumen, *el ensayo de vacío proporciona las pérdidas en el hierro.*

El tercer punto no precisa aclaración, la corriente de vacío ha sido suficientemente estudiada en el § II-1.

El lector fácilmente razonará en relación con los errores que pueden introducir tensiones de ensayo U_1 que no correspondan a los supuestos teóricos. Por tal motivo, las normas VDE 0532 §42 estipulan:

c) Las tensiones de prueba han de cumplir las siguientes condiciones:

1. Los valores instantáneos de la tensión de prueba no pueden discrepar, en relación con la curva fundamental senoidal, en más del 5% del valor de cresta de tal senoide fundamental.

2. (Al tratarse de transformadores trifásicos). Los sistemas inverso y homopolar no han de tener valores, cada uno, que supere el 5% del sistema directo.

§ II-3. Transformador en carga.

§ II-3.1. CONVENIOS RELATIVOS A LOS SENTIDOS.

Con el fin de evitar confusiones en la interpretación de sentidos, y ya ejercitados con el diagrama vectorial en vacío, se van a establecer unos convenios de clara aplicación. No son más que extensión, al caso de dos bobinas, de los que ya se han usado, para el de una bobina, en la figura II-1,1a.

¹ Las pérdidas en el cobre, en la marcha a plena carga del transformador, suelen ser mayores que las del hierro. Aquí, para el tanteo, se ha supuesto

$$\frac{\text{pérdidas cobre}}{\text{pérdidas hierro}} = 4$$

El valor de esta relación, se examina más a fondo en el § II-8.

² Véanse los valores usuales de I_0 , dados en § II-1.3.

Estos convenios no han de costar esfuerzo, y se insiste en su interés ya que, si en el transformador monofásico la intuición, regularmente, supliría a la sistematización, en los casos de transformaciones polifásicas y especiales la interpretación acabaría siendo un verdadero problema, o se haría en precario.

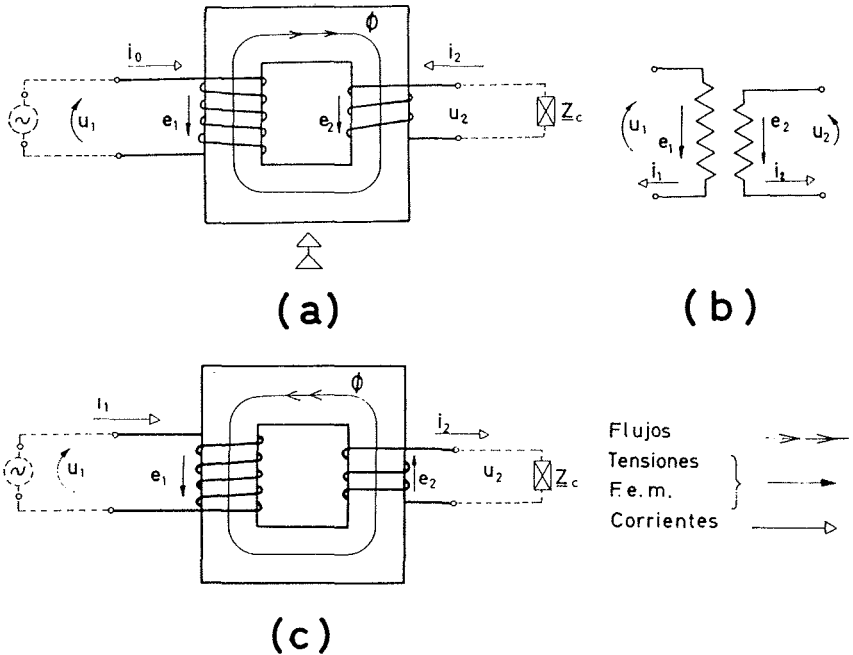


Fig. II-3,1

Se proponen, pues, los siguientes convenios¹ (figuras II-3,1a ó c):

1.º Se adoptará un sentido positivo para el flujo (\rightarrow), arbitrariamente elegido.

2.º Para las fuerzas electromotrices (tanto primaria como secundaria e_1 y e_2) se tomarán como sentidos positivos (\rightarrow), precisamente los que se corresponden según la regla del sacacorchos con el sentido positivo del flujo (\rightarrow)². Añádase que u_1 se considerará f.e.m. (la aplicada al primario).

¹ Simplemente resultan de respetar los convenios sobre sentidos (flechas de valoración) establecidos en *Teoría de circuitos, fundamentos* [§ II-15 y § II-16] del mismo autor.

² Tiene por finalidad mantener la ley de inducción de FARADAY en la forma

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

3.º Se adoptarán como sentidos positivos para las corrientes ($-\triangleright$), primaria y secundaria, los mismos que para las fuerzas electromotrices.

Para quien crea conveniente practicarse con tales convenios, se ha dispuesto la figura II-3,2, con los diagramas vectorial y cartesiano del transformador en vacío ($I_0 \approx 0$).

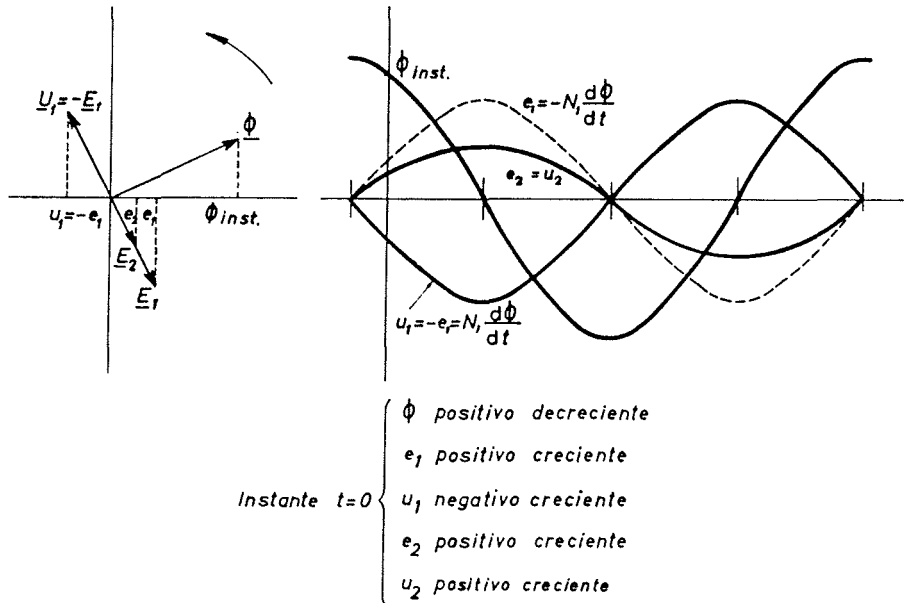


Fig. II-3,2

Los convenios anteriores son aplicables en todos los casos (primario y secundario con los mismos sentidos de arrollamiento o no, y sobre la misma columna o diferentes, véase figura II-3,1c). No obstante, se recomienda adoptar una figura tipo, o de referencia, que puede ser la (a). Los devanados, vistos desde abajo (\uparrow), están arrollados con sentidos opuestos.

Cuando no interese el detalle de los sentidos de arrollamiento, ni tampoco considerar el flujo, la figura de referencia puede simplificarse, representándola según (b), pero, si nada en contra se dice, conservarán validez los convenios expuestos.

§ II-3.2. PROCESOS FÍSICOS EN EL TRANSFORMADOR IDEAL EN CARGA.

En la figura II-3,3 se ha representado el *transformador en carga*, es decir, el transformador al que, estando en tensión, se ha dispuesto una impedancia Z_c (que aquí se admite lineal) en el secundario. De entrada, y para simplificar,

supónganse $R_1 = 0$ y $X_{d1} = 0$, es decir, $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$. Es necesario ver con claridad los procesos físicos que la existencia de i_2 acarrea:

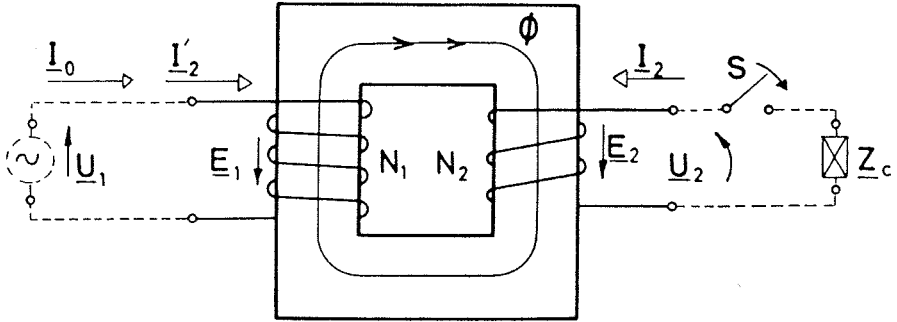


Fig. II-3,3

- Por el secundario circulará, motivada por \underline{U}_2 , una corriente alterna \underline{I}_2 .
- Ello significa que, sobre el circuito magnético, actúa una nueva fuerza magnetomotriz (excitación) $N_2 i_2$. En el transformador en vacío, o sea antes de cerrar el interruptor S , no existía más que la f.m.m. $N_1 i_0$.
- En principio, si la excitación de vacío, $N_1 i_0$, originaba el flujo alterno Φ , la presencia de la nueva f.m.m., $N_2 i_2$, tenderá a alterar este flujo. Para fijar ideas, supóngase que lo disminuye.¹
- Admitido lo anterior, la

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

sufriría una disminución, en la misma proporción con que disminuyera Φ .

- Se ha supuesto $R_1 = 0$ y $X_{d1} = 0$, lo que significa que no hay caídas de tensión en el primario, o sea $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1$. Y como sea que \underline{U}_1 no sufre alteración (tensión que proporciona la compañía suministradora de fluido) por el hecho de que el transformador esté en carga, resulta que, contrariamente a lo admitido en d), \underline{E}_1 no puede disminuir. Esto entraña que, en contra de lo supuesto en c), no puede haber disminución de Φ .

¹ En el § II-11, con mayor conocimiento, se analizará más a fondo y se verá que, según la naturaleza de \underline{Z}_c (inductiva o capacitiva), el flujo Φ tiende a ser disminuido o a ser aumentado. Lo que ya desde este momento está claro es que $N_2 i_2$ altera el flujo creado por $N_1 i_0$. Nos basta esto, si se supone que tiende a disminuirlo es, meramente, para fijar ideas.

f) La aparente contradicción desaparece, si se admite que en el primario aparece una corriente suplementaria I'_2 (i'_2), o sea una corriente que se superpone a la I_0 (i_0). En efecto, esta corriente aporta una nueva f.m.m., $N_1 i'_2$.

Para que el flujo Φ no resulte alterado, según exige e), bastará que, cuantitativamente, se verifique

$$N_1 i'_2 = N_2 i_2, \quad [\text{II-3.1}]$$

y que tales nuevas fuerzas magnetomotrices, actuantes sobre el núcleo, tengan efectos opuestos, es decir, se compensen. En virtud de los convenios de signos en la figura base II-3,1, la corriente de carga i_2 motiva, en el primario, una corriente suplementaria.

$$i'_2 = - \frac{i_2}{r_t} \quad [\text{II-3.2}]$$

Por lo tanto, la corriente del primario, en el transformador en carga, vale

$$i_1 = i_0 + i'_2 \quad [\text{II-3.3}]$$

No puede sorprender que la puesta en carga del transformador (cierre de S, aparición de i_2), motive una alteración en el régimen de trabajo del primario. El principio de la conservación de la energía hacía prever que la cesión de una potencia por el secundario, $U_2 I_2 \cos \varphi_2$, iba a implicar una alteración del régimen del primario, en el sentido de absorber una potencia suplementaria equivalente, procedente de la compañía.

Resumen de los fenómenos principales motivados por la puesta en carga (i_2) del transformador monofásico ideal ($R_1 = 0$, $X_{1d} = 0$):

1.º) En régimen de carga², el flujo Φ es prácticamente el mismo que en vacío, por la razón primaria

$$u_1 \approx - e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Esto suele expresarse diciendo:

La tensión aplicada U_1 (que se supone constante, la nominal del transformador) impone el valor del flujo Φ , cualquiera que sea la carga (plena, media, vacío).²

¹ Se recuerda que existen r_{tn} y r_{te} , en la práctica con valores muy parecidos, de ahí que suelen confundirse en r_t . Aquí, en rigor, se trata de r_{te} .

² Entiéndase cualquiera que sea la carga Z_o . Más adelante se aclararán las expresiones *plena carga, media carga, etc.*

2.º) En el establecimiento del flujo intervienen las f.m.m. $N_1 i_1$ y $N_2 i_2$, supóngase que la reluctancia R_m es constante¹

$$\left. \begin{array}{l} \text{en carga} \quad F_m = N_1 i_1 + N_2 i_2 = R_m \Phi_{\text{carga}} \\ \text{en vacío} \quad F_m = N_1 i_0 = R_m \Phi_{\text{vacío}} \end{array} \right\} \Phi_{\text{carga}} \approx \Phi_{\text{vacío}}$$

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 \left(i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) = N_1 i_0$$

$$i_1 = i_0 - \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_0 + i'_2$$

En otras palabras, cualquiera que sea el régimen de carga, la suma de las f.m.m. del primario y del secundario es igual a la f.m.m. en vacío. En expresión vectorial:

$$-I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = I_2 \frac{1}{r_t}$$

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

[II-3.4]

Nótese que, hasta el momento, los subíndices 2 eran característicos del secundario. Y seguirá siendo así, con la excepción de i'_2 , que es una corriente suplementaria del primario. En el § II-4 se dará la razón de esta designación.

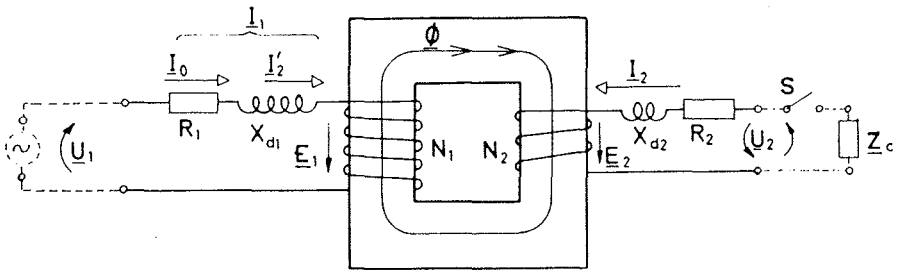


Fig. II-3,4

§ II-3.3. PROCESOS FÍSICOS EN EL TRANSFORMADOR REAL EN CARGA.

Previo a examinar el diagrama vectorial del transformador en carga, conviene reconsiderar los procesos anteriores, a base del transformador real ($R_1 \neq 0$, $X_{d1} \neq 0$), figura II-3,4.

¹ Esta suposición no es necesaria, pero el principiante razonará con mayor sencillez si así supone. Este sería el caso de transformadores en los que no se llegara a la saturación.

α) Antes de la inserción del interruptor S, sobre el circuito magnético no existe más que la f.m.m. $N_1 i_0$.

β) Al *dar carga* al secundario, se aporta la nueva f.m.m. $N_2 i_2$, que tiende a alterar al flujo Φ . Supóngase que lo disminuye (véase § II-11).

γ) La supuesta disminución del flujo Φ , ocasiona que disminuya e_1 ,

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

δ) La ecuación del circuito primario era (antes de la inserción, *régimen de vacío*),

$$I_0 = \frac{U_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{R_1 + j X_{d1}}$$

Con la entrada en efecto de la carga, $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ha sufrido variación (γ), no así U_1 que es la tensión de la compañía. Luego, la corriente de vacío I_0 queda alterada, por haber variado la diferencia $U_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt}$. La nueva corriente (*de carga*) se designará por I_1 . Siempre es posible descomponerla en dos sumandos

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

ϵ) En los transformadores que usa la industria, y dentro de los regímenes de carga que emplea, las caídas de tensión en vacío ($I_0 R_1$ e $I_0 X_{d1}$) son muy pequeñas (por ejemplo, del orden de 0,002 % a 0,06 % de U_1 , véase § II-2.3). En régimen de carga, aunque mayores, siguen siendo pequeñas (por ejemplo, a plena carga, 0,2 % a 6 % U_1 , véase § II-1.3, $I_0 \approx 0,01 I_{1n}$). De ahí se deduce que E_1 , aun cuando disminuida (suposición en γ), sigue teniendo un valor análogo a U_1 .

La conclusión es que, en carga, el flujo Φ tiene casi el mismo valor que en vacío, por la razón primaria

$$N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -E_1 \approx U_1$$

Otra consecuencia es que las pérdidas en el hierro (núcleo del transformador) son, prácticamente, constantes desde el régimen de vacío hasta el de plena carga. En efecto, tales pérdidas son función de

$$B = \frac{\Phi}{s},$$

y se ha visto que Φ varía poco con el régimen de carga.

§ II-3.4. DIAGRAMA VECTORIAL DEL TRANSFORMADOR EN CARGA.

En el § II-2.2. se examinó, con detalle, el flujo de dispersión del primario (véanse figuras II-2,2 y II-2,3). No así el flujo de dispersión del secundario. El proceder fue lógico, el último no existe en el funcionamiento del transformador en vacío ($i_2 = 0$), pues el secundario no ocasiona flujos de ninguna clase. Este arrollamiento no hace más que acto de presencia, es asiento de e_2 , pero no influye en los restantes procesos.

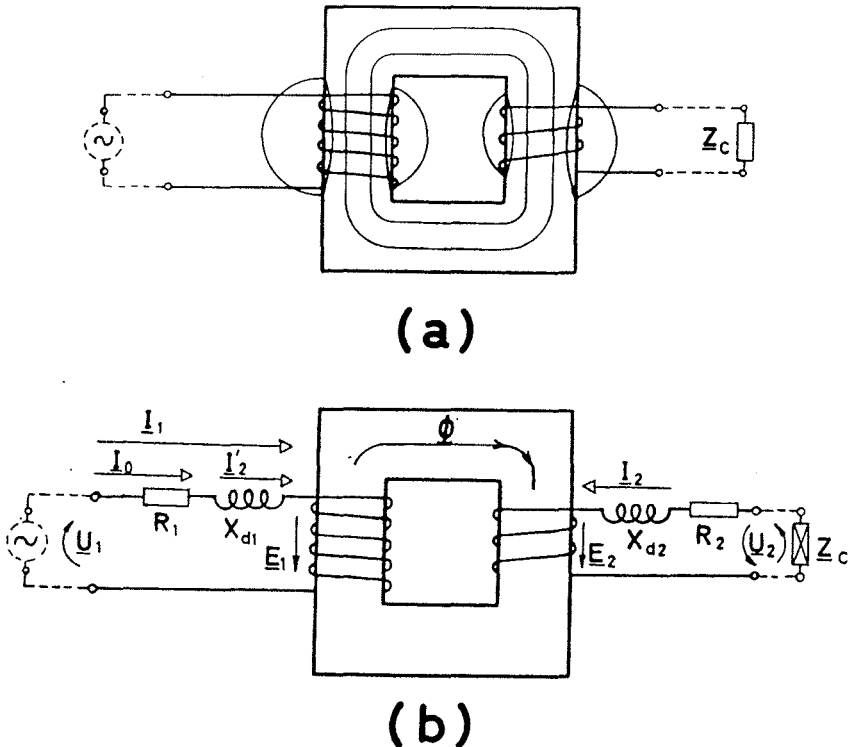


Fig. II-3,5

En el régimen en carga (figura II-3,5a) la corriente i_2 , además de contribuir en el flujo común (contribuyen $N_2 i_2$, $N_1 i_0$, $N_1 i'_2$), crea un *flujo de dispersión del secundario*, Φ_{d2} . Por un proceso mental análogo al seguido en el caso del flujo de dispersión del primario, el flujo de dispersión del secundario se sustituirá por una bobina ideal X_{d2} (figura II-3,5b). Lo que se persigue es conseguir lo que ya se logró con el flujo de dispersión del primario. Se desea imaginar que el circuito magnético no tiene más que flujo común (Φ) a primario y secundario.

Como ejercicio, y por ser de utilidad, razone el lector que X_{d2} es, prácticamente, constante (como lo era X_{d1}). Bastará que observe, en la figura (a), que buena parte del asiento de Φ_{d2} es el aire.

Es a base del esquema (b) que suele trabajar el ingeniero. Las ecuaciones relativas a esta concepción son:

Corrientes
$$I_1 = I_0 + I'_2 = I_0 - I_2 \frac{1}{r_t} = I_0 - I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad \text{[II-3.5]}$$

Tensiones primarias
$$\begin{cases} \underline{U}_1 - I_1 R_1 - I_1 j X_{d1} + E_1 = 0 \\ \underline{U}_1 = -E_1 + I_1 R_1 + I_1 j X_{d1} \end{cases} \quad \text{[II-3.6]}$$

Tensiones secundarias
$$\begin{cases} E_2 - I_2 R_2 - I_2 j X_{d2} = I_2 Z_c = \underline{U}_2 \\ E_2 = I_2 R_2 + I_2 j X_{d2} + \underline{U}_2 \end{cases} \quad \text{[II-3.7]}$$

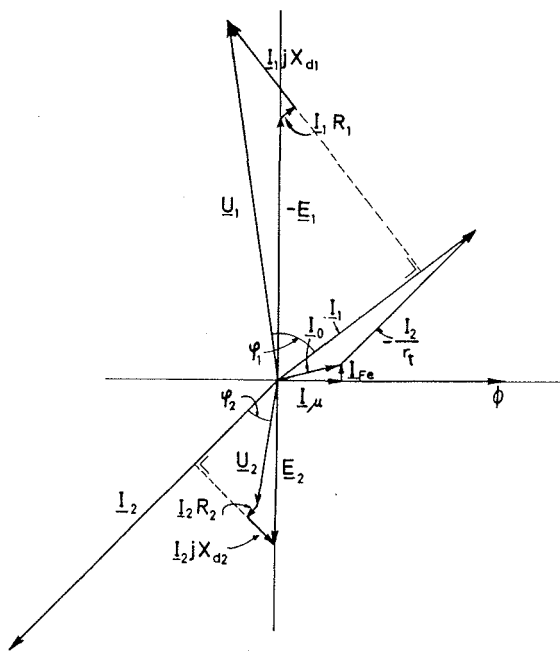


Fig. II-3,6

A estas ecuaciones responde el diagrama vectorial de la figura II-3,6.

En relación con los valores prácticos usuales en transformadores industriales, se han dibujado exageradamente grandes, para mayor claridad de la figura, los módulos de I_0 , $I_1 R_1$, $I_2 R_2$, $j I_1 X_{d1}$ y $j I_2 X_{d2}$.

Aun cuando fácilmente se deducen de las ecuaciones [II-3.6] y [II-3.7], por ser de uso se van a dar otras en las que figure el flujo principal Φ :

$$\begin{cases} U_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = I_1 R_1 + I_1 j X_{d1} \\ U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} + I_1 R_1 + I_1 j X_{d1} \end{cases} \quad \text{[II-3.8]}$$

$$U_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} - I_2 R_2 - I_2 j X_{d2} \quad \text{[II-3.9]}$$

§ II-3.5. OBSERVACIONES.

Las observaciones que siguen, si bien obvias, sirven para rectificar afirmaciones anteriores, excesivamente simplistas.

1.^a En el § I-1 se dijo $U_1 I_1 \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Realmente, $U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \text{pérdidas}$.

Sobre pérdidas véanse § II-8 y § II-9, así como el apéndice III.

2.^a También se dijo $\varphi_1 \approx \varphi_2$. Esto será relativamente aceptable si $I_0 \ll I_2$, y si, además, las caídas de tensión son pequeñas ($R_1 I_1$, $X_{d1} I_1$, $R_2 I_2$, $X_{d2} I_2$).

3.^a Finalmente, puede observarse que

$$\frac{U_1}{U_2} \approx r_t$$

es aceptable tratándose de cargas pequeñas, y que

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{r_t}$$

lo es tratándose de cargas elevadas ($I_1 \gg I_0$).

§ II-3.6. NUEVA VISIÓN DE LOS FLUJOS DE DISPERSIÓN EN LOS TRANSFORMADORES EN CARGA.

Puede omitirse esta lectura.

Para una mejor visión física de los flujos de dispersión, nuevamente se considera el fenómeno. En la figura II-3,7 se representa un transformador en carga, a base de arrollamientos concéntricos. Los flujos de dispersión se superpondrán dando nuevas configuraciones (en la figura II-3,5 se vio el caso de arrollamientos separados). De acuerdo con el § II-3.2, los amperivoltas del primario (I) y los del secundario (II) son prácticamente iguales y opuestos.

El flujo común sería nulo, a no ser por el efecto de la corriente de vacío i_0 . Ha de interpretarse la figura a base de prescindir de tal corriente. Se han trazado los gráficos de H (A/m) como si se tratara de solenoides infinitos. Esto da, con suficiente aproximación, los gráficos que corresponden a la sección central de los arrollamientos.

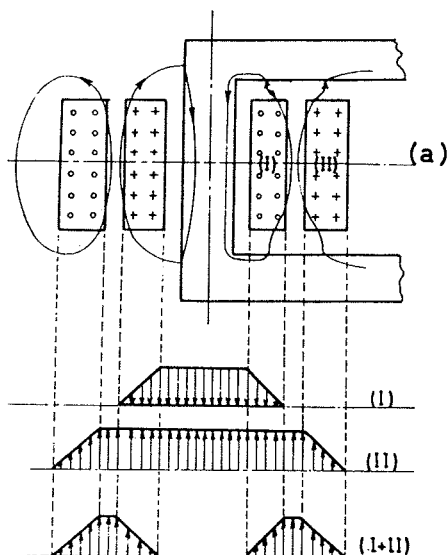


Fig. II-3,7

En la parte inferior (I + II) se han superpuesto los campos, dados por sus vectores H . Este campo final es el productor de los flujos de dispersión. Puede imaginarse como creado por el manguito de fuerzas magnetomotrices que se aprecia en (a). Se han dibujado muy pocas líneas, con cierta impropiedad, a fin de que pueda apreciarse su marcha por los caminos ferromagnéticos.

Como buena parte de los trayectos son a través de elementos no ferromagnéticos, habrá proporcionalidad entre las corrientes de carga (I_1 , I_2) y el flujo Φ_d . Sin embargo, los flujos de dispersión buscan, como es lógico, los caminos ferromagnéticos. Los externos, en particular, pasan por la caja del transformador, eventuales tirantes, etc.

Tales flujos motivan las llamadas *caídas internas por reactancia*. No es fácil, a base de los ensayos industriales usuales, separar los efectos de Φ_{d1} y Φ_{d2} . La parte flujo de dispersión que solamente concatena con el primario, oscila, según los casos y formas constructivas, entre 25% y el 75%. Afortunadamente, lo que interesará, según se verá, será el efecto conjunto de ambos flujos de dispersión.

En caso de corrientes elevadas (cortocircuitos), la reluctancia correspondiente al flujo de dispersión tiende a disminuir (véase § I-4.3), es decir, los arrollamientos tienden a separarse para aumentar la sección del manguito. Esto justifica los esfuerzos de tracción a que quedan sometidas las espiras del arrollamiento externo, al propio tiempo que los de compresión de las del interno.

Otro posible efecto de corrientes elevadas es el calentamiento localizado de caja u otros elementos ferromagnéticos por los que pase el flujo de dispersión. Como tales corrientes

son de poca duración, el efecto no es importante. En casos anómalos de cargas desequilibradas (véase transformadores trifásicos, § III-5) duraderas, estos flujos volantes pueden producir calentamientos notables en cajas, etc., incluso dar zonas de incandescencia.

Finalmente, en la figura II-3,7a, se observa como el flujo de dispersión atraviesa la masa de los arrollamientos. Esto motiva corrientes de *FOUCAULT* que se superpondrán a las principales. Puede hablarse de efectos pelicular y de proximidad, si se prefiere. Ello aumenta las pérdidas por efecto *JOULE* puras, que pueden calcularse o medirse mediante corriente continua. Cuéntese, pues, que, con corriente alterna, estas pérdidas adicionales se traducen en aumento aparente de las resistencias R_1 y R_2 (resistencias efectivas). El efecto es tanto más pronunciado cuanto más elevada es la frecuencia o mayores son las secciones de los conductores.

Para evitar el inconveniente de las secciones grandes, no obstante requeridas cuando las corrientes son de consideración, se desdoblán a base de ramas en paralelo. Al ser distinta la disposición de dichas ramas, en relación con el flujo motivante, el reparto de corrientes no sería correcto, con el consiguiente aumento de pérdidas. De ahí que se proceda a transponer los conductores en paralelo, a fin de que ocupen diversas posiciones. Esto se realiza en la propia factoría, o bien se emplean *conductores transpuestos* ya preparados a tal fin (en alemán *Drilleiter*).

§ II-4. Reducción de los valores de un transformador a la tensión de uno de sus arrollamientos.

Se trata de una operación de gran utilidad en el estudio de sistemas eléctricos a base de varias tensiones nominales (por ejemplo, el representado en la figura I-2,1). Reduce el estudio al de otro sistema ideal trabajando a una sola tensión. No obstante su mayor trascendencia, de momento, y para no acumular novedades, se dará una justificación sencilla de la utilidad de la operación.

§ II-4.1. REDUCCIÓN DEL SECUNDARIO AL PRIMARIO¹.

Para concretar, se va a realizar la llamada *reducción del secundario al primario*.

Imagínese un transformador monofásico 22 000/220 V, es decir, de relación 100/1. Se desea trazar un diagrama vectorial (figura II-3,6). Es sabido que

$$\frac{U_1}{U_2} \approx r_t = \frac{100}{1} ; \frac{E_1}{E_2} = r_t = \frac{100}{1}$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{1}{r_t} = \frac{1}{100}$$

¹ Supóngase un transformador reductor. Véase nota¹ de pie de página 3.

Esto significa que, si para representar los elementos del primario se emplean vectores con longitudes razonables (escalas adecuadas para tensiones y para intensidades), usando las mismas escalas para el secundario resultarán vectores de tensión muy pequeños y vectores intensidad exageradamente grandes. Para evitar esta incómoda situación se conviene en lo siguiente:

a) Los vectores tensión del secundario no se dibujarán como tales, sino multiplicados por $r_{te} = r_t^{-1}$, y, tras sufrir esta operación, se representarán aplicándoles una tilde, así:

$$\tilde{E}'_2 = E_2 r_t$$

$$\tilde{U}'_2 = U_2 r_t$$

$$\tilde{U}'_{R2} = U_{R2} r_t = R_2 I_2 r_t$$

$$\tilde{U}'_{Xd2} = U_{Xd2} r_t$$

Está claro que, con ello, \tilde{E}'_2 pasa a tener el mismo valor que E_1 . Y, en general, los otros vectores tensión vienen a tener magnitudes semejantes a las del primario. Por lo tanto, serán de cómoda representación utilizando la misma escala, pero empleando los valores ficticios (*reducidos al primario*).

b) La intensidad (o intensidades) del secundario se reducirán al primario por la operación

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{r_t}$$

Igual que antes, se logra que I'_2 tenga una magnitud semejante a la de I_1 ($I_1 = I_0 + I'_2$, siendo la corriente de vacío, en general, pequeña).

Se recuerda (véase ecuación [II-3.4]) que

$$I_1 = I_0 - I_2 \frac{1}{r_t} = I_0 - I'_2, \quad 2$$

o sea, que antes de conocer la operación de reducir el secundario al primario, para formar I_1 , se realizaba la operación I_2/r_t . La única diferencia está en que aquí I'_2 no incluye el signo negativo que se empleó en [II-3.2] y así se procederá en lo sucesivo (véase el § II-4.4).

¹ Recuérdese (véase § II-2.3) que existen r_{tn} y r_{to} , que suelen confundirse en r_t . Para precisar conceptos, se dirá que nos referimos a r_{te} . Por razones prácticas, y por ser apenas discrepantes, se seguirá escribiendo, simplemente, r_t .

² Obsérvese que en la ecuación [II-3.4], r_t se refería, como en este apartado, a r_{te} .

c) Se desea que las impedancias sigan siendo cocientes entre tensiones y corrientes¹. Por ello se emplean impedancias reducidas al primario, a base del siguiente convenio

$$Z'_{c2} = \frac{U'_2}{I'_2} = \frac{U_2 r_t}{\frac{I_2}{r_t}} = Z_c r_t^2$$

La Z_c anterior es la de la carga del secundario (véase figura II-3,5b). Lo mismo se aplicará para todas las impedancias del secundario

$$R'_2 = R_2 r_t^2$$

$$X'_{d2} = X_{d2} r_t^2$$

d) Obsérvese que las potencias del secundario no sufren alteración con la operación de reducción al primario, ejemplo:

$$R'_2 I_2'^2 = R_2 r_t^2 \left(I_2 \frac{1}{r_t} \right)^2 = R_2 I_2^2$$

e) Huelga añadir que los ángulos quedan inalterados y, por lo tanto, también los factores de potencia:

No se use φ'_2 ya que es idéntico a φ_2 .

Luego no hay más que $\cos \varphi_2$,

$$U'_2 I'_2 \cos \varphi_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

f) En general, con las reducciones explicadas, no sufren alteraciones las potencias activas, las reactivas, ni las aparentes.

$$U'_2 I'_2 \cos \varphi_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$U'_2 I'_2 \sin \varphi_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2$$

$$U'_2 I'_2 = U_2 I_2$$

Como consecuencia inmediata, se deduce la conservación de pérdidas y del rendimiento.

¹ Sin introducir coeficientes numéricos en la ley de Ohm.

§ II-4.2. LA REDUCCIÓN DEL SECUNDARIO AL PRIMARIO EQUIVALE AL ESTUDIO DE UN TRANSFORMADOR DE RELACIÓN DE NÚMERO DE ESPIRAS 1/1.

Esta es una interpretación física de la operación que se acaba de ver. Si en el transformador real, de relación

$$r_{te} = \frac{N_1}{N_2} = r_t,$$

se sustituye el secundario, con sus N_2 espiras, por otro secundario con las espiras

$$N'_2 = N_2 r_t = N_1,$$

es decir, si el transformador pasa a ser de relación de espiras 1/1, se tiene:

$$E'_2 = r_t E_2,$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{r_t}, \text{ etc., etc.}$$

Nótese que, en la reducción al primario, se conservan las f.m.m., ya que únicamente se alteran los factores del secundario, resultando:

	<u>n.º espiras</u>	<u>corrientes</u>	<u>f.m.m.</u>
Sin reducción	N_2	i_2	$N_2 i_2$
Con reducción	N_1	$i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2$	$N_1 i'_2 = N_2 i_2$

§ II-4.3. DIAGRAMA VECTORIAL DEL TRANSFORMADOR EN CARGA, A BASE DE SECUNDARIO REDUCIDO AL PRIMARIO.

En la figura II-4,1a, se ha dibujado el diagrama vectorial de un transformador, con la nueva modalidad.

Otra forma cómoda de emplear el diagrama vectorial es a base de dar un giro de 180° a los vectores del secundario en el diagrama (a), resultando el representado en (b). Con tal operación, aparecen claramente ventajas de la reducción del secundario al primario, que no se limitan a una cuestión de dibujo.

Nótese que, hablando en términos de secundario referido al primario (transformador 1/1), se pueden sentar las siguientes sencillas afirmaciones:

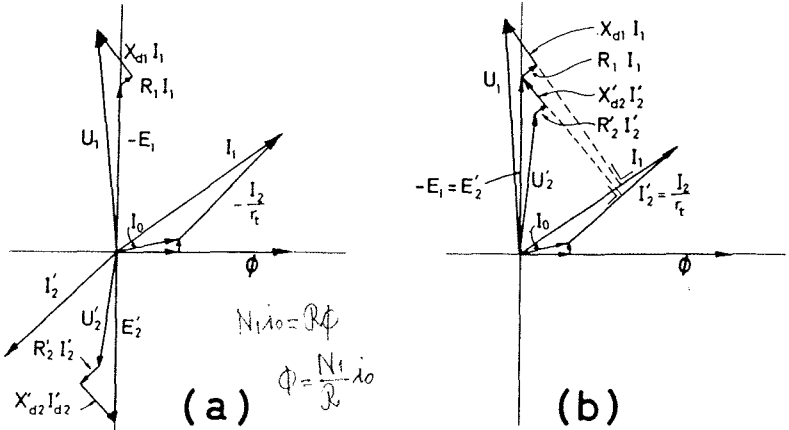


Fig. II-4,1

i) La corriente del primario es igual a la de vacío más la del secundario,

$$I_1 = I_0 + I'_2$$

ii) Se pasa de la tensión primaria a la del secundario, simplemente por las caídas de tensión primarias y secundarias,

$$R_1 I_1 + j X_{d1} I_1 + R'_2 I'_2 + j X'_{d2} I'_2$$

§ II-4.4. NUEVA FIGURA DE REFERENCIA, PARA LAS CONVENCIONES RELATIVAS A SIGNOS.

El hecho de haber girado, en 180°, todos los vectores secundarios, implica haber cambiado el sentido de las flechas de valoración correspondientes, en la figura base II-3,1, resultando la nueva figura de referencia II-4,2. Además, a efectos del primario, ahora $I'_2 = I_2/r_c$, es decir, se omite el signo negativo de [II-3.2].

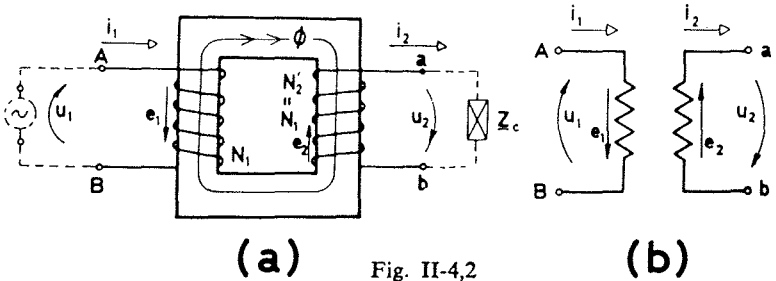


Fig. II-4,2

§ II-4.5. POLARIDADES.

En dos arrollamientos afectados por el mismo flujo (común), como los que hasta ahora se vienen considerando¹, se dice que dos extremos tienen *igual polaridad* cuando, simultáneamente, poseen potenciales de igual signo en relación con los extremos opuestos. En la figura II-4,2a, se puede precisar que los extremos A-a son de igual polaridad y, que también lo son los B-b.

Se suponen marcados según las siguientes designaciones.

1.º Se elegirá, arbitrariamente, un extremo del devanado de más alta tensión, que se marcará A. El de igual polaridad del devanado de más baja tensión será el a.

2.º Los otros extremos (alta y baja) se marcarán, respectivamente, B y b, siendo, igualmente, de la misma polaridad.

La determinación experimental de polaridades puede verse en el apéndice X.

§ II-4.6. REDUCCIÓN DE LOS VALORES DE UN TRANSFORMADOR A LA TENSIÓN DE UNO DE SUS ARROLLAMIENTOS.

En lugar de la reducción del secundario al primario, en ocasiones se reduce el primario al secundario. Esto significa pasar al transformador relación 1/1, a base de:

Espiras secundarias N_2

Espiras primarias $N'_1 = N_1 \frac{1}{r_t} = N_2^2$

Para esta reducción, se procederá igual que antes, sustituyendo r_t por la relación inversa

$$\frac{1}{r_t}.$$

Así, en general, se puede hablar de la *reducción de un transformador a la tensión de uno de sus arrollamientos*.

¹ Estos conceptos fácilmente se pueden extender al caso de transformadores trifásicos.

² Se sigue recordando que la r_t que aquí figura es, correctamente,

$$r_{ts} = \frac{N_1}{N_2},$$

pero, como se dijo en el § II-2.3, en la práctica no se distingue y se considera $r_{ts} = r_{tn} = r_t^\circ$



Fig. II-5,1

§ II-5. Esquema equivalente al transformador.

Supóngase el transformador de la figura II-5,1a. En el esquema (b) se ha representado a base del secundario reducido al primario ($N'_2 = N_1$; $E'_2 = E_1$). En (c) se han unido, eléctricamente, los puntos A y a, y, al ser $E_1 = E'_2$, también se han podido unir B y b, sin alteración de los regímenes de corrientes y tensiones. Tampoco quedan alteradas si se pasa a los esquemas (d) o (d'). En este último, existe una bobina, sobre núcleo ferromagnético, que ha sido detenidamente estudiada en § II-1. Luego, véase figura II-1,5, puede ser sustituida por el conjunto de una resistencia y una reactancia en paralelo que den el consumo I_0 . En definitiva queda el *esquema equivalente* II-5,1e.

Ha parecido intuitivo el método que se ha empleado para justificar el esquema equivalente al transformador. No obstante, más brevemente, pudo haberse dicho que el esquema de la figura II-5,1e es equivalente al transformador, en el sentido de que justifica (se corresponde con) el diagrama vectorial del transformador, según figura II-4,1b. Compruébelo el lector paso a paso.

Ejemplo de *reducción de un sistema a una de las tensiones*. Véase el esquema II-5,2a, en él que no es fácil la aplicación de ciertas leyes, como las de KIRCHHOFF. Con la reduc-

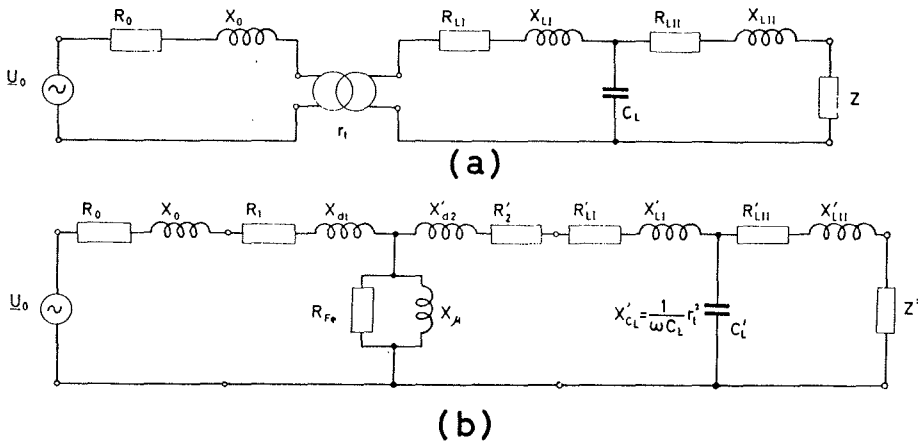


Fig. II-5,2

ción del sistema a una de sus tensiones (indiferente) son de aplicación inmediata. Puede resolverse el problema que se desee, teniendo presente que cualquier resultado afectado de tilde es un valor ficticio. Para pasar a su valor real hay que deshacer la reducción.

Con lo dicho se aprecia que la operación de la reducción al primario (reducción a una de las tensiones) tiene mayor interés que una simple cuestión de dibujo.

Véase el apéndice XVI sobre determinación de valores del esquema equivalente.

§ II-6. Esquema equivalente simplificado. Resistencia y reactancia de cortocircuito de un transformador.

Dada la pequeñez de I_0 , es frecuente despreciar tal valor, resultando

$$I_1 \approx I'_2,$$

y el *esquema equivalente aproximado simplificado* es el de la figura II-6,1a.

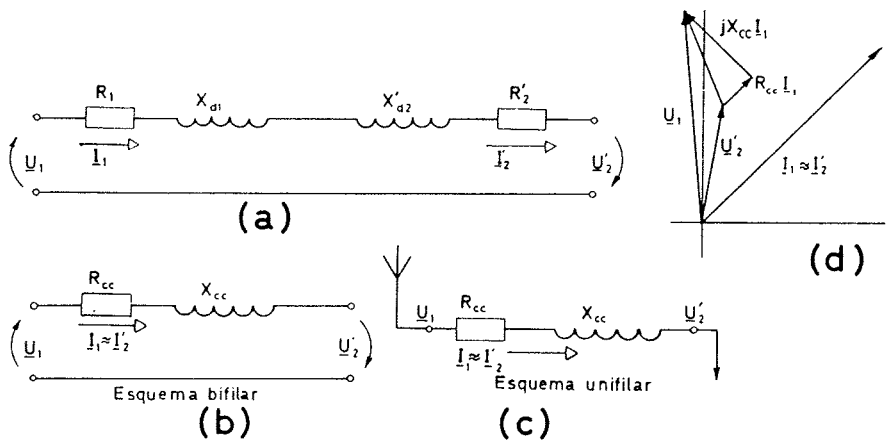


Fig. II-6,1

Aún puede reducirse más, a base de escribir:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2, \text{ resistencia de cortocircuito;}$$

$$X_{cc} = X_{d1} + X'_{d2}, \text{ reactancia de cortocircuito.}$$

Con ello queda el esquema bifilar de la figura II-6,1b, respectivamente el unifilar (c). El diagrama vectorial correspondiente véase en (d).

Lo anterior pone de manifiesto que un transformador monofásico se comporta como un elemento lineal, incluso si trabaja en la zona de saturación, salvo en lo que concierne a la corriente de excitación.

La justificación de las designaciones de R_{cc} y X_{cc} , así como el interés práctico de estas magnitudes, se verán en breve.

Está claro que el esquema de la figura II-5,2, sería sensiblemente más simple a base de lo que se acaba de ver.

Cuando no se quiere despreciar I_0 (I_{Fe} , I_{μ}) y, no obstante, se desean emplear los prácticos conceptos R_{cc} y X_{cc} , se utiliza uno de los esquemas aproximados de la figura II-6,2.

Los valores R_{cc} y X_{cc} los proporciona el ensayo en cortocircuito, véase § II-7 que sigue. Los R_{Fe} y X_{μ} los facilita el ensayo en vacío, § II-2.

El esquema equivalente dado en la figura II-5,1e, se conoce por *esquema en T*. Los de la figura II-6,2a y b son los *esquemas en gama* (Γ y T). El de la figura II-6,2c, es el *esquema en pi* (π).

A partir de los esquemas reducidos anteriores, se pueden formar los esquemas equivalentes de relación r_1 . Se ha representado uno de ellos en la figura II-6,3. El transformador que se ve se supone ideal de relación r_1 .

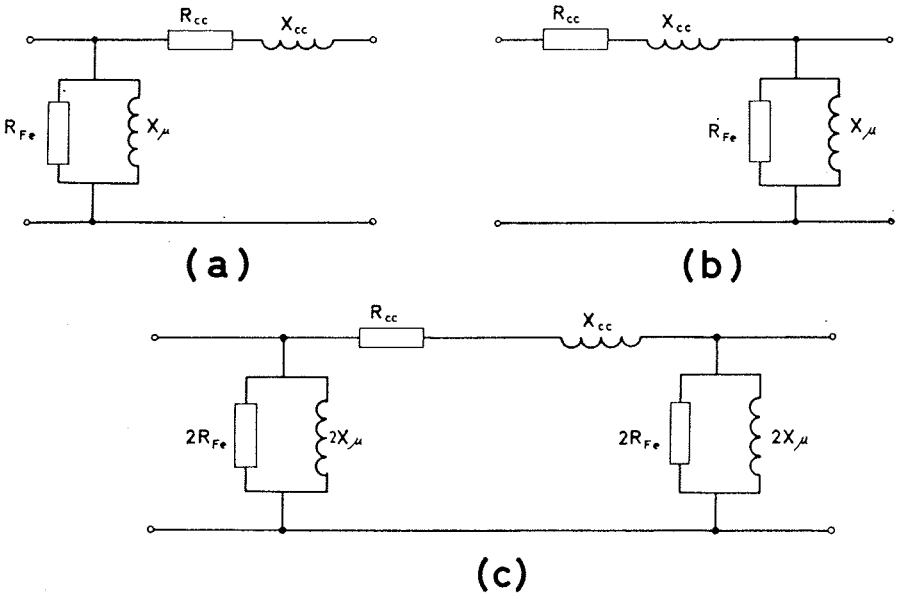


Fig. II-6,2

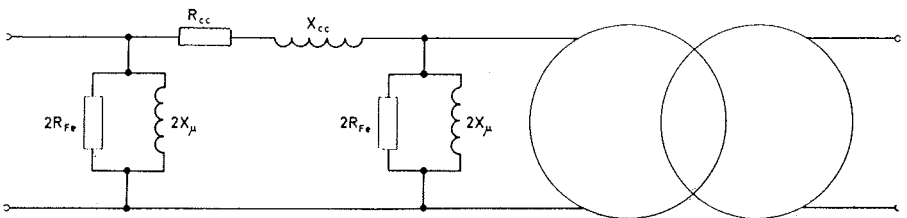


Fig. II-6,3

§ II-7. Ensayo del transformador en cortocircuito. Tensión de cortocircuito.

§ II-7.1. ENSAYO EN CORTOCIRCUITO: TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO, COMPONENTES.

En la figura II-7,1a puede verse el transformador dispuesto para el ensayo en cortocircuito. Consiste en unir los bornes secundarios del transformador en cortocircuito (mediante impedancia despreciable). En esta disposición, se aplica al primario una tensión de ensayo U_{cc} tal que, por dicho arrollamiento, circule la intensidad nominal. Se irá aumentando la tensión hasta alcanzar un valor U_{cc} , determinado por el hecho de que el amperímetro (A) indique la intensidad nominal I_{1n} (§ I-5). U_{cc} es la llamada *tensión de cortocircuito*. Véase el ejercicio 4.º de este apartado.

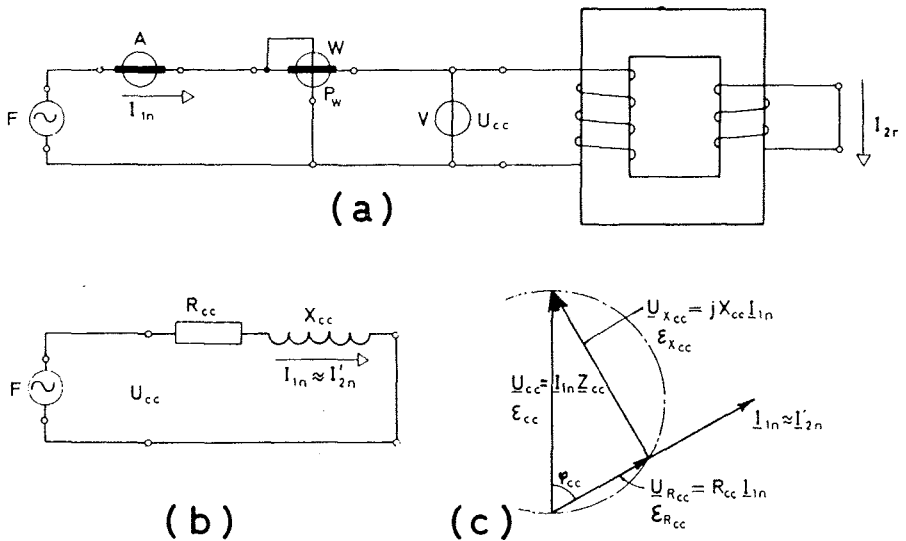


Fig. II-7,1

Si la disposición del ensayo real, con los aparatos de medida precisos, está dada en (a), en (b) se ha representado a base del esquema equivalente simplificado.

En (c) se ha trazado el *diagrama vectorial del ensayo en cortocircuito*. Está claro que

$$U_{cc} = R_{cc} I_{1n} + j X_{cc} I_{1n} \quad \text{[II-7.1]}$$

Obsérvese que tal triángulo es igual al que puede verse en los extremos de los vectores U_1 y U_2' de la figura II-6,1d. Se ha denominado triángulo de KAPP.

Las mediciones proporcionadas por los tres aparatos (A, V y W) permiten calcular y trazar todos los elementos del diagrama:

$$\begin{aligned}\cos \varphi_{cc} &= \frac{P_{cc}}{U_{cc} I_{1n}} \\ U_{Rcc} &= U_{cc} \cos \varphi_{cc} \\ U_{Xcc} &= U_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}\end{aligned}\quad [\text{II-7.2}]$$

Los anteriores datos no suelen darse en valor absoluto (voltios), sino en la siguiente forma relativa:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cc} \% &= \frac{U_{cc}}{U_{1n}} 100 = \frac{Z_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100 \\ \varepsilon_{Rcc} \% &= \frac{U_{Rcc}}{U_{1n}} 100 = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100 \\ \varepsilon_{Xcc} \% &= \frac{U_{Xcc}}{U_{1n}} 100 = \frac{X_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100\end{aligned}\quad [\text{II-7.3}]$$

Las impedancias (resistencias, reactividades) expresadas en tanto por ciento son más significativas que en valores absolutos (Ω). Indican el tanto por ciento de caída de tensión, referida a la nominal, cuando por el elemento afectado circula la corriente nominal. Además, con la operación de reducción a una determinada tensión (reducción de secundario a primario, o viceversa) varía el valor Z_{cc} mas no el ε_{cc} , según es fácil ver.

Véanse los apéndices XV-2 y XVI.

A título de orientación, y por su utilidad, se consigna que, en los transformadores industriales, las tensiones de cortocircuito suelen ser del orden ¹:

Transformadores hasta 1 000 kVA $\varepsilon_{cc} = 3 \div 6 \%$

Transformadores desde 1 000 kVA $\varepsilon_{cc} = 6 \div 13 \%$

¹ Realmente estos valores prácticos corresponden a transformadores trifásicos, ya que son los que tienen mayor aplicación industrial.

También es útil saber que la corriente es que $\epsilon_{X_{cc}} > \epsilon_{R_{cc}}$, así¹

	$\epsilon_{X_{cc}} \%$	$\epsilon_{R_{cc}} \%$	$\epsilon_{X_{cc}} / \epsilon_{R_{cc}}$
Transformadores hasta 1 000 kVA	2,5 ÷ 6	1,1 ÷ 2,5	1,2 ÷ 6
Transformadores desde 1 000 kVA	5 ÷ 13	0,4 ÷ 1,3	3 ÷ 30

Está claro que, con el ensayo en cortocircuito, o bien conociendo los valores $U_{R_{cc}}$ y $U_{X_{cc}}$, o aun con $\epsilon_{R_{cc}}$ y $\epsilon_{X_{cc}}$, se pueden calcular fácilmente R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} (impedancia de cortocircuito). Con estas cantidades se dibuja el esquema de la figura II-6,1.

Para el estudio del ensayo en cortocircuito siempre se emplea el esquema equivalente simplificado, justifíquelo el lector.

Ejercicio 1.º Valor relativo de la tensión de cortocircuito, en función de la potencia.

Se recuerda (véase § I-5) que la potencia nominal es la indicada en placa de características del transformador (una potencia convenida con el fabricante, en atención a diversas circunstancias, por ejemplo un mayor o menor grado de seguridad o de capacidad de sobrecarga, etc.). Si se asigna al transformador otra potencia nominal, el valor de la tensión de cortocircuito varía, aún tratándose de la misma máquina.

Así, a un transformador de 1 000 kVA de potencia nominal, con una $\epsilon_{cc} = 5 \%$, y un aumento de temperatura media en el cobre de 65°C (véase apéndice II), se le desea asignar una potencia nominal de 800 kVA, a fin de que el calentamiento se limite a 55°C . Está claro que la nueva U_{cc} ($U_{cc, 800}$) se deducirá de la anterior ($U_{cc, 1\,000}$) por la relación

$$\frac{U_{cc, 800}}{U_{cc, 1\,000}} = \frac{I_{1n, 800}}{I_{1n, 1\,000}} = \frac{800 \text{ kVA}}{1\,000 \text{ kVA}}$$

Y también es evidente (véase [II-7.3]) que

$$\frac{\epsilon_{cc, 800}}{\epsilon_{cc, 1\,000}} = \frac{800 \text{ kVA}}{1\,000 \text{ kVA}}$$

De aquí se deduce el concepto *potencia de un transformador con tensión de cortocircuito unitaria*,

$$S_{1\%cc} = \frac{S_{\text{nominal}}}{\epsilon_{cc} \%$$

¹ Son valores que también se refieren a transformadores trifásicos.

Ejercicio 2.º Valor relativo de la tensión de cortocircuito en relación con la tensión empleada.

Se dispone de un transformador 30 000/460 V, 1 000 kVA, $\varepsilon_{cc} = 5\%$ con un calentamiento a plena carga de 50°C.

Se va a utilizar en una red a 26 000 V. Dado su escaso calentamiento, se la asignará la misma potencia nominal que tenía. Así que, en la nueva placa de características, figurará:

Potencia, $S = 1\,000\text{ kVA}$

Tensión primaria, $U_1 = 26\,000\text{ V}$

Tensión secundaria, $U_2 = 398\text{ V}$

Interesa indicar la correspondiente ε_{cc} .

Conservar la potencia significa aumentar las corrientes nominales en proporción inversa a las tensiones. Por lo tanto (véase [II-7.3])

$$\frac{\varepsilon_{cc, 26\text{ kV}}}{\varepsilon_{cc, 30\text{ kV}}} = \left(\frac{30}{26}\right)^2; \varepsilon_{cc, 26\text{ kV}} \approx 6,6\%$$

Deduzca el lector que, si se le hubiese asignado la potencia $S_{26\text{ kV}} = 1\,000 \cdot 26/30 = 867\text{ kVA}$, la nueva ε_{cc} sería

$$\varepsilon_{cc, 26\text{ kV}} = 5\% \frac{30}{26} \approx 5,8\%$$

Ejercicio 3.º Aun cuando en la placa de características figura el valor ε_{cc} , en ocasiones interesa Z_{cc} . Compruébese la siguiente fórmula práctica:

$$Z_{cc} (\Omega) = \frac{\varepsilon_{cc} (\%) U_{1n}^2 (\text{kV})}{S_n (\text{kVA})} 10$$

No suele interesar L_{cc} .

Para tener órdenes de magnitud, supónganse dos transformadores para $U_{1n} = 10\text{ kV}$:

a) 100 kVA, $\varepsilon_{cc} = 5\%$; $X_{cc} = 50\ \Omega$ ($L_{cc} \approx 0,16\text{ H}$)

b) 10 000 kVA, $\varepsilon_{cc} = 10\%$; $X_{cc} = 1\ \Omega$ ($L_{cc} \approx 0,0032\text{ H}$)

Ejercicio 4.º Realización de un ensayo en cortocircuito.

Referente a un transformador monofásico cuyas características nominales conocidas son 10 kVA, 6 000/380 V, se pretende determinar U_{cc} . Con la única tensión disponible, se aplica 220 V al primario (6 000 V) que motiva la corriente 1,2 A.

La corriente nominal del transformador a 6 000 V es

$$I_{1n} = \frac{10\,000}{6\,000} = 1,66 \text{ A}$$

Por la linealidad del esquema admitido, figura II-7,1, tal ensayo proporciona

$$U_{cc} = 220 \text{ V} \frac{1,66}{1,2} = 304,2 \text{ V}$$

$$\epsilon_{cc} = \frac{304,2}{6\,000} 100 \approx 5 \%$$

§ II-7.2. PÉRDIDAS QUE SE MIDEN EN EL ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

El ensayo en cortocircuito proporciona otro dato interesante, las pérdidas en el cobre del transformador a plena carga¹. En efecto, en este ensayo:

- a) las pérdidas en el hierro son despreciables,
- b) las pérdidas en el cobre son las mismas que las correspondientes al régimen de plena carga.

Es fácil ver lo primero, ya que la tensión que se aplica, U_{cc} , es pequeña frente a U_{1n} (supóngase $U_{cc} = 5\% U_{1n}$). Y como sea que

$$U_{cc} \approx N_1 \frac{d\Phi_{cc}}{dt} \quad \text{y} \quad U_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

resulta $\Phi_{cc} \approx 5\% \Phi$. Luego, $B_{cc} \approx 0,05 B$. Por lo demás, es sabido que las pérdidas en el hierro son, aproximadamente, proporcionales al cuadro de B . En consecuencia, en este caso concreto, pérdidas en el hierro en ensayo de cortocircuito $\approx \frac{1}{400}$ pérdidas en el hierro en servicio normal.

¹ En realidad estas son las fundamentales, y aquí se van a considerar únicas. Para un examen más detenido de las pérdidas que se presentan en los transformadores, véase apéndice III.

Por el contrario, el ensayo en cortocircuito aporta las pérdidas por efecto JOULE, como en plena carga. Basta considerar que tal ensayo viene definido por el hecho de que circulan las corrientes nominales ($R_1 I_{1n}^2$ y $R_2 I_{2n}^2$).

Nótese que las pérdidas medidas en el cobre, por el ensayo que ocupa, incluyen las adicionales debidas a los efectos pelicular y de proximidad, que se examinaron en el § II-3.6.

§ II-7.3. ALGUNAS RELACIONES PRÁCTICAS.

Tanto las pérdidas en el hierro, como las en el cobre, se pueden dar en tanto por ciento, referidas a la potencia activa máxima ($kVA = kW$) del transformador:

$\epsilon_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_1 I_1} 100$; $\epsilon_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{U_1 I_1} 100$. Pues bien, siendo $P_{Cu} = R_{cc} I_1^2$ las pérdidas en el cobre, es útil ver lo siguiente:

$$\epsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} I_1}{U_1} 100 = \frac{R_{cc} I_1^2}{U_1 I_1} 100 = \frac{P_{Cu}}{U_1 I_1} 100 = \epsilon_{Cu}. \quad [II-7.4]$$

O sea: la ϵ_{Rcc} es, numéricamente, igual al tanto por ciento de las pérdidas en el cobre. Otra relación útil, consecuencia de la anterior, es

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{\epsilon_{Rcc}}{\epsilon_{cc}} = \frac{\epsilon_{Cu}}{\epsilon_{cc}} \quad [II-7.5]$$

§ II-8. Pérdidas y rendimientos en un transformador.

Se van a considerar, por ser de interés:

- i) pérdidas por efecto JOULE en los cobres,
- ii) pérdidas en el circuito magnético.

No se va a razonar en relación con otras. Para un examen más detenido, véase apéndice III.

Téngase presente que aquellas pérdidas vienen dadas, muy aproximadamente, por:

- i) ensayo en cortocircuito (P_{cc}), según § II-7,
- ii) ensayo en vacío (P_0), según § II-2.3.

El rendimiento de un transformador, en carga, vale:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

siendo:

P_1 = potencia absorbida por el primario,

P_2 = potencia cedida por el secundario,

P_{Fe} = pérdidas en el hierro,

P_{Cu} = pérdidas por efecto JOULE.

Se define el *índice de carga*, C , del transformador, en tanto por uno,

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I'_2}{I'_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}} \quad 1,$$

siendo: I_1, I_2 = intensidades a un determinado régimen de carga, e I_{1n}, I_{2n} intensidades nominales.

También se recuerda que:

P_{Fe} = prácticamente constantes (independientes del régimen de carga), para una tensión de alimentación fija (U_{1n}), $P_{Fe} \approx P_0$ (vacío),

P_{Cu} = disminuyen con el cuadrado de la carga,

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \approx R_{cc} I'^2 \approx C^2 P_{cc}$$

Luego el rendimiento, a un régimen de carga C , es

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + C^2 P_{cc}} = \frac{U_2 C I_{2n} \cos \varphi_2}{U_2 C I_{2n} \cos \varphi_2 + P_0 + C^2 P_{cc}}$$

Consecuencias:

a) Para un índice de carga determinado ($C = \text{constante}$), η_c empeora con el factor de potencia de la carga.

b) Para un factor de potencia fijo ($\cos \varphi_2 = \text{constante}$) η_c varía en función de C , véase, por ejemplo, la figura II-8,1.

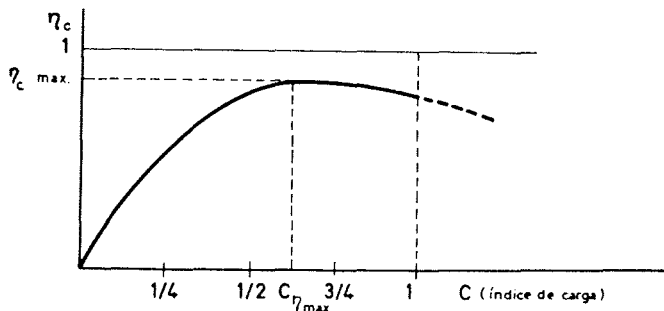


Fig. II-8,1

1 Se recuerda que lo último es aceptable siempre que $I_0 \ll I_1$. (regimen cercano a plena carga)

Interesa calcular el rendimiento máximo, η_C , para un tipo de carga determinado (cos $\varphi_2 =$ constante).

$$\eta_C = \frac{U_2 I_{2n} \cos \varphi_2}{U_2 I_{2n} \cos \varphi_2 + \frac{P_0}{C} + C P_{cc}} \quad \text{máximo cuando}$$

$$\frac{P_0}{C} + C P_{cc} \quad \text{sea mínimo.}$$

Cuyo mínimo se consigue cuando

$$P_0 = C^2 P_{cc}, \text{ o sea } P_{Fe} = P_{Cu}, \quad C = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}} \quad [\text{II-8.1}]$$

es decir, cuando las pérdidas en el cobre se igualan a las pérdidas en el hierro.

Ejemplo

En un transformador de 500 kVA, 30 000/400 V, se tiene: $P_0 = 1\,300$ W, $P_{cc} = 5\,200$ W.

El índice de carga, $C_{\eta_{\max}}$, productor del mejor rendimiento, es

$$C_{\eta_{\max}} = \sqrt{\frac{1\,300}{5\,200}} = \frac{1}{2}, \text{ media carga.}$$

Rendimientos a base de cos $\varphi = 1 \div 0,8$:

Índice, C	Rendimientos:	
	cos $\varphi = 1$	cos $\varphi = 0,8$
1/1	$\frac{500}{500 + 1,3 + 5,2}$	$\frac{500 \cdot 0,8}{500 \cdot 0,8 + 1,3 + 5,2}$
3/4	$\frac{0,75 \cdot 500}{0,75 \cdot 500 + 1,3 + 0,75^2 \cdot 5,2}$	$\frac{0,75 \cdot 500 \cdot 0,8}{0,75 \cdot 500 \cdot 0,8 + 1,3 + 0,75^2 \cdot 5,2}$
$C_{\eta_{\max}} = \frac{1}{2}$	$\frac{0,5 \cdot 500}{0,5 \cdot 500 + 1,3 + 0,5^2 \cdot 5,2}$	$\frac{0,5 \cdot 500 \cdot 0,8}{0,5 \cdot 500 + 0,8 + 1,3 + 0,5^2 \cdot 5,2}$

Esto conduce a una recomendación simplista. Si se conoce el régimen de carga (C) a que ha de trabajar, normalmente, un transformador, es recomendable que la relación entre pérdidas ($P_{cc} : P_0$) sea tal que origine η_{\max} para aquella carga.

Ejemplos

Si el transformador ha de trabajar, fundamentalmente, a	Relación $P_{cc} : P_0$ más conveniente
Plena carga	1
Tres cuartos de carga	1,77
Dos tercios de carga	2,25
Media carga	4

En la práctica, los transformadores no suelen trabajar a una carga (C) fija. Si, por ejemplo, se conoce su gráfico anual, la carga ficticia constante (C), que hay que elegir para aplicar la regla anterior ($C^2 P_{cc} = P_0$), es la media cuadrática de las cargas. La justificación la deducirá el lector (véase § II-10.3).

Ejercicio

Partiendo de la expresión del rendimiento y de [II-8.1], probar que el rendimiento máximo de un transformador, cuya carga es a base del factor de potencia $\cos \varphi$, vale

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2 \sqrt{P_0 P_{cc}}}{S \cos \varphi},$$

siendo S la potencia (aparente) del transformador.

Por consiguiente, el rendimiento óptimo es

$$\eta_{\text{óptimo}} = 1 - \frac{2 \sqrt{P_0 P_{cc}}}{S},$$

correspondiente a:

$$\cos \varphi = 1; C = \sqrt{\frac{P_0}{P_{cc}}}$$

§ II-9. Balance energético.

Se ha venido dando preferencia a los métodos gráficos (diagramas vectoriales), en los que el lector avezado interpreta, con facilidad, incluso los aspectos energéticos. A título de ejemplo de otras formas de proceder, se va a realizar, por el método analítico de las potencias complejas¹, el balance energético total.

¹ Véase *Teoría de circuitos, fundamentos*, § II-36, del mismo autor.

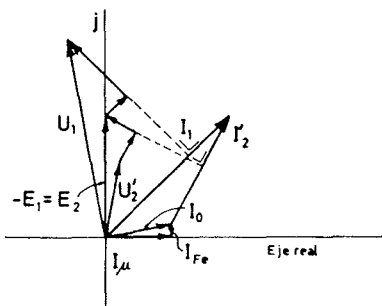


Fig. II-9,1

Se analiza la potencia compleja $U_1 I_1^*$ (recuérdese $-E_1 = E'_2$ e $I_1 = I_0 + j I'_2$)

$$S = P + j Q = U_1 I_1^* = (-E_1 + R_1 I_1 + j X_{d1} I_1) I_1^* = R_1 I_1^2 + j X_{d1} I_1^2 - E_1 I_1^* \quad 1$$

$$-E_1 I_1^* = -E_1 (I_0^* + I'_2)^* = E'_2 I'_2^* - E_1 I_0^*$$

$$E'_2 I'_2^* = (R'_2 I'_2 + j X'_{d2} I'_2 + U'_2) I'_2^* = R'_2 I_2^2 + j X'_{d2} I_2^2 + U'_2 I_2^*$$

$$= R_2 I_2^2 + j X_{d2} I_2^2 + U_2 I_2^*$$

$$-E_1 I_0^* = -E_1 (I_\mu - j I_{Fe}) = j E_1 I_\mu + E_1 I_{Fe}$$

$$U_2 I_2^* = P_2 + j Q_2 = S_2 \quad P_2 = \text{potencia activa de la carga}$$

$$Q_2 = \text{potencia reactiva de la carga.}$$

En resumen:

$$S = P + j Q = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + E_1 I_{Fe} + j (X_{d1} I_1^2 + X_{d2} I_2^2 + E_1 I_\mu) + P_2 + j Q_2$$

§ II-10. Comparación económica de transformadores².

§ II-10.1. FÓRMULAS DE COSTE ANUAL.

La comparación económica de dos ofertas de transformadores no puede limitarse a la consideración de sus precios. Las pérdidas constituyen un gasto. Hay que hacer comparables tales conceptos.

Sean:

T = precios de adquisición del transformador;

G = gasto anual (incluidas pérdidas) del transformador;

¹ $\underline{V} \underline{V}^* = V^2$.

² Aun cuando este apartado está incluido en el capítulo relativo a transformadores monofásicos, es válido para los trifásicos. Es más, los valores elegidos para los ejemplos se refieren a transformadores trifásicos.

P_{Fe} = pérdidas en el hierro, en kW;

P_{Cu} = pérdidas en el cobre, a plena carga, en kW;

a = anualidad de amortización e interés, correspondiente a una puesta de capital invertido;

p = precio del kWh, en el lugar de instalación del transformador;

C = índice de carga (véase § II-8);

t = horas anuales de conexión del transformador.

Se va a determinar el gasto total anual, G , que un transformador en servicio implica. Se compone de ¹:

G_1 = gasto anual por capital invertido,

G_2 = gasto anual por pérdidas,

G_3 = gasto por entretenimiento o conservación.

El último sumando no se tomará en consideración, a los efectos de la comparación económica, ya que los gastos de conservación prácticamente no varían de un transformador a otro.

El primer sumando es de fácil evaluación,

$$G_1 = T a$$

Para calcular el gasto anual en concepto G_2 , téngase presente que existen:

a) pérdidas en el hierro fijas = P_{Fe}

b) pérdidas en el cobre dependientes de la carga = $C^2 P_{Cu}$

A los efectos a), se puede suponer que el transformador está conectado continuamente ($t = 8\ 760$ horas), o no (por ejemplo, noches sin tensión). Lo usual es lo primero.

A los efectos b), además de las horas de conexión, hay que conocer el índice de carga C a que va a trabajar ordinariamente el transformador, ya que las pérdidas en el cobre (regularmente las mayores a plena carga) dependen, en fuerte medida, de C ,

$$G_2 = (P_{Fe} + C^2 P_{Cu}) t p$$

Luego

$$G = T a + (P_{Fe} + C^2 P_{Cu}) t p$$

Ejemplo

Se van a comparar, económicamente, dos transformadores de 200 kVA, 15 000/231 V, contruidos: uno de ellos (antiguo) a base de chapa laminada en caliente, otro (moderno) a base de chapa laminada en frío (grano orientado).

¹ Otros factores deberían entrar, en rigor, en el examen: tensión de cortocircuito, espacio ocupado, peso (transporte), corriente de vacío, etc.

	Antiguo	Moderno
Precios	52 120 ptas.	55 850 ptas.
P_{Fe}	1 210 W	650 W
P_{Cu}	3 700 W	3 900 W

Se va a emplear la fórmula de comparación de una empresa española,

$$G = T 0,15 + (P_{Fe} + 0,5 P_{Cu}) 10^{-3} 8760$$

P_{Fe} y P_{Cu} en W

Procede de haberse adoptado:

a = interés y anualidad de amortización, que tal empresa exige por peseta de capital = 0,15 ptas./año,

t = conexión del transformador continua = 8 760 horas anuales,

p = precio del kWh = 1 pta.¹

C = índice de carga $\approx 0,7$ (70%)

$$G \text{ (antiguo)} = 7 822 + 26 805 = 34 627 \text{ ptas.}$$

$$G \text{ (moderno)} = 8 377 + 22 776 = 31 153 \text{ ptas.}$$

Luego es más económico el transformador moderno, pese a un mayor precio y a sus más elevadas pérdidas en el cobre.

§ II-10.2. FÓRMULAS DE CAPITALIZACIÓN DE PÉRDIDAS.

En ocasiones las fórmulas de comparación de transformadores se conciben de otra forma. Al precio de adquisición del transformador se le agrega un capital capaz de dar rédito anual equivalente al valor de las pérdidas, constituyendo el *costo total actualizado*.

No es usual incluir, en estas fórmulas, otros factores, a no ser la corriente de vacío I_0 . Es evidente que estas corrientes motivan pérdidas en las líneas y redes de alimentación. Cuando se desea tener en cuenta tal circunstancia, se suele agregar un nuevo sumando que, ordinariamente, no se basa en I_0 , sino en una magnitud de ella derivada, la potencia aparente absorbida en vacío (en monofásico $U_1 I_0$, en trifásico $\sqrt{3} U_1 I_0$).

Un ejemplo de fórmula de capitalización, según las dos últimas concepciones, es la que figura en la *Recomendación UNESA 5 201A*, § 2.11,

$$C_a = P_0 + 45 000 P_{Fe} + 12 000 P_{Cu} + 600 Q_0$$

siendo:

C_a = costo total actualizado,

P_{Fe} y P_{Cu} = pérdidas en kW,

Q_0 = potencia reactiva de vacío $U_1 I_\mu$ en kVar.

¹ Dado el lugar de instalación, es decir, en la distribución en baja. Si se hubiese tratado de transformadores elevadores, para centrales, (véase T_E en figura I-2,1), la compañía habría usado otra fórmula, a base del precio del kWh en barras de la central, por ejemplo, 0,30 pts/kWh.

Ejemplo

Para la comparación de los transformadores anteriores hay que agregar:

	Antiguo	Moderno
$I_0 \approx I_\mu$	$5\% I_{1n}$	$2,3\% I_{1n}$

Lo que significa:

$$U_1 I_0 \quad \frac{5}{100} 200 = 10 \text{ kVA} \quad \frac{2,3}{100} 200 = 4,6 \text{ kVA}$$

Aplicando la fórmula *UNESA*:

$$C_a \text{ (antiguo)} = 52\,150 + 98\,850 + 6\,000 = 157\,000 \text{ ptas.}$$

$$C_a \text{ (moderno)} = 55\,850 + 75\,990 + 2\,760 = 134\,000 \text{ ptas.}$$

§ II-10.3. CICLOS DE CARGAS.

Regímenes constantes de carga no son los más frecuentes. Esta suele variar, durante un cierto periodo de tiempo (día, año), según un ciclo. En tal caso, se procederá como sigue.

La corriente de carga, I_c , que se adoptará, a los efectos de las fórmulas anteriores, será la media cuadrática de las cargas reales. Nótese, en efecto, que I_c ocasiona las mismas pérdidas en el cobre que las corrientes reales del ciclo.

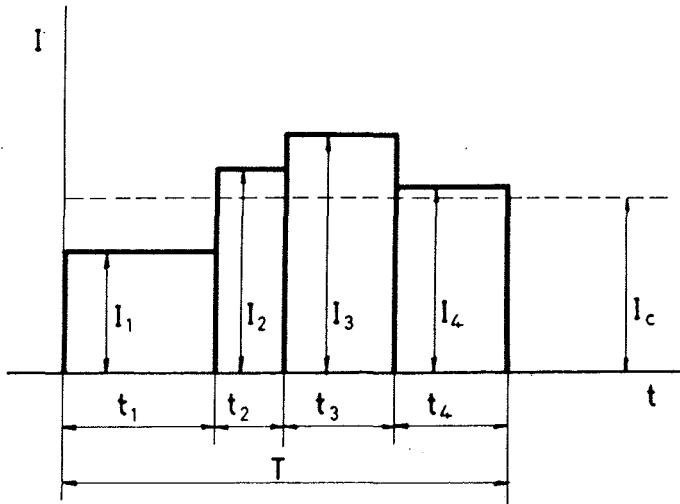


Fig. II-10,1

Las cargas representadas en la figura II-10,1, ocasionan pérdidas que se van a igualar a las producidas por una corriente ficticia I_c , a estos efectos equivalente:

$$R_{cc} I_1^2 t_1 + R_{cc} I_2^2 t_2 + R_{cc} I_3^2 t_3 + R_{cc} I_4^2 t_4 = R_{cc} I_c^2 T$$

$$I_c = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4}{T}}$$

§ II-11. Caída de tensión en un transformador: Efecto Ferranti.

§ II-11.1. CAÍDA DE TENSIÓN EN UN TRANSFORMADOR.

Imagínese un transformador siempre alimentado a la tensión nominal primaria U_{1n} . En vacío proporcionará la tensión secundaria nominal U_{2n} . Con el secundario a plena carga, y con un determinado factor de potencia (I_{2n} , $\cos \varphi_2$), la U_2 ya no es la nominal, se designa U_{2c} . Se denomina *caída interna del transformador* a

$$\Delta U_2 = U_{2n} - U_{2c} \quad [\text{II-11.1}]$$

Esta caída de tensión se dá, más frecuentemente, en tanto por ciento, referida a la tensión nominal secundaria. Caída interna relativa,

$$\varepsilon_c (\%) = \frac{U_{2n} - U_{2c}}{U_{2n}} 100 \quad [\text{II-11.2}]$$

Ejemplo

Un transformador, 30 000/400 V, proporciona, con determinada carga (supóngase plena carga y $\cos \varphi = 0,8$), la tensión secundaria $U_{2c} = 380$ V. La caída interna absoluta es 20 V. En valor relativo es $\varepsilon_c = 5\%$.

En ocasiones, la *caída de tensión absoluta* se da *referida al primario* (§ II-4). En el presente caso sería $20 \text{ V} \cdot r_t = 1\,500$ V

Según se va a ver, la caída de tensión depende de la naturaleza de la carga.

Con la finalidad de pasar a valores reducidos al primario, se multiplicarán numerador y denominador de [II-11.2] por r_t , resultando

$$\varepsilon_c (\%) = \frac{U_{1n} - U'_{2c}}{U_{1n}} 100 = 100 - \frac{U'_{2c}}{U_{1n}} 100 \quad [\text{II-11.3}]$$

Es otra útil definición de la caída de tensión relativa.

Se pretende calcular tales caídas para cualquier valor del $\cos \varphi$. Por el momento, se seguirá suponiendo que la intensidad secundaria de carga es la nominal, I_{2n} .

En la figura II-11,1a se aprecia el diagrama vectorial del transformador (secundario reducido al primario), a base de plena carga, cualquier factor de potencia.

Por cierto que el segmento \overline{MQ} es la diferencia $U_{1n} - U'_{2c}$, proporcionando la caída de tensión absoluta, referida al primario, a que se alude al final del ejemplo precedente. Bastará dividir tal diferencia por r_t , para tener la caída absoluta en secundario, $U_{2n} - U_{2c} = \Delta U_2$.

En la figura II-11,1b, se reproduce el diagrama, habiendo referido todos los vectores, en tanto por ciento, a U_{1n} , es decir, a base de $U_{1n} = 100$. Está claro que:

$$\frac{U_{Rcc}}{U_{1n}} 100 = \varepsilon_{Rcc} \text{ y } \frac{U_{Xcc}}{U_{1n}} 100 = \varepsilon_{Xcc}$$

Con ello se persigue obtener, directamente, la expresión de la caída a base de la definición [II-11.3]. En efecto,

$$\text{segmento } \overline{MQ} = \frac{U_{1n} - U'_{2c}}{U_{1n}} 100 = \varepsilon_c (\%)$$

El cálculo de tal segmento no ofrece dificultad:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c (\%) &= \overline{MQ} = \overline{MN} + \overline{NP} + \overline{PQ} = \\ &= \varepsilon_{Rcc} \cos \varphi + \varepsilon_{Xcc} \sin \varphi + 100 - \sqrt{100^2 - (\varepsilon_{Xcc} \cos \varphi - \varepsilon_{Rcc} \sin \varphi)^2} \end{aligned} \quad \text{[II-11.4]}$$

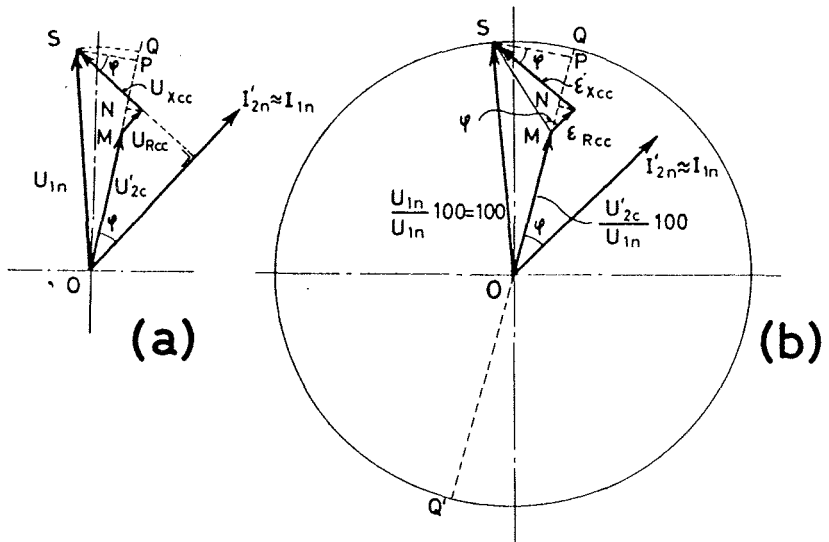


Fig. II-11,1

La expresión [II-11.4] se simplifica notablemente si, como caída interna de tensión, se acepta el valor aproximado \overline{MP} , resultando

$$\begin{aligned} \varepsilon(\%_0) &\approx \varepsilon_{Rcc} \cos \varphi + \varepsilon_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi = 1 & \text{[II-11.5]} \\ &= \varepsilon_{cc} \cos \varphi_{cc} \cos \varphi + \varepsilon_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} \operatorname{sen} \varphi = \varepsilon_{cc} \cos (\varphi_{cc} - \varphi) \end{aligned}$$

Es fórmula recomendable si $\varepsilon_{cc} < 4 \%$ (UNE 20-101-75, 8.1).

Otra fórmula, más aproximada, que prácticamente puede utilizarse en cualquier caso, se obtiene como sigue:

$$\frac{\overline{PQ}}{PQ} = \frac{\overline{SP}^2}{PQ^2} \approx \frac{\overline{SP}^2}{QQ^2} = \frac{(\varepsilon_{Xcc} \cos \varphi - \varepsilon_{Rcc} \operatorname{sen} \varphi)^2}{2 \cdot 100}$$

Así resulta

$$\varepsilon_c (\%) \approx \varepsilon_{Rcc} \cos \varphi + \varepsilon_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi + \frac{1}{200} (\varepsilon_{Xcc} \cos \varphi - \varepsilon_{Rcc} \operatorname{sen} \varphi)^2 \quad \text{[II-11.6]}$$

Se han obtenido expresiones para ε_c , correspondientes a I_{2n} . Interesa el cálculo de las caídas internas para cualquier carga (I_2 , $\varphi_2 = \varphi$). Se utilizará el concepto índice de carga (§ II-8)

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

Es fácil razonar que bastará sustituir, en las expresiones halladas:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Rcc} &\text{ por } C \varepsilon_{Rcc} \text{ y} \\ \varepsilon_{Xcc} &\text{ por } C \varepsilon_{Xcc} \end{aligned}$$

Así resultan:

$$\varepsilon_{(I_2, \varphi)} = C \varepsilon_{Rcc} \cos \varphi + C \varepsilon_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi + 100 - \sqrt{100^2 - C^2 (\varepsilon_{Xcc} \cos \varphi - \varepsilon_{Rcc} \operatorname{sen} \varphi)^2} \quad \text{[II-11.7]}$$

$$\varepsilon_{(I_2, \varphi)} \approx C \varepsilon_{Rcc} \cos \varphi + C \varepsilon_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi \quad \text{[II-11.8]}$$

En relación con este tema véase el apéndice XV.

¹ Es fácil ver que el error es \overline{PQ} , que, por cierto, es nulo cuando

$$\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\varepsilon_{Xcc}}{\varepsilon_{Rcc}}$$

En la práctica, la expresión [II-11.5] no es utilizable tratándose de factores de potencia inductivos bajos y de ciertas cargas capacitivas.

² También se obtiene de [II-11.4] recordando la expresión aproximada

$$(a + b)^{\frac{1}{2}} = a^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} a^{-\frac{1}{2}} b,$$

si $b \ll a$.

Ejemplo

Se trata de un transformador de 250 kVA con las siguientes características:

$$30\ 000/380\ \text{V}$$

$$\varepsilon_{cc} = 6\ \%$$

$$P_{Fe} = 650\ \text{W}$$

$$P_{Cu} = 3\ 900\ \text{W}$$

Se desean conocer las caídas internas de tensión, a plena y a media carga, con $\cos \varphi = 1$ y con $\cos \varphi = 0,8$.

No se dan los valores ε_{Rcc} ni ε_{Xcc} . En placa de características de un transformador ha de figurar ε_{cc} pero no sus componentes. Las pérdidas del transformador en sus arrollamientos (P_{Cu}) tampoco figuran en placa, pero constan en protocolos de ensayos, o se obtienen por el ensayo en cortocircuito.

Recuérdese (§ II-7.3) que

$$\varepsilon_{Rcc} = \varepsilon_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{\text{potencia nominal}} 100 = \frac{3\ 900}{250\ 000} 100 = 1,56\ \%$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \sqrt{6^2 - 1,56^2} = 5,8\ \%$$

Empleando la expresión aproximada [II-11.8], las caídas porcentuales son:

$\cos \varphi = 1$	$\frac{I_{2n}}{1,56}$	$\frac{I_{2n}/2}{0,78}$	$(U_2 = 377\ \text{V})$
$\cos \varphi = 0,8$	$4,72$	$(U_2 = 362\ \text{V})$	$2,36$

Obsérvese que, para $\cos \varphi = 1$, la caída de tensión aproximada (%), a plena carga, es igual a $\varepsilon_{Rcc} = \varepsilon_{Cu}$. Luego, y a base de la expresión aproximada, *la caída de tensión porcentual a plena carga, puramente óhmica, es, numéricamente, igual al valor porcentual de las pérdidas en el cobre.*

En virtud de las caídas internas de los transformadores, las relaciones de transformación nominales se suelen elegir de forma que tiendan a compensar las caídas en carga. En el ejemplo, y dados los tipos de carga previstos, pudo haberse adoptado

$$U_{2n} = 390\ \text{V} \quad 1$$

Ejercicio

¿Cuál es la máxima variación, entre vacío y plena carga, que cabe esperar en un transformador?

¿En qué condiciones se produce?

Basta observar la figura II-11,1 para comprender que la máxima variación de tensión se produce cuando la hipotenusa del triángulo de caídas de tensión (triángulo de KAPP) y los vectores U_1 y U_2 yacen en una misma recta. De ahí se deduce:

a) la máxima caída de tensión, referida al primario, es U_{cc} , mientras que, referida al secundario, es U_{cc}/r_1 .

b) esta caída se produce con el transformador a carga plena, cuyo factor de potencia inductivo sea,

$$\cos \varphi = \frac{U_{cc}}{U_R}$$

§ II-11.2. EFECTO FERRANTI.

A pesar de la expresión «caída de tensión», cuando la carga es capacitiva la tensión secundaria del transformador puede llegar a ser mayor que en vacío. Si se prefiere, dígame que la «caída de tensión» es negativa. Esto constituye el *efecto Ferranti*. Para la visión gráfica, en la figura II-11,2 se han trazado los diagramas en carga de un mismo transformador: a) con carga preponderantemente inductiva, b) con carga predominantemente óhmica, c) con carga básicamente capacitiva.

Por lo demás, estos resultados vienen dados por la expresión [II-11.5], basta tener presente que, establecida a base de la figura II-11,1, de referencia, tácitamente se ha convenido:

para cargas inductivas, φ positivo,

para cargas capacitivas, φ negativo.

Así resulta que, en la aludida expresión [II-11.5], para cargas capacitivas, el segundo sumando puede ser superior al primero y negativo.

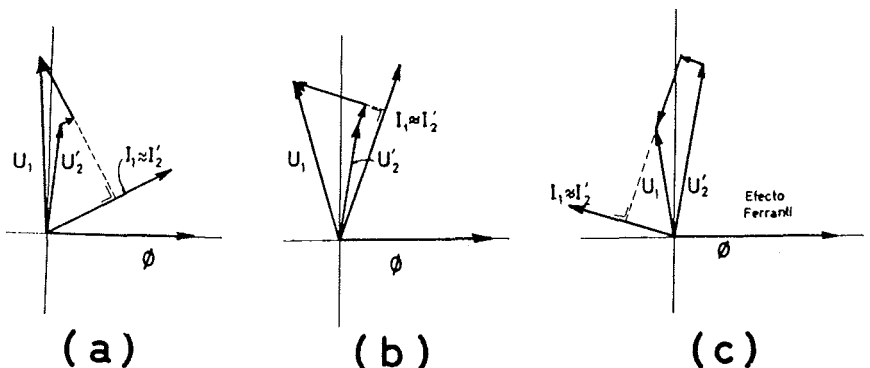


Fig. II-11,2

Queda para el lector hacer aparente el efecto FERRANTI, a base del diagrama vectorial en la forma de la figura II-4, 1a, y justificar que, con cargas inductivas, el flujo tiende a ser algo menor que en régimen de vacío. También que, con cargas capacitivas, tiende a ser mayor. Se entiende contando con que $U_1 = \text{constante}$. Igualmente, queda a cargo del lector, a base de estos diagramas, justificar que *las cargas inductivas son desexcitantes*. Con ello se quiere significar que los A_v motivados por la carga ($N_2 I_2$) tienden a disminuir el flujo principal (Φ), originado por $N_1 I_0$. Igualmente se verá que *las cargas capacitivas son excitantes*.

Ejemplo

Como continuación del ejemplo del apartado precedente, supóngase una carga, totalmente capacitiva, $I_2 = I_{2n}/2$.

La expresión exacta [II-11.7] da

$$\epsilon = -\frac{1}{2} 5,8 + 100 - \sqrt{100^2 - \frac{1}{4} 1,56^2}$$

Puede emplearse la expresión aproximada

$$\epsilon \approx -2,9\%$$

$$U_2 \approx 391 \text{ V}$$

§ II-12. Corriente de cortocircuito.

El cálculo de las corrientes de cortocircuito es de interés para el proyectista de transformadores y para el de instalaciones. En efecto, uno y otro han de prever tanto los efectos térmicos como los dinámicos que aquellas corrientes puedan ocasionar, y dimensionar las máquinas, instalaciones y protecciones de forma que los puedan resistir, respectivamente eliminar.

§ II-12.1. CORRIENTE PERMANENTE DE CORTOCIRCUITO.

Se sobreentenderá que los cortocircuitos son externos al transformador. También se supone que, cualquiera que sea la cuantía de la corriente primaria (I_1) que el transformador pueda tomar de la línea, la tensión U_1 se mantiene. Esto se expresa, brevemente, diciendo que, en la entrada del transformador, se dispone de *potencia infinita* ($S_{cc} = \infty$).

Dado el transformador de la figura II-12,1a, se produce el accidente llamado cortocircuito. El transformador se imaginará según su esquema equi-

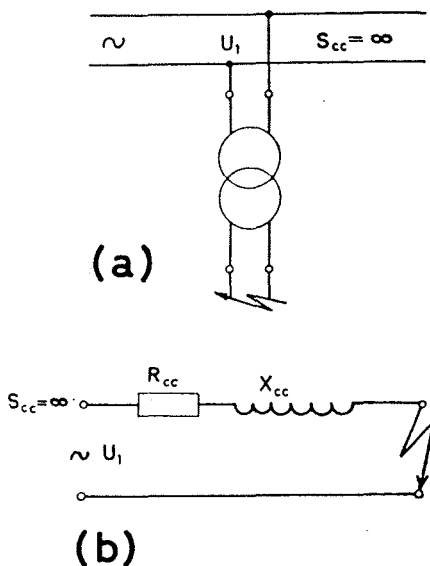


Fig. II-12,1

valente (figura II-12,1b). Hay que distinguir entre el ensayo de cortocircuito (§ II-7) y el accidente de cortocircuito:

	<u>tensión aplicada</u>	<u>corriente correspondiente</u>
ensayo de cortocircuito	U_{cc}	I_{1n}
accidente de cortocircuito	$U_1 = U_{1n}$	I_{cc}

Se ha designado por I_{cc} la corriente de cortocircuito que se desea conocer. Recuérdese que X_{cc} es constante (por serlo X_{d1} y X_{d2} , véase § II-2.2). Luego

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{1n}} = \frac{U_{1n}}{I_{cc}}$$

$$I_{cc} = \frac{U_{1n}}{U_{cc}} I_{1n}$$

Es sabido que la U_{cc} suele darse en tanto por ciento, referida a la tensión nominal

$$\varepsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_{1n}} 100,$$

resultando

$$I_{cc} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{1n}$$

Está claro que la corriente calculada es la de cortocircuito en el primario $I_{cc} = I_{cc,1}$. Si se desea la del secundario:

$$I_{cc,2} = I_{cc,1} r_t, \text{ o bien } I_{cc,2} = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} I_{2n}$$

Ejemplos

1.º Transformador 100 kVA, 10 000/500 V, $\varepsilon_{cc} = 4\%$

$$I_{1n} = 10 \text{ A} \quad I_{cc,1} = \frac{100}{4} 10 = 250 \text{ A}$$

$$I_{2n} = 200 \text{ A} \quad I_{cc,2} = \frac{100}{4} 200 = 5\,000 \text{ A}$$

2.º Transformador 10 000 kVA, 30 000/6 000 V, $\varepsilon_{cc} = 5\%$

$$I_{1n} = 333,3 \text{ A} \quad I_{cc,1} = \frac{100}{5} 333,3 = 6\,666 \text{ A}$$

$$I_{2n} = 1\,666,6 \text{ A} \quad I_{cc,2} = \frac{100}{5} 1\,666,6 = 33\,333 \text{ A}$$

3.º Transformador 10 000 kVA, 30 000/6 000 V, $\varepsilon_{cc} = 10\%$

$$I_{1n} = 333,3 \text{ A} \quad I_{cc,1} = \frac{100}{10} 333,3 = 3\,333 \text{ A}$$

$$I_{2n} = 1\,666,6 \text{ A} \quad I_{cc,2} = \frac{100}{10} 1\,666,6 = 16\,666 \text{ A}$$

En los ejemplos que preceden, pueden observarse (caso segundo) las elevadas intensidades permanentes de cortocircuito que se producen. Si se tiene presente que los efectos térmicos y los dinámicos crecen según el cuadrado de la intensidad, se comprenderá el interés en evitar valores tan cre-

cidos. En el ejemplo tercero se ve que, duplicando el valor ϵ_{cc} (10 %), se logra lo perseguido, lo que, en el caso concreto, se traduce en que aquellos efectos quedan reducidos a la cuarta parte de los valores anteriores. Esta es la razón por la que, en los transformadores grandes, suelen emplearse valores de ϵ_{cc} más elevados que en los pequeños:

- a) transformadores de distribución (50 ÷ 1 000 kVA) $\epsilon_{cc} = 3 \div 6 \%$.
- b) transformadores grandes (5 000 ÷ 50 000 kVA) $\epsilon_{cc} = 7 \div 13 \%$.

Por esta sencilla discusión, podría llegarse a la idea de que, en cualquier caso, son preferibles valores elevados de ϵ_{cc} . Téngase presente que, en el aspecto caída de tensión (§ II-11), y con el fin de que esta sea reducida, interesan valores pequeños para ϵ_{cc} . En definitiva, la asignación de la ϵ_{cc} , a un determinado transformador es el resultado del compromiso entre los dos aspectos señalados.

§ II-12.2. CORRIENTE TRANSITORIA DE CORTOCIRCUITO.

No habrá pasado desapercibido que las corrientes calculadas son los valores eficaces de la corriente permanente de cortocircuito. Ahora bien, según sea el momento de producción de la falta (cortocircuito), surgirá, con mayor o menor intensidad, la corriente transitoria¹

Es sabido que el momento más desfavorable es cuando E_2 pasa, aproximadamente, por su valor instantáneo nulo, véase figura II-12,2. Si se desprecia R_2 , así como la impe-

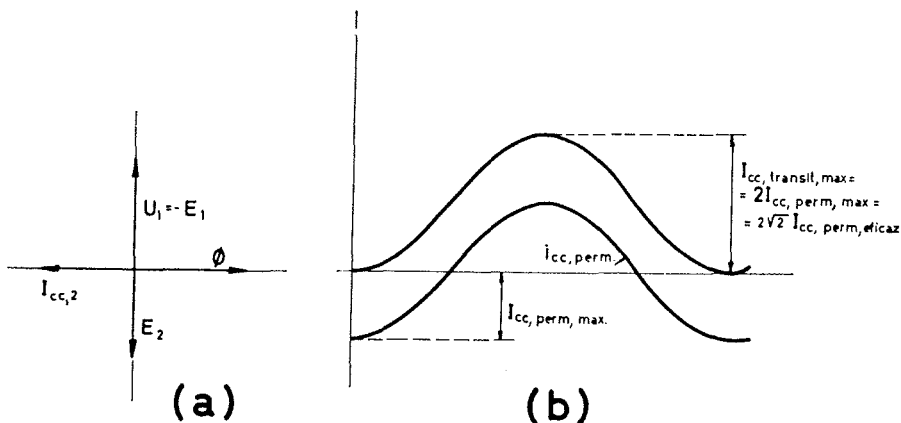


Fig. II-12,2

¹ El tema se desarrolla ampliamente en *Teoría de Líneas eléctricas* (volumen II) del autor.

21.5. Inductivo

dancia de la falta (circuito externo), el circuito secundario puede considerarse inductivo puro. En virtud de ello, la corriente debería estar atrasada $\pi/2$ en relación con la tensión. Ello significa que, suponiendo E_2 en un nulo ascendente, la corriente debería pasar por un máximo negativo (mínimo). Pero ocurre que, en el momento inicial de cortocircuito, $i_2 = 0$. Esto conduce, como sabido, a una corriente i_{cc} trasladada, según las ordenadas positivas, en cuantía $I_{cc,perm,max}$. Si este régimen persistiera (resistencias idealmente nulas), los valores de cresta de la intensidad de cortocircuito serían

$$I_{cc,transit,max} = 2 I_{cc,perm,max} = 2 \sqrt{2} I_{cc,perm} = 2 \sqrt{2} \frac{100}{\epsilon_{cc}} I_{2n}$$

En la práctica, cuando se presenta por primera vez tal máximo, o sea después de media onda (figura II-12,2), la corriente transitoria ha sufrido un sensible amortiguamiento, en virtud de que las resistencias no son despreciables.

§ II-13. Corriente de conexión de un transformador.

La aplicación brusca de la tensión nominal U_{1n} a un transformador (supóngase en vacío), puede motivar una elevada corriente transitoria i_0 . En ocasiones, se ha confundido con una corriente de cortocircuito. Se va a examinar.

Para mayor simplicidad, se supondrá un transformador ideal en el que $R_1 = 0$ y $P_{Fe} = 0$. Si, tal como se ve en la figura II-13,1a y a', se acierta a conectar en el instante en que $u_1 = U_{1m}$, ocurre que se entra, directamente, en el régimen permanente. En efecto, en tal momento, a la corriente i_0 y a Φ corresponden, según el régimen permanente, valores nulos, que son los que realmente poseen.

Por el contrario, si la conexión se realiza en el momento $u_1 = 0$ (ascendente), según figura II-13,1b y b', el flujo Φ , que inicialmente tiene el valor nulo, forzosamente tendrá que ser creciente durante una semionda ya que:

$$0 < t < \frac{T}{2}, \quad u_1 = \text{positivo}, \quad u_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{[II-13.1]}$$

Se ha querido dar la visión física. Más fácil es el planteo matemático:

$$u_1 = U_{1m} \text{ sen } \omega t = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{[II-13.2]}$$

$$\Phi = -\frac{U_{1m}}{N_1 \omega} \cos \omega t + K = -\Phi_m \cos \omega t + K$$

$$t = 0; \Phi = 0; K = \Phi_m$$

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m^1 \quad \text{[II-13.3]}$$

Resultado que se representa en la figura II-13,1b'.

1 Aún cabe que tal flujo tenga mayores crestas. Supóngase que en el núcleo del transformador que se va a conectar, existiese un flujo remanente Φ_r . La solución de la ecuación [II-13.2] sería

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_r + \Phi_m$$

La práctica demuestra que esta Φ_r puede llegar a valer (según tipo de chapa, ciclo de histéresis) hasta $0,5 \Phi_m$. En tal caso, el valor de cresta de $\Phi_{(transit)}$ puede ser

$$\Phi_r + 2 \Phi_m = 2,5 \Phi_m$$

Si se pasa de los flujos a las corrientes de excitación, i_0 , necesarias, según el método ya conocido (§ II-1), se ve (figura II-13,1b'') que las corrientes precisas son de consideración. Tanto así es que, en (b') no se alcanza a dibujar i_0 , como se ha hecho en (a'), por salirse del dibujo. Mediante nuevas escalas, tal corriente se ha dibujado en (c).

Por el hecho de no ser nula la resistencia R_1 del primario, estas corrientes se amortiguan y centran¹, según se ha representado en (c'), convirtiéndose en la corriente de exci-

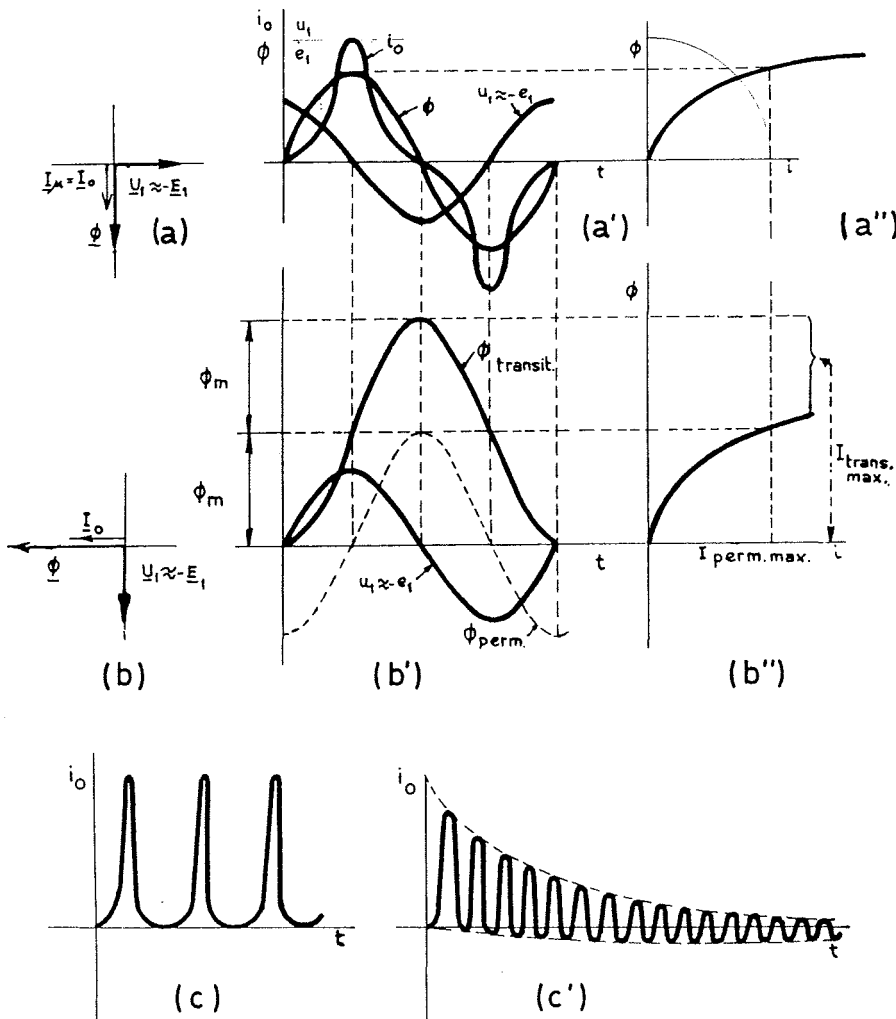


Fig. II-13,1

¹ Tiende a desaparecer la componente unidireccional, prácticamente en unas décimas de segundo. Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, § II,20, del mismo autor.

tación normal o de régimen. Nótese que, al disminuir los valores máximos del flujo, se alcanzan con valores moderados de i_0 , así que los de cresta de tal corriente decrecen notablemente.

Se comprende que este fenómeno será tanto más pronunciado cuanto más saturable sea el núcleo. Afortunadamente, el cierre del interruptor en el momento $u_1 = 0$ es raro ya que, próximos a cerrarse los contactos del interruptor, se ceba el arco.

Si la corriente de conexión es un elevado múltiplo de la $i_{0, perm}$, referida a la nominal del primario puede llegar a valer 2 o 3 veces su valor. En casos particulares incluso alcanza mayores valores.

Una forma de reducir estas corrientes, consiste en conectar el transformador a través de unas resistencias que se «puentean» tras breves instantes. No obstante, es una complicación que suele evitarse. Al tratarse de corrientes de poca duración (pocos periodos), es preferible disponer protecciones que no actúen rápidamente (con elementos eléctricos o no de frenado o retardo).

§ II-14. Trabajo en paralelo de transformadores monofásicos.

§ II-14.1 CONDICIONES BÁSICAS.

Dos o más transformadores *trabajan en paralelo* cuando sus arrollamientos del primario están conectados a una sola red, y los del secundario lo están a otra, también única.

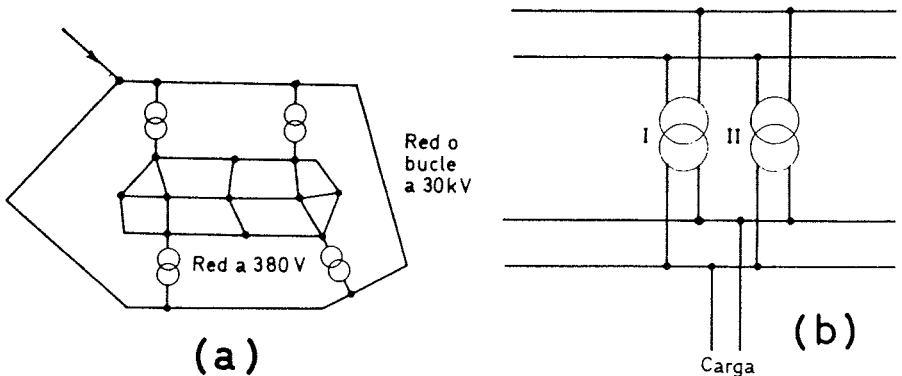


Fig. II-14,1

En la figura II-14,1a, se han representado, en esquema unifilar, dos redes¹ y, entre ellas, cuatro transformadores dispuestos en paralelo. En este ejemplo se supone que los transformadores están *eléctricamente distanciados*. Esto

¹ Se entenderá que las redes están constituidas por impedancias (de las líneas) que, por simplicidad, no se detallan en el esquema.

significa que les separan impedancias, apreciables, tanto en la red primaria como en la secundaria. Este caso se considerará más adelante.

En la figura II-14,1b, se imaginan dos transformadores en paralelo, dibujados en esquema bifilar. Además, se les supone *eléctricamente inmediatos*. Ha de entenderse que tanto en barras (línea) del primario, como en barras (línea) del secundario, las impedancias son despreciables en los trechos comprendidos entre los transformadores.

Para fijar ideas, supóngase:

Transformador I,

potencia nominal $S_{n,I} = 100 \text{ kVA}$,

tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc,I} \%$.

Transformador II,

potencia nominal $S_{n,II} = 200 \text{ kVA}$

tensión de cortocircuito $\varepsilon_{cc,II} \%$.

Además, imagínese que se aplica al secundario una carga de 75 kVA. Se considerará que el trabajo en paralelo es satisfactorio si las cargas de los transformadores son: $S_{\text{carga},I} = 25 \text{ kVA}$ y $S_{\text{carga},II} = 50 \text{ kVA}$. En general, el trabajo en paralelo es correcto si las cargas se reparten en proporción a las potencias nominales. Esta condición ha de persistir para cualquier carga, así, con la plena (300 kVA), ambos transformadores trabajarán con total aprovechamiento y sin sobrecargas.

Las condiciones básicas fundamentales para el correcto trabajo en paralelo de transformadores son:

1.º Que tengan idéntica relación de transformación (tolerancias pueden verse en el apéndice XI).

2.º Que posean iguales tensiones de cortocircuito (tolerancias en apéndice XI)¹.

La primera condición ya la requiere el buen trabajo en paralelo de transformadores en vacío. En la figura II-14,2 se representan los transformadores

¹ Adviértese que se refiere a transformadores monofásicos. Tratándose de trifásicos, hay que añadir una tercera condición, a saber, que los transformadores provoquen el mismo «desfase». Véase § III-7.

I y II, a los que se aplica la misma tensión primaria U_1 . Si las r_t discreparan, resultando, por ejemplo $U_{2I \text{ vacío}} > U_{2II \text{ vacío}}$, se originaría una corriente de circulación en los secundarios (a pesar del régimen de vacío) que motivaría otra en los primarios. Esto supondría pérdidas, evitables siendo iguales las r_t .

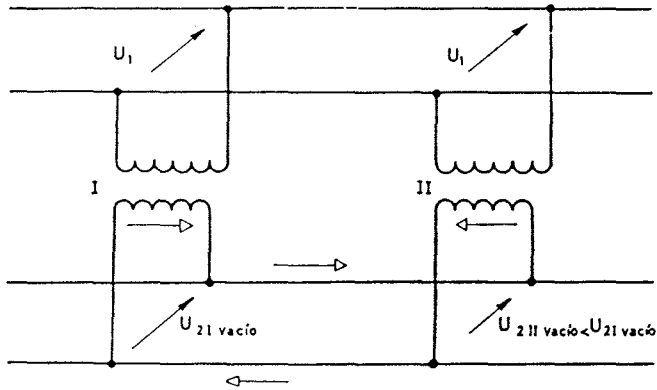


Fig. II-14,2

La segunda condición es requerida para el correcto funcionamiento en carga. En efecto, se supone cumplida la primera, $r_{tI} = r_{tII} = r_t$. Se va a razonar a base de esquemas equivalentes simplificados (§ II-6), según la figura II-14,3.

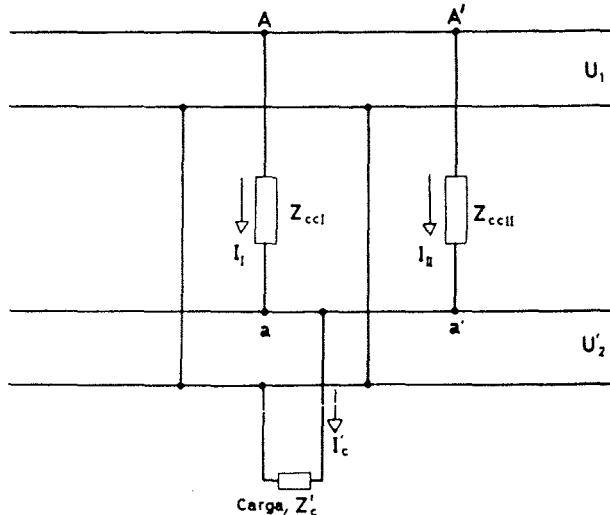


Fig. II-14,3

Al ser comunes las tensiones U_1 y U_2 , las caídas de tensión A-a y A'-a' han de ser idénticas,

$$I_I Z_{ccI} = I_{II} Z_{ccII}$$

Se entiende que I_I e I_{II} son las corrientes de carga, consecuencia de $Z_c (I_c)$. Siendo las corrientes nominales de los transformadores I_{nI} e I_{nII} ,

$$\frac{I_I}{I_{nI}} \frac{Z_{ccI}}{U_{1n}} I_{nI} 100 = \frac{I_{II}}{I_{nII}} \frac{Z_{ccII}}{U_{1n}} I_{nII} 100$$

$$C_I \epsilon_{ccI} = C_{II} \epsilon_{ccII} ; \frac{C_I}{C_{II}} = \frac{\epsilon_{ccII}}{\epsilon_{ccI}} \quad [II-14.1]$$

Luego, *los índices de carga* (intensidades de carga referidas a las nominales, véase § II-11) *son inversamente proporcionales a las tensiones de cortocircuito.*

Si $\epsilon_{ccI} = \epsilon_{ccII}$, $C_I = C_{II}$. Por lo tanto, sólo en este caso la repartición de cargas se realiza en la proporción de las potencias nominales, tal como se desea.

Notas

A. Obsérvese que si los transformadores no tienen iguales ϵ_{cc} , el más cargado (mayor C), es el de menor ϵ_{cc} (el más «duro»).

B. De A se deduce que, si dos transformadores no tienen iguales potencias ni idénticas ϵ_{cc} , es favorable que sea el transformador menor el que posea mayor ϵ_{cc} . En términos prácticos: *conviene que el transformador mayor sea el más «duro», a fin de que tome sobre sí la mayor carga porcentual.* Será el transformador más pequeño el mal aprovechado. Véanse próximos ejercicios.

C. Cabe el recurso de disponer una inductancia adicional al transformador con menor tensión de cortocircuito, véase § II-14.4.

D. En ocasiones, las reactancias de las conexiones (no iguales), motivan que dos transformadores idénticos no trabajen correctamente en paralelo.

Si los transformadores están *eléctricamente distanciados*, no hace falta ser tan rígidos en las condiciones para la puesta en paralelo (VDE 0532). Las corrientes de circulación resultan disminuidas por las reactancias de las líneas que, hasta aquí, se habían supuesto despreciables¹.

§ II-14.2 EJERCICIOS

Se recomienda la previa lectura de los ejercicios 1.º y 2.º del § II-7.1.

¹ Incluso si las tensiones de cortocircuito no son iguales, pueden, en cierto modo, compensarse mediante las relaciones de transformación (véase § IV-4, transformadores con tomas). Ciertamente tal compensación no es correcta para todas las cargas.

Ejercicio 1.º Potencia y tensión de cortocircuito correspondientes a un grupo de transformadores, con iguales ϵ_{cc} y r_t , trabajando en paralelo. Hay que interpretar, conservándose calentamientos máximos (o sea, sin sobrepasar las potencias nominales individuales).

Transformadores:

$$\text{I } S_{n,I} = 100 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,I} = 4 \%$$

$$\text{II } S_{n,II} = 200 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,II} = 4 \%$$

$$\text{III } S_{n,III} = 300 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,III} = 4 \%$$

Trabajarán correctamente en paralelo. Luego el grupo proporcionará, sin dificultad, $100 + 200 + 300 = 600$ kVA. En este caso es elemental deducir que la tensión de cortocircuito del grupo es 4%. No obstante, se practicará a base del concepto introducido en el ejercicio 1.º de § II-7.1.

La potencia del grupo a tensión de cortocircuito unitaria es, evidentemente,

$$S_{G, 1\%cc} = \frac{S_G}{\epsilon_{cc,G}} = \frac{S_{n,I}}{\epsilon_{cc,I}} + \frac{S_{n,II}}{\epsilon_{cc,II}} + \frac{S_{n,III}}{\epsilon_{cc,III}}$$

En el caso concreto,

$$\frac{S_G}{\epsilon_{cc,G}} = \frac{600}{\epsilon_{cc,G}} = \frac{100 + 200 + 300}{4 \%$$

$$\epsilon_{cc,G} = 4 \%$$

Luego, a igualdad de calentamientos, la potencia del grupo es la suma de potencias de las unidades, y la tensión de cortocircuito es igual a la de las unidades.

Ejercicio 2.º Caso de varios transformadores con diferentes tensiones de cortocircuito. Tensión de cortocircuito, del grupo de transformadores, a base de asignar a tal grupo una potencia igual a la suma de las potencias individuales.

Transformadores:

$$\text{I } S_{n,I} = 100 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,I} = 4 \%$$

$$\text{II } S_{n,II} = 200 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,II} = 5 \%$$

$$\text{III } S_{n,III} = 300 \text{ kVA} \quad \epsilon_{cc,III} = 6 \%$$

Potencia del grupo a tensión de cortocircuito unitaria,

$$S_{G, 1\%cc} = \frac{S_G}{\epsilon_{cc,G}} = \frac{100}{4} + \frac{200}{5} + \frac{300}{6} = 115 \text{ kVA} \quad (\epsilon_{cc} = 1 \%)$$

Mas, asignando al grupo la potencia 600 kVA, resulta

$$\epsilon_{cc,G} = \frac{S_G}{\frac{S_{n,I}}{\epsilon_{cc,I}} + \frac{S_{n,II}}{\epsilon_{cc,II}} + \frac{S_{n,III}}{\epsilon_{cc,III}}} = \frac{S_G}{S_{G, 1\%cc}} = 5,22 \%$$

Está claro que algún transformador trabajará sobrecargado, puede verse a continuación.

Ejercicio 3.º Potencias de carga de cada uno de los transformadores en el caso anterior (plena carga del grupo 600 kVA).

Es fácil ver que son:

$$S_{\text{carga, I}} = \frac{S_{n, I}}{\epsilon_{cc, I}} \epsilon_{cc, G} = 100 \frac{5,22}{4} = 130,5 \text{ kVA}; \text{ sobrecarga} = 30,5 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{carga, II}} = \frac{S_{n, II}}{\epsilon_{cc, II}} \epsilon_{cc, G} = 200 \frac{5,22}{5} = 208,5 \text{ kVA}; \text{ sobrecarga} = 8,5 \text{ kVA}$$

$$S_{\text{carga, III}} = \frac{S_{n, III}}{\epsilon_{cc, III}} \epsilon_{cc, G} = 300 \frac{5,22}{6} = \underline{261 \text{ kVA}}; \text{ t. desaprovechado}$$

$$\text{Potencia total del grupo} = 600 \text{ kVA}$$

Ejercicio 4.º Potencia del grupo, a base de que ningún transformador trabaje con sobrecarga.

Para que el transformador con menor tensión de cortocircuito (el más «duro») no resulte sobrecargado, el grupo (cada uno de los transformadores) ha de trabajar con tal tensión de cortocircuito (en el ejemplo $\epsilon_{cc, I} = 4\%$).

Las cargas máximas de cada unidad, y la total del grupo, son:

$$S'_{n, I} = \frac{S_{n, I}}{\epsilon_{cc, I}} \epsilon_{cc, I} = \frac{100}{4} 4 = 100 \text{ kVA}$$

$$S'_{n, II} = \frac{S_{n, II}}{\epsilon_{cc, II}} \epsilon_{cc, I} = \frac{200}{5} 4 = 160 \text{ kVA}$$

$$S'_{n, III} = \frac{S_{n, III}}{\epsilon_{cc, III}} \epsilon_{cc, I} = \frac{300}{6} 4 = \underline{200 \text{ kVA}}$$

$$S'_{n, I+II+III} = \dots\dots\dots = 460 \text{ kVA.}$$

$S'_{n, I+II+III}$ = potencia nominal del grupo, sin sobrecargas en los transformadores individuales (sin mayores calentamientos que los previstos).

El resultado anterior puede comprobarse obteniendo, directamente, la potencia de grupo sin sobrecargas (trabajando con la menor tensión de cortocircuito).

$$S'_{n, I+II+III} = \frac{600}{5,22} 4 = 460 \text{ kVA}; \epsilon'_{cc, G} = 4\%$$

Ejemplo 5.º Imagínense los siguientes transformadores:

	Potencia	ϵ_{cc} contratada	ϵ_{cc} efectiva
I	100 kVA	5 %	4,5 %
II	1 000 kVA	5 %	5,5 %

Nótese que las ϵ_{cc} efectivas (resultantes en los ensayos) están en el margen admitido por las tolerancias (véase apéndice XI).

El reparto de cargas será:

$$\frac{C_I}{C_{II}} = \frac{5,5}{4,5}; \quad C_{II} = C_I \frac{4,5}{5,5}$$

O sea que, cuando el transformador menor trabaja a su plena carga ($C_I = 1$), el mayor proporciona

$$S_{II} = 1\,000 \text{ kVA} \cdot C_{II} = 1\,000 \frac{4,5}{5,5} = 818 \text{ kVA}$$

Luego la pretensión de aumentar la capacidad de transformación de un transformador de 1 000 kVA, a base de agregar otro de 100 kVA, se traduce, realmente, en disponer de $818 + 100 = 918$ kVA.

Esta es una de las razones por las que no se recomienda disponer en paralelo dos transformadores con potencias muy distintas. Las normas *VDE* recomiendan no hacerlo con transformadores cuya relación de potencia exceda 3. Las recomendaciones *CEI* aconsejan la relación máxima 2.

Ejercicio 6.º Supónganse dos transformadores monofásicos en paralelo, ambos con $\epsilon_{cc} = 6\%$, que discrepan en un 3% en su relación de transformación. Hállese la corriente de circulación.

Da una buena visión gráfica el esquema de la figura II-14,4. En § II-6 se ha visto que los transformadores imperfectos pueden representarse por otros perfectos a los que se agregan las impedancias Z_{cc} .

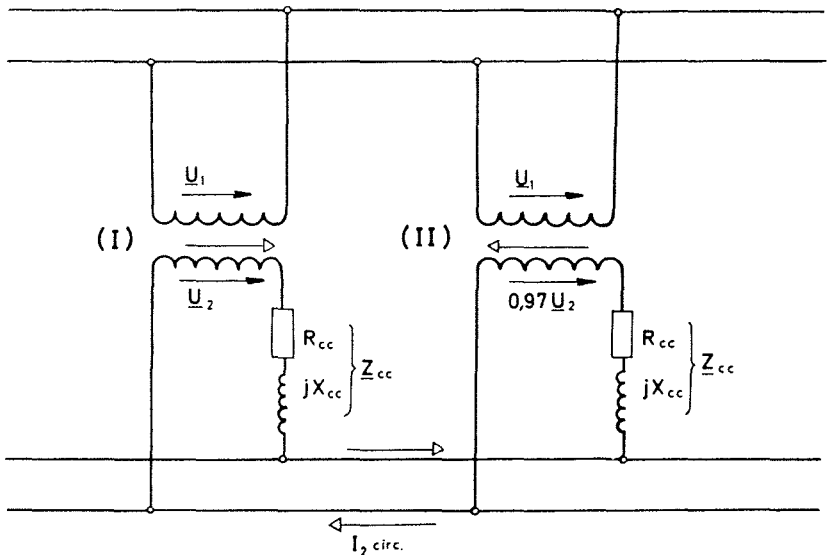


Fig. II-14,4

En estas condiciones, es fácil ver que la corriente de circulación en el secundario es

$$I_{2 \text{ circ}} = \frac{0,03 U_{2n}}{2 Z_{cc}} = \frac{0,03}{2} \frac{100}{\epsilon_{cc}} I_{2n} = \frac{0,03}{2} \frac{100}{6} I_{2n} = 0,25 I_{2n}$$

Luego la corriente de circulación es el 25 % de la corriente nominal, tanto en el secundario como en el primario.

§ II-14.3. INFLUENCIA DE LAS COMPONENTES DE LA TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO

Si bien se examina, se observará que las dos condiciones para el correcto trabajo en paralelo de transformadores monofásicos pueden reducirse a una:

Ha de verificarse que, estando alimentados los primarios por una misma tensión, y trabajando los transformadores con el mismo índice de carga (pero cualquier índice, desde vacío hasta plena carga), las tensiones en el secundario sean idénticas. Con ello se evitan las corrientes de circulación.

Está claro que la condición, única, anterior, se desdobra en dos. La primera es que las relaciones de transformación sean idénticas (tensiones secundarias en vacío iguales). La segunda es que las caídas de tensión internas, con idénticos índices de carga, sean iguales (tensiones secundarias en carga iguales).

Ahora bien, esto hace ver que, en realidad, la segunda condición debería, a su vez, desdoblarse. Las caídas de tensión internas tienen componentes óhmicas (R_{cc}) y componentes inductivas (X_{cc}). Pues bien, con iguales índices de carga, deberían ser iguales las caídas internas óhmicas, por un lado, y las inductivas por otro.

Véase la figura II-14,5. Para mayor claridad de la idea que aquí se desea destacar, se supondrá que los dos transformadores que van a trabajar en paralelo tienen iguales potencias. El lector puede, si lo desea, generalizar los razonamientos para el caso de transformadores con distintas potencias.

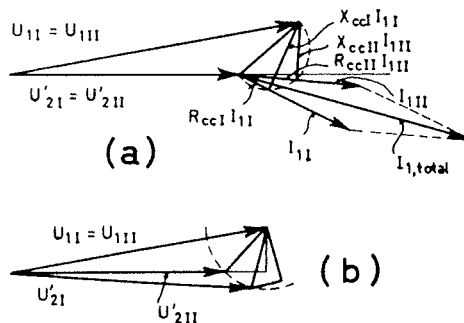


Fig. II-14,5

En (a) se ven los diagramas vectoriales de ambos transformadores en paralelo. Han de verificarse:

$$U_{1I} = U_{1II}$$

$$U'_{2I} = U'_{2II}$$

Por lo tanto, aún siendo $Z_{ccI} = Z_{ccII}$, si bien no $Z_{ccI} = Z_{ccII}$, se ve que $I_{II} \neq I_{III}$, aun cuando $I_{II} = I_{III}$ (esto último viene impuesto por [II-14.1]).

En conclusión, por cada uno de los transformadores circularán corrientes, en general, superiores a la mitad de I_1 total (rendimientos de transformación más desfavorables). El caso óptimo

$$I_{II} = I_{III} = \frac{1}{2} I_1 \text{ total,}$$

sólo se alcanza si $R_{ccI} = R_{ccII}$, y $X_{ccI} = X_{ccII}$, entonces

$$I_{II} = I_{III} = \frac{1}{2} I_1 \text{ total.}$$

Otra forma de exponer el caso se da en (b). Si, como se desea, las cargas fuesen idénticas, $I_{II} = I_{III}$, las caídas vectoriales serían distintas (aún siendo $Z_{ccI} = Z_{ccII}$, pero no sus componentes), y $V'_{2I} \neq V'_{2II}$, lo que daría una corriente de circulación.

La práctica demuestra que no suele ser indispensable imponer, según teoría, $R_{ccI} = R_{ccII}$ y $X_{ccI} = X_{ccII}$, siendo suficiente $Z_{ccI} = Z_{ccII}$. Esto es así en virtud de que las relaciones R_{cc}/X_{cc} no suelen diferenciarse excesivamente. Ahora bien, si los transformadores tienen potencias nominales muy dispares, aquellas relaciones llegan, por razones constructivas, a ser discrepantes en exceso (véanse valores en § II-7.1). Esta es la principal razón por la que, según se dijo, las normas *VDE*, recomiendan que la relación de potencias nominales no exceda 3, respectivamente las recomendaciones *CEI* limitan a 2.

§ II-14.4. CÁLCULO DE BOBINAS DE REACTANCIA ADICIONALES.

En el § II-14.1, nota C, se indicó que, al no ser idénticas las ϵ_{cc} de dos transformadores que han de trabajar en paralelo, cabe¹ añadir, al de menor ϵ_{cc} , una *reactancia adicional* en serie. Interesa determinarla.

Tras la discusión realizada en el § II-14.3, se volverá a estudiar la puesta en paralelo atendiendo, tan solo, a los módulos de las Z_{cc} , como es práctica corriente. Más aún, se sustituirán las Z_{cc} por sus componentes X_{cc} ².

En la figura II-14,6, se ha reproducido la II-14,3, con las sustituciones indicadas y añadiendo la *reactancia adicional* o *correctora* X_a . Véase, en tal figura, las simplificaciones efectuadas en las designaciones.

La condición relativa a la igualdad en las tensiones de cortocircuito establece

$$X_I I_I = (X_{II} + X_a) I_{II}$$

¹ Se supone cumplida la condición previa de igualdad en las tensiones nominales (relaciones de transformación).

² En los estudios de redes eléctricas, es muy frecuente, con finalidad simplificativa, sustituir las Z por sus X correspondientes. Ofrece la considerable ventaja de que, en elementos en serie, las impedancias totales se obtienen por sumas aritméticas.

En el caso concreto de los transformadores, en los que X_{cc} suele ser un múltiplo de R_{cc} , la sustitución de la hipotenusa Z_{cc} por el cateto mayor X_{cc} es, generalmente, aceptable.

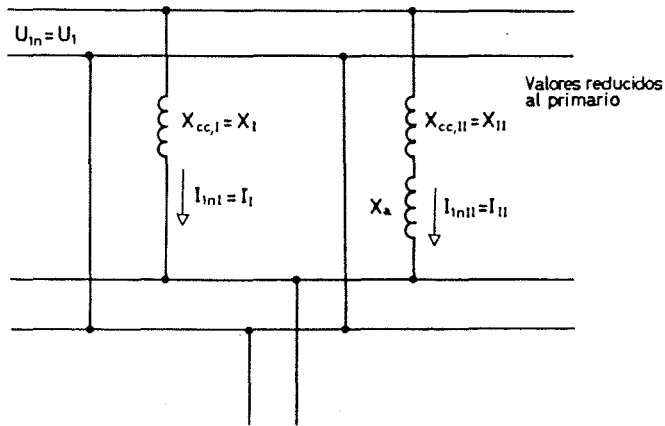


Fig. II-14,6

Luego

$$X_a = \frac{I_I}{I_{II}} X_I - X_{II}$$

Es frecuente que las bobinas de reactancia industriales no se califiquen por su inductancia sino por su potencia, teniendo presente su intensidad y su frecuencia nominales.

Potencia de la bobina adicional = S_{X_a}

$$S_{X_a} = X_a I_{II}^2 = (I_I X_I - I_{II} X_{II}) I_{II} =$$

[II-14.2]

$$= \left(\frac{I_I X_I}{U_1} 100 - \frac{I_{II} X_{II}}{U_1} 100 \right) \frac{U_1 I_{II}}{100} = \frac{\varepsilon_{ccI} - \varepsilon_{ccII}}{100} S_{II}$$

En el estudio de redes eléctricas, es corriente realizar los cálculos partiendo de las reactivancias expresadas en valores porcentuales, como aquí se hace con las de los transformadores. Adquirido el hábito de su manejo, el resultado [II-14.2] es evidente.

Ejemplo

En relación con los transformadores del ejercicio 5º del § II-14.2, la bobina adicional necesaria para el transformador «duro» es

$$S_{X_a} = \frac{5,5 - 4,5}{100} 100 = 1 \text{ kVAR}$$

§ II-15. Alteraciones de las principales características de un transformador de potencia al variar la tensión o la frecuencia aplicadas.

Reconsideréense los ejercicios y ejemplos del § II-1.5.

A título de ejercicio se va a razonar en casos concretos, pero además será fácil obtener conclusiones generales.

§ II-15.1. APLICACIÓN DE UNA TENSIÓN PRIMARIA QUE DIFIERA DE LA NOMINAL.

Se trata de un transformador con las siguientes tensiones nominales 30 000/480 V¹, las restantes características se dan seguidamente. Se piensa alimentar a 25 000 V, interesando deducir las nuevas características:

	nominales	a $U_1 = 25\ 000\ V$
U_1	30 000 V	25 000 V
U_2	480 V	400 V
Potencia	1 000 kVA	835 kVA
P_{Fe}	2 000 W	1 390 W
P_{Cu}	10 000 W	10 000 W
Rendimiento	98,8 %	98,6 %
ϵ_{cc}	6 %	7,2 % (25 kV, 835 kVA)
Corriente de vacío		disminuye

Se justifica como sigue. Al disminuirse la tensión aplicada, en igual proporción disminuyen Φ y B . Admitiendo la variación de las pérdidas en el hierro según B^2 , resultan $2\ 000 \cdot 25^2/30^2 = 1\ 390\ W$. Es cierto que esta disminución de pérdidas en el hierro, autoriza un ligero aumento de las pérdidas en el cobre². La nueva intensidad nominal I'_{1n} podría ser

$$\left(\frac{I'_{1n}}{I_{1n}}\right)^2 10\ 000 - 10\ 000 = 2\ 000 - 1\ 390$$

$$\frac{I'_{1n}}{I_{1n}} = 1,03$$

¹ Los valores que se dan responden a un transformador trifásico, pero todos los razonamientos son igualmente válidos para el caso de uno monofásico. El lector, si lo desea, puede suponer que lo es.

² Trasvases de pérdidas como el que se propone, hay que admitirlos con reservas. Si desde el punto de vista energético global, a los efectos de la refrigeración, son aceptables, excesivas pérdidas, no previstas, en el hierro o en el cobre, podrían motivar calentamientos locales inadmisibles.

Como se ve, el aumento (3%) es despreciable. Esto suele ser así por el hecho de que las pérdidas en el hierro son, normalmente, bajas y las del cobre elevadas. El escaso ahorro en pérdidas en el hierro se cubre con pequeños incrementos de la intensidad nominal, que afectan cuadráticamente a unas pérdidas elevadas. Por tal razón es frecuente que se acepte que *la intensidad nominal del transformador no sufre alteración.*

Admitido, simplistamente, lo anterior, resulta:

- a) la potencia decrece proporcionalmente con la tensión;
- b) las pérdidas en el cobre se mantienen;
- c) el rendimiento disminuye, así como el índice de carga óptima;
- d) la U_{cc} (valor absoluto) se mantiene, y la ϵ_{cc} (valor relativo) aumenta en proporción inversa a la U_1 .

No es lícito razonar análogamente al aumentar U_1 . Los transformadores suelen proyectarse a base de valores B relativamente elevados, incrementos notables de U_1 motivarían entrar en la saturación del núcleo, con crecidos valores de pérdidas en el hierro y de la corriente de vacío.

Las prescripciones *VDE* señalan que un transformador ha de poder dar su potencia nominal con tensiones de servicio comprendidas entre $\pm 5\%$ de la nominal.

§ II-15.2. ALIMENTACIÓN A BASE DE UNA FRECUENCIA MÁS ELEVADA QUE LA NOMINAL.

El transformador del precedente apartado está previsto para 50 Hz, se propone utilizarlo a 60 Hz, a base de aplicar al primario la tensión nominal 30 kV.

De acuerdo con la ecuación [I-1.2], y según puede verse en los ejercicios del § II-1.5, Φ y B variarán en proporción inversa a la frecuencia. Las pérdidas en el hierro disminuirán, si bien en proporción menor que el aumento de frecuencia¹. Por lo visto en el caso anterior, no cabe contar con un aumento notable en la intensidad nominal.

Del esquema de la figura II-3,4 (constancia de L_{d1} y L_{d2}) se deduce que, en proporción a f , aumenta X_{cc} .

Disminuirá la corriente de vacío, basta considerar que en el gráfico $B-H$, hay proporcionalidad entre H e i .

De las anteriores consideraciones, es fácil establecer, con carácter aproximado, las características:

	nominales	$f = 60 \text{ Hz}$
U_1	30 000 V	30 000 V
U_2	480 V	480 V
I_{1n}	se admite invariable	
Potencia	1 000 kVA	1 000 kVA
P_{Fe}	2 000 W	menores
P_{Cu}	10 000 W	10 000 W

¹ Se recuerda que las pérdidas en el hierro varían según las siguientes funciones:

$$P_{Fe \text{ histeresis}} \approx K_1 f B^2$$

$$P_{Fe \text{ corrientes parasitas}} = K_2 f^2 B^2$$

Rendimiento	98,8 %	mejorado
$\epsilon_{Rcc} = \epsilon_{Cu}$ según [II-7.4]	1 %	1 % ¹
ϵ_{Xcc}	$\sqrt{6^2 - 1} = 5,92$ %	7,1 %
ϵ_{cc}	6 %	$\sqrt{1 + 7,1^2} = 7,17$ %
Corriente de vacío		disminuye

Por el contrario, la aplicación de la tensión nominal, con una frecuencia sensiblemente inferior a la nominal, es prácticamente inadmisibles, ya que aumentaría B saturado al núcleo.

Como resumen, y con las consecuencias que se han visto, puede contarse con poder trabajar a base de tensiones primarias más bajas que las nominales y con frecuencias más elevadas, mas no lo contrario.

CAPÍTULO III

TRANSFORMACIÓN DE SISTEMAS TRIFÁSICOS

§ III-1. Bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos.

Por transformación trifásica se entenderá la de un sistema trifásico equilibrado de tensiones en otro sistema trifásico, también equilibrado. Se puede realizar mediante máquinas ya conocidas, los transformadores monofásicos. No obstante, existen otras, estáticas, especialmente concebidas para esta función, los *transformadores trifásicos*.

Por el momento, se tratará de la transformación trifásica a base de tres transformadores monofásicos idénticos¹. Se representan en la figura III-1,1a,

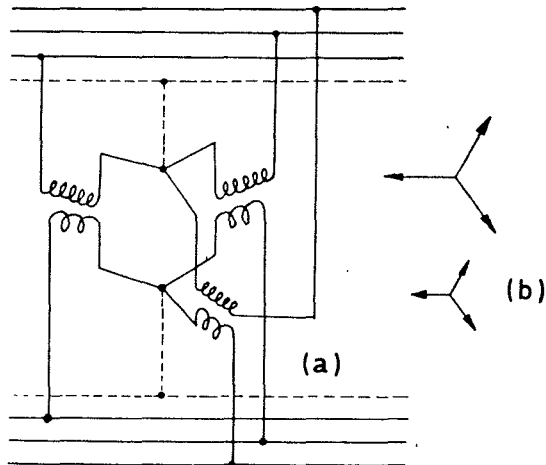


Fig. III-1,1

¹ Puede lograrse a base de dos transformadores monofásicos.

y para mayor sencillez no se han dibujado los núcleos, que el lector fácilmente imaginará. Tanto los primarios como los secundarios están conectados en estrella. Pueden existir neutros o no, en la figura están en trazos. Si al primario se le aplican las tensiones primarias equilibradas representadas en la figura III-1,1b, el secundario proporcionará otro sistema trifásico, semejante, según la relación r_t (la de los transformadores monofásicos).

También cabe conectar los transformadores monofásicos en triángulo. Un conjunto de tres transformadores monofásicos, conectados para realizar una transformación trifásica, constituye un *banco de transformación trifásica a base de transformadores monofásicos*. En la figura III-1,2, se han representado dos bancos, el primero con conexiones en estrella, el segundo en triángulo.

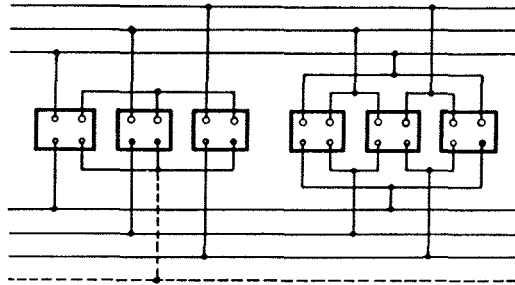


Fig. III-1,2

§ III-2. Transformador de tres columnas.

§ III-2.1. CONSTITUCIÓN.

Supóngase el banco de la figura III-2,1a, a base de cargas equilibradas en los secundarios. En (b) se han representado los vectores $-E_1$ de cada uno de los transformadores I, II y III (son aproximadamente los vectores U_1). También se han representado los flujos Φ_I , Φ_{II} y Φ_{III} . La suma

$$\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} = 0$$

Luego, si en (a) se fundieran en una las tres columnas centrales, por la resultante no circularía flujo alguno. Si por innecesaria se suprime, quedan los caminos magnéticos representados en (c), con notable ahorro de hierro, así como de las correspondientes pérdidas, en relación con (a).

No se olvide la constitución por láminas de los núcleos. Es evidente que la construcción según (c) ofrece dificultades. Supóngase que los núcleos I y

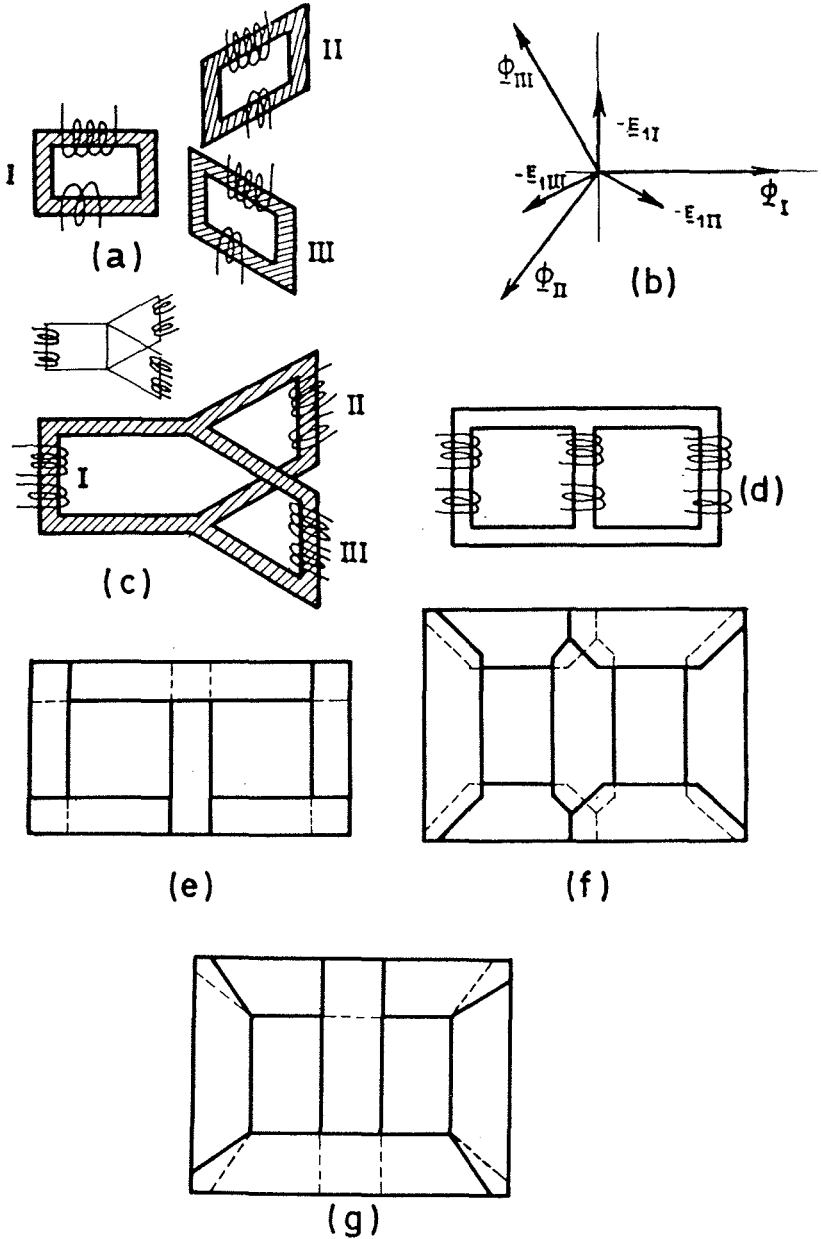


Fig. III-2,1

II se sitúan en un mismo plano, y que las culatas de III se van acortando (hasta anularlas), queda la configuración (d). La facilidad constructiva es evidente, se ha representado en (e), a base de la disposición al solape¹.

Se ha constituido el núcleo usual de los transformadores trifásicos. Los devanados pueden seguirse conectando en estrella o en triángulo, figura III-2,2a y b.

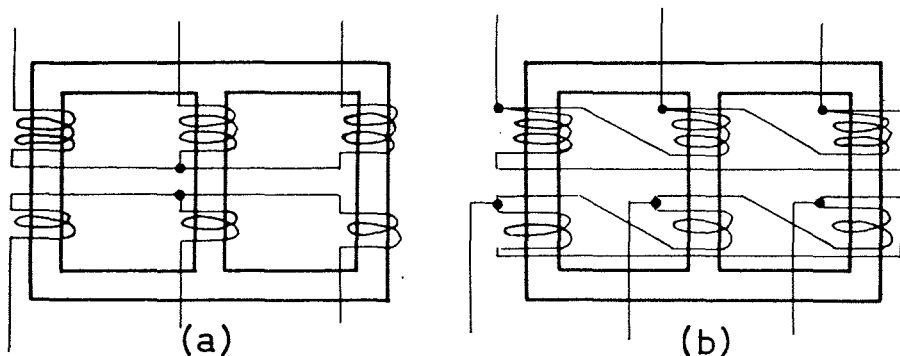


Fig. III-2,2

Con tal núcleo trifásico, se crea una asimetría en los circuitos magnéticos. Está claro que el correspondiente a la columna central es más corto (faltan las culatas), luego requiere menor corriente de excitación, i_0 . Esta asimetría es poco perceptible en carga, especialmente con chapas de grano orientado que requieren corrientes pequeñas de excitación².

Además, existen transformadores trifásicos con cinco columnas, véase § III-5.4.

§ III-2.2. PRIMERA COMPARACIÓN ENTRE LOS BANCOS TRIFÁSICOS Y LOS TRANSFORMADORES CON NUCLEOS TRIFÁSICOS.

Pudiera parecer que las ventajas de los transformadores trifásicos son decisivas. Ahorro de peso (hierro), que, al propio tiempo, comporta ahorro en pérdidas. No obstante, no está excluido el uso de bancos a base de transformadores monofásicos, si bien prácticamente se limita al caso de transformaciones de elevadas potencias.

No es posible aún dar una comparación completa entre los transformadores trifásicos

¹ Fácilmente se puede diseñar a base del *corte en diagonal*, análogamente a lo visto en la figura I-4,2h, o incluso con *corte diagonal al solape*, según figura III-2,1f, o, en forma más simple, según g.

² Si se desea evitar desequilibrios en las líneas, a las que se conectan varios transformadores, se cambiarán cíclicamente las conexiones: ABC (RST) BCA (STR), CAB (TRS), etc.

y los bancos a base de monofásicos ¹, no obstante se pueden formular consideraciones económicas suficientes para justificar ambas concepciones, que es lo que ahora se persigue.

La comparación económica es decisiva (coste inicial y pérdidas) en favor de los transformadores trifásicos, si tan sólo se consideran los elementos estrictamente necesarios para la transformación.

Si por motivos de seguridad se desea disponer de elementos de reserva ², la conclusión puede ser otra. Razones de seguridad pueden aconsejar disponer un segundo transformador trifásico en reserva (100%). Tratándose de un banco con transformadores monofásicos, cabe prever, para tal concepto, un solo transformador monofásico (reserva 33%). En tal caso, la segunda solución es más económica (en coste inicial). Tratándose de grandes unidades hay que considerar las posibilidades de transporte.

Con el grado de seguridad alcanzado con estas máquinas, adecuadamente controladas y protegidas, y con el empleo de los grandes transformadores móviles, hoy día se suelen reducir las unidades de reserva. El grado de seguridad que hay que dar al funcionamiento de una planta transformadora depende de variadas circunstancias económicas y técnicas. Entre estas últimas, por ejemplo, la posibilidad de suplir el servicio afectado por energía de otra procedencia.

§ III-3. Teoría de los transformadores trifásicos en régimen equilibrado³.

§ III-3.1. REDUCCIÓN AL CASO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

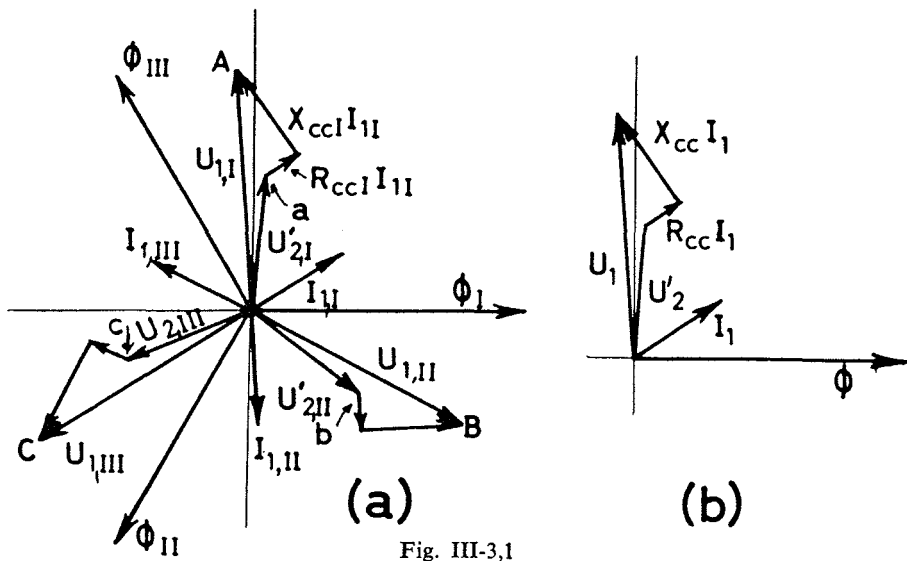


Fig. III-3,1

¹ Intervienen ciertos factores, aún no estudiados, tales como armónicos y comportamiento ante desequilibrios de cargas.

² Se entenderá elementos de reserva dispuestos para entrar en servicio en forma casi inmediata. De otra forma, cabe prever, simplemente, arrollamientos completos conservados dentro de depósitos con aceite.

³ El comportamiento de los transformadores ante condiciones de desequilibrio, puede verse en § III-5, § III-6, § III-8, y en el apéndice VI.

Lo mismo si se trata de bancos trifásicos como de transformadores con núcleos de tres columnas, su estudio teórico, en el caso de cargas equilibradas, se remiten al de los transformadores monofásicos. Los diagramas vectoriales suelen trazarse a base de tensiones simples, sea el neutro real o imaginario, es decir, se dibujan como si todos los transformadores tuviesen el conexionado estrella-estrella.¹

En la figura III-3,1a, se ha representado el diagrama vectorial en tales condiciones. Para no complicar, no se han trazado los triángulos de tensiones compuestas (ABC y abc), que fácilmente se suplen con la imaginación.

En lo sucesivo, se evitará la reiteración que se aprecia en la figura (con desfases de 120°), y nos limitaremos a dar el diagrama vectorial, a base de tensiones simples, de una de las fases (I), tal como en la figura III-3,1b.

§ III-3.2. ENSAYOS.

Los ensayos fundamentales son los mismos que en los transformadores monofásicos. Se modifican algunas expresiones en forma que es fácil imaginar, otras subsisten. Al transformador monofásico real (banco trifásico) o ideal (núcleos trifásicos o de cuatro o cinco columnas) se le asignará 1/3 de la potencia del trifásico.

Ensayo en vacío

A base de aplicar a uno de los arrollamientos el sistema trifásico de tensiones nominales, estando el secundario sin carga (en vacío).

Relación de transformación, $r_t = N_1 / N_2$, es la misma se refiera a tensiones compuestas o simples.

Pérdidas $P_0 \approx P_{Fe}$. Si se dan en valores absolutos (W), las del transformador monofásico son iguales a un tercio de las reales del trifásico. Expresadas porcentualmente conservan su valor (ϵ_{P_0} %).

Ensayo en cortocircuito³

Aplicando un triángulo equilibrado de tensiones ($U_{cc, compuesta}$) en el primario, que motive intensidades de corriente nominales, a base de que los bornes secundarios estén en cortocircuito:

$$\epsilon_{cc} (\%) = \frac{U_{cc, compuesta}}{U_{1n, compuesta}} 100 = \frac{U_{cc, simple}}{U_{1e, simple}} 100$$

¹ Téngase presente lo expuesto en *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § III-6.

² En los casos de conexiones estrella-estrella o triángulo-triángulo, En los casos de conexiones mixtas ya no es así. Se verá más adelante, § III-7.

³ Otro ensayo en cortocircuito, para la determinación de impedancias homopolares, puede verse en el apéndice VIII.

Pérdidas reales, $P_{cc} \approx P_{Cu} = 3 R_{cc} I_{1n}^2$

Pérdidas del t. monofásico ideal = $P_{cc} / 3$

El valor porcentual (ϵ_{Pcc}) es el mismo. $\epsilon_{Pcc} = \frac{P_{cc}}{2W_{1n}I_{1n}} = \frac{3R_{cc}I_{1n}^2}{2W_{1n}I_{1n}} = \frac{R_{cc}I_{1n}}{U_{1n}}$

Las relaciones [II-7.5], [II-7.2] y [II-7.3] pasan a ser:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}/3}{U_{cc, simple} I_{1n}} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_{cc, simple}} = \frac{\epsilon_{Pcc} (\%)}{\epsilon_{cc} (\%)} \quad [III-3.1]$$

$$\left. \begin{aligned} U_{Rcc} &= U_{cc} \cos \varphi_{cc} \\ U_{Xcc} &= U_{cc} \sin \varphi_{cc} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Tanto en valores trifásicos (tensiones} \\ \text{compuestas) como en monofásicos (ten-} \\ \text{siones simples)} \end{array} \quad [III-3.2]$$

$$\epsilon_{Rcc} \% = \frac{U_{Rcc}}{U_{1n}} 100 = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100 = \epsilon_{cc} \cos \varphi_{cc} \quad [III-3.3]$$

$$\epsilon_{Xcc} \% = \frac{U_{Xcc}}{U_{1n}} 100 = \frac{X_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100 = \epsilon_{cc} \sin \varphi_{cc}$$

Aquí también

$$\epsilon_{Rcc} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_{1n, simple}} 100 = \frac{R_{cc} I_{1n}^2}{U_{1n} I_{1n}} 100 = \frac{P_{Cu}/3}{S/3} 100 = \epsilon_{Cu} \quad [III-3.4]$$

A base de tensiones simples, subsiste el diagrama vectorial del ensayo en cortocircuito, según figura II-7,1c. En ocasiones, tal diagrama se usa empleando tensiones compuestas. En tal caso, téngase presente que las impedancias (figuradas) han de multiplicarse por tres.

§ III-3.3. ESQUEMAS EQUIVALENTES (régimenes equilibrados).

Suponiendo régimenes equilibrados, en relación con transformadores trifásicos estrella-estrella, se pueden trazar esquemas equivalentes análogos a los vistos en las figuras II-5,1e; II-6,1a,b; II-6,2a,b,c. Se tratará de uno de los esquemas monofásicos fase-neutro. Pártase de las tensiones simples (U_1, U''_2), de las intensidades de línea ($I_1 \approx I'_2$), y de los valores hallados Z_{cc}, R_{cc}, X_{cc} , si se desea uno de los esquemas simplificados. Si se requiere el esquema equivalente completo, hay que agregar el conocimiento de I_0, I_μ, I_{Fe} , procedente del ensayo en vacío. Con ello fácilmente se determinan R_{Fe} y X_μ^1 .

¹ En tal cálculo pueden desprejarse R_1 y X_{d1} , dada su pequeñez frente a lo que se calcula.

Siempre que el esquema se requiera en la forma de la figura II-5,1, es práctico y usual admitir

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R'_2 = R_{cc}/2 \\ X_{d1} &= X'_{d2} = X_{cc}/2 \end{aligned} \right\} R_{cc} \text{ y } X_{cc} \text{ del ensayo en cortocircuito.}$$

Mas generalmente serán suficientes las formas de la figura II-6,2a y b.

Si se trata de transformadores triángulo-triángulo, estrella-triángulo, o triángulo-estrella, previstos para trabajo en trifásico equilibrado, se procede de igual manera. Y aun cuando el neutro sea puramente ideal (dibújese en trazos), se trabaja con esquema fase-neutro (tensiones simples). Habrá que tener presente que tales conjuntos de conexiones pueden motivar desfases entre U_1 y U'_2 (se verá en § III-7, también en los cuadros de página 131 y apéndice IV). En tal caso, es útil emplear esquemas del tipo de la figura II-6,3, en los que, además de las r_t , se darán los desfases.

En el estudio de redes, en que existan transformadores, son preferibles, en ocasiones, *esquemas equivalentes en T*, también llamados *esquemas de tres terminales*. Pueden verse en la fig. III-3.3,1b. La correspondencia con el clásico es elemental. Se limita a:

$$R_3 = \frac{R_{Fe} X_{\mu}^2}{R_{Fe}^2 + X_{\mu}^2}; \quad X_3 = \frac{R_{Fe}^2 X_{\mu}}{R_{Fe}^2 + X_{\mu}^2}$$

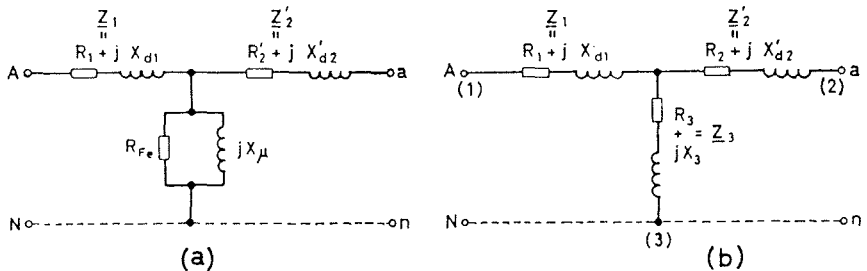


Fig. III-3.3,1

Ejemplo

Se trata de un transformador $\lambda \Delta$ de 100 MVA, 220/135 kV, con:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{Zcc} = 12,5\%; \quad P_{Fe} = 100 \text{ kW } (0,1\%); \quad P_{Cu} = 300 \text{ kW } (0,3\%)$$

$$\varepsilon_{Rcc} = \varepsilon_{Cu} = 0,3\% \quad (\text{véase [II-7.4]})$$

$$\varepsilon_{Xcc} = \sqrt{12,5^2 - 0,3^2} \approx 12,5\%$$

$$\text{Corriente nominal primaria } I_{1n} = \frac{100\,000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 263 \text{ A}$$

Además, procedentes del ensayo en vacío, se conoce la

$$\text{corriente de vacío } 26 \text{ A } (\approx 10\% I_{1n})$$

Con este dato, y P_{Fe} , se obtienen:

$$\cos \varphi_0 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 26} = 0,0101$$

$$\text{corriente de pérdidas, } I_{Fe} = 0,262 \text{ A } (\approx 0,01\% I_{1n})$$

$$\text{corriente magnetizante, } I_{\mu} \approx 26 \text{ A } (\approx 10\% I_{1n})$$

Las impedancias del esquema son:

$$R_{cc} = \frac{220\,000 \cdot 0,003}{\sqrt{3} \cdot 263} = 1,45 \Omega ; R_1 \approx R'_2 \approx 0,725 \Omega$$

$$X_{cc} = \frac{220\,000 \cdot 0,125}{\sqrt{3} \cdot 263} = 60,2 \Omega ; X_{d1} \approx X'_{d2} \approx 30,1 \Omega$$

$$R_{Fe} = \frac{220\,000}{\sqrt{3} \cdot 0,262} = 484\,000 \Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{220\,000}{\sqrt{3} \cdot 26} = 4\,900 \Omega$$

Con los elementos calculados se ha dibujado el esquema equivalente de la fig. III - 3.3,2a.

Resulta útil y cómodo representar el mismo esquema a base de valores porcentuales (ϵ_{Rcc} , ϵ_{Xcc}) (b). A tal fin, se define la llamada *impedancia base*.

$$Z_{base} = \frac{\text{Potencia base monofásica}}{I_{1n}^2} = \frac{100\,000\,000}{3 \cdot 263^2} = 483 \Omega$$

Los valores porcentuales correspondientes a R_{Fe} y X_{μ} se refieren a tal base.

En el estudio de redes complejas, resulta aún más cómodo dar los valores en tanto por uno (*valores unitarios*). Así resulta el esquema (c).

Finalmente, en (d) se da el esquema en T, a base de valores unitarios.

El lector no va a apreciar aquí el interés de los esquemas con valores relativos. Las ventajas de tales esquemas con valores unitarios o porcentuales no se acusan más que cuando se trata de sistemas algo complicados con diversas tensiones. No se olvide que al realizar la reducción a una determinada tensión, los valores ϵ no se alteran. En cualquier caso, una ventaja del uso de los valores porcentuales o unitarios consiste en que, en los diversos trans-

formadores que se presentan en la práctica, tienen valores de un mismo orden de magnitud¹. Esto permite, cuando se desconoce alguno de ellos, suplirlo por uno supuesto.

Véase § III-11.

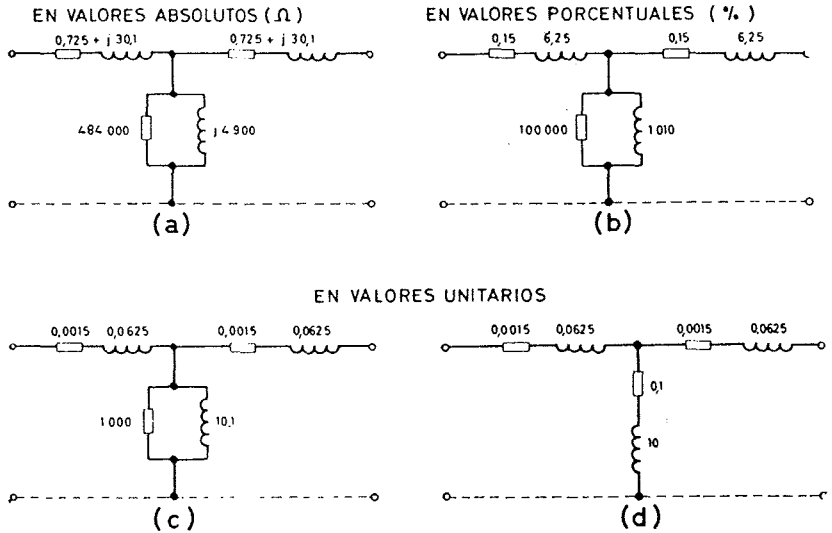


Fig. III-3.3,2

§ III-4. Armónicas en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones.

§ III-4.1. BANCOS TRIFÁSICOS A BASE DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Se van a estudiar, con atención, las corrientes de excitación. Para ello se considerarán transformadores en vacío.

Supóngase que los circuitos eléctricos se han conectado en estrella, según figura III-1,2 izquierda, o III-4,1b; cada transformador monofásico requiere, para su magnetización (formación de su flujo alterno), una tercera armónica de intensidad (véase § II-1). En la figura III-4,1a, se han dibujado las tres senoides de corrientes de excitación (I_{0I} , I_{0II} , I_{0III}), con sus corres-

¹ Para un tipo de potencias y tensiones, los valores varían bastante poco, aun cuando pueden depender de la concepción del transformador, visto el uso que se le prevé.

pendientes terceras armónicas. La inspección de tal figura pone de relieve que las terceras armónicas están en fase (pulsan a un tiempo), en otras palabras, son homopolares¹. Por lo tanto, por el neutro N retorna una corriente, I_{0N} , igual a tres veces la de una de las tres fases (primera ley KIRCHHOFF aplicada al punto neutro (N), y propiedad característica de las corrientes homopolares). Las ondas fundamentales, por el contrario, se anulan en su retorno por el neutro.

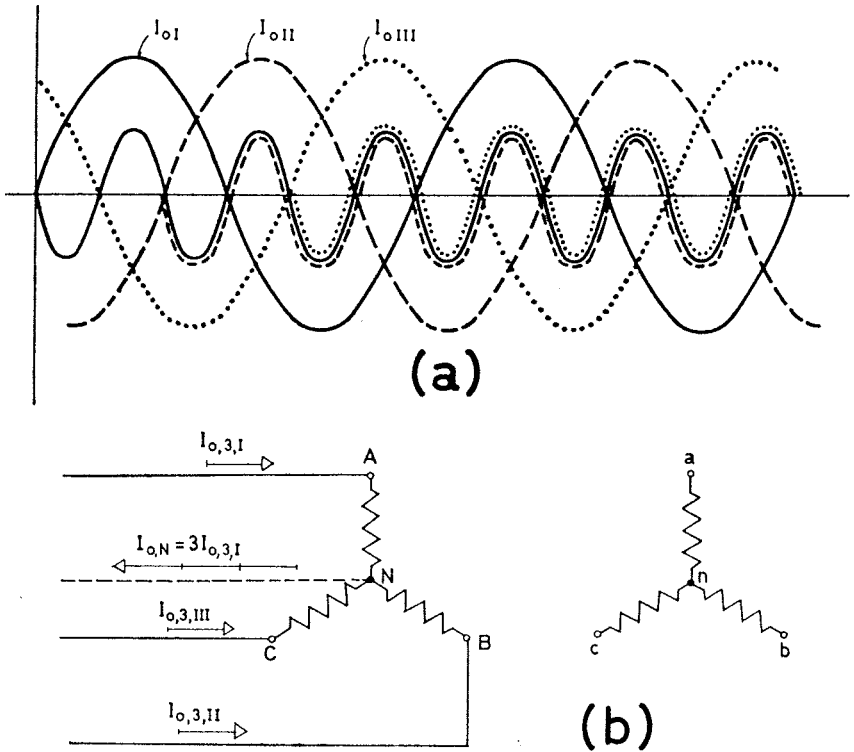


Fig. III-4,1

§ III-4.2. SUPRESIÓN DE NEUTROS DE RETORNO EN LÍNEAS PARA ALTA TENSIÓN.

La circulación, en líneas aéreas, de una tercera armónica de corriente ($3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$) (por las fases, con su retorno por el neutro) tiene el inconveniente de que, siendo la frecuencia 150 Hz audible, puede interferir (por inducción mútua) con líneas telefónicas paralelas cercanas.

¹ Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, § VI-1, del mismo autor.

Otro inconveniente de la circulación de terceras armónicas de corriente por las líneas y sistemas eléctricos, en general, es que deforman las tensiones haciéndoles perder su carácter senoidal. El proceso es el siguiente. Imagínese una central generadora de tensiones trifásicas, que se suponen perfectamente senoidales. Alimenta una línea que permite la circulación de las terceras armónicas, por existir neutro de retorno (por ejemplo, están puestos a tierra los puntos neutros del generador y del transformador de final de línea). Las corrientes de vacío del transformador circulan por el generador y por la línea, y, en consecuencia, ocasionan caídas de tensión, en virtud de las resistencias e inductancias de la línea, y de las internas (por fase) del generador. Las caídas de tensión (en cada fase) motivadas por las ondas fundamentales de las corrientes de excitación, son senoidales (50 Hz y desfasadas 120°). Por lo tanto, las tensiones al final de la línea, aun cuando distintas de las de principio de línea, seguirían siendo senoidales. Pero las terceras armónicas de corriente (homopolares) ocasionarán caídas de tensión homopolares, que deformarán las tensiones simples de final de línea, dejando de ser senoidales.

La relativa pequeñez de las terceras armónicas de las corrientes de vacío, pueden hacer pensar que tal efecto será de escasa consideración. Mas hay que tener presente que las reactivancias inductivas, interna del generador y de la línea, adquieren mayor importancia al tratarse de terceras armónicas (150 Hz) y superiores. Además, siendo corrientes homopolares, interviene la impedancia de retorno del neutro $3Z_n$ ¹.

La asimetría de los núcleos trifásicos hace que las tres corrientes de excitación no sean iguales, y tampoco las terceras armónicas correspondientes. Consecuencia, por tal razón hay alguna circulación de terceras armónicas por la línea, aun sin existir neutro de retorno. Para evitarlo se puede recurrir al cambio cíclico de conexiones (ABC, BCA, CAB), al conectar cada uno de los transformadores.

Por los motivos (que el lector puede omitir) explicados en los párrafos precedentes, en las líneas de alta tensión no se suele disponer neutro de retorno.

Si se suprime el neutro de retorno, las ondas fundamentales continuarán circulando, ya que

$$I_{0, I} + I_{0, II} + I_{0, III} = 0,$$

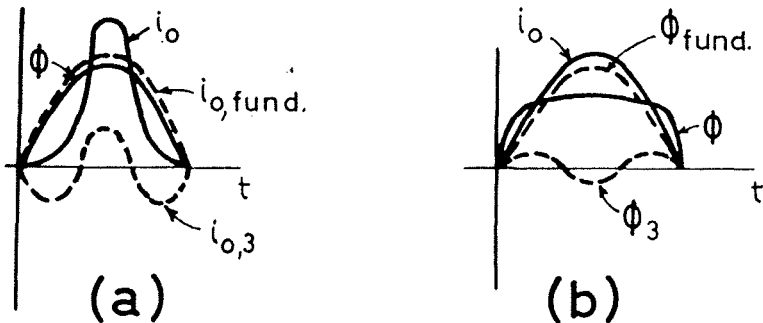


Fig. III-4,2

¹ Véase *Teoría de Circuitos, fundamentales*, del mismo autor, § IV-8.

no así sus correspondientes terceras armónicas, pues

$$I_{0,3,I} = I_{0,3,II} = I_{0,3,III} = \frac{1}{3} I_{0,3,N} = 0$$

La no existencia de terceras armónicas en la corriente de excitación, implica que el flujo Φ (y la inducción B) dejen de ser senoidales, según puede verse en la figura III-4,2b (onda de flujo rebajada). La nueva onda de flujo (Φ) puede descomponerse en una onda fundamental más una tercera armónica¹.

La consecuencia de lo visto es que, al no ser senoidales los flujos, tampoco lo serán las f.e.m. inducidas en los secundarios. El banco trifásico se habrá convertido en un generador de armónicas de tensión. Es fácil ver que las terceras armónicas de las f.e.m. secundarias estarán en fase.

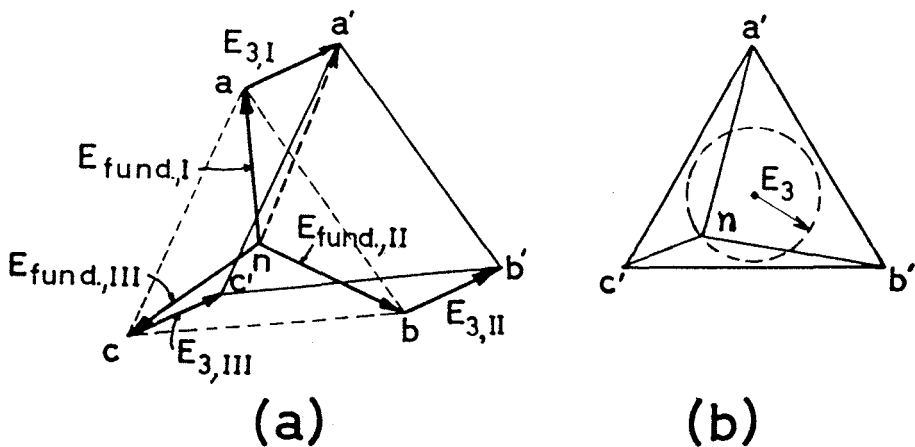


Fig. III-4,3

En la figura III-4,3a se han representado las f.e.m. inducidas en el secundario, ondas fundamentales y terceras armónicas. Las fundamentales dipuestas a 120° y las terceras armónicas en fase. No es corriente el uso del plano de GAUSS² para representar simultáneamente vectores con distinta frecuencia. En general no es práctico, ya que unos vectores tendrán movimiento respecto a otros. Excepcionalmente se hace en la figura III-4,3.

Si se suponen quietos los fundamentales (50 Hz), por ejemplo porque los observadores giramos con ellos, se verá a los vectores terceras armónicas

¹ En general existen otras armónicas de flujo, aunque solamente impares dada la simetría de semionda, véase *Análisis de Fourier y cálculo operacional aplicados a la electrotecnia*, del mismo autor. En lo que sigue, únicamente se considerarán, por simplicidad, las terceras armónicas.

² Plano donde se representan los vectores giratorios.

(subíndices 3, 150 Hz) girando a razón de cien vueltas por segundo. Imagínense, pues, en la figura III-4,3, quietos el neutro (n), los vectores simples fundamentales, y los correspondientes compuestos. Por el contrario, giran, a razón de cien vueltas por segundo, los vectores (3), con centros en a, b y c . Como consecuencia, todos los puntos del triángulo final de tensiones compuestas están sujetos a movimientos circulares. Se acaba de dar una visión, en ocasiones es mejor otra, supóngase quieto el triángulo final a que se ha aludido, en tal caso, el punto neutro (n) se moverá según una circunferencia de radio E_3 , véase figura III-4,3b.¹

La interpretación física la habrá visto el lector. Las tensiones simples del secundario del transformador (recuérdese que está conectado en estrella) son na' , nb' , nc' de la figura (a). Son vectores que no giran uniformemente alrededor de n , y, además, no tienen longitud constante. Las proyecciones sobre el eje de referencia (valores instantáneos) son algo complicadas (suma de una onda fundamental más tercera armónica). Por el contrario, las tensiones compuestas $a'b'$, $b'c'$, $c'd'$, forman un triángulo indeformado, cuyos lados tienen longitudes constantes, y giran uniformemente. Luego sus proyecciones sobre el eje fundamental son senoides puras. En resumen, en las tensiones compuestas no existen terceras armónicas de tensión. En la interpretación (b) se ve un triángulo de tensiones compuestas normal, cuyo punto neutro n , «intranquilo», se mueve uniformemente según un círculo.

Estas son las consecuencias del empleo de un banco trifásico a base de transformadores monofásicos, si no se dispone conductor neutro en el primario, siempre que los transformadores lleguen a trabajar en la zona de saturación.

Nótese que la existencia de armónicas de tensión se apreciaría mediante un oscilógrafo que (figura III-4,1) se conectase, por ejemplo, entre los bornes n y a , mas no si se conectara entre a y b .

Lo anterior equivale a decir que en el secundario del banco trifásico aparecen sobretensiones (en las tensiones simples), que pueden ser fácilmente de consideración. Por tal razón, hay que proyectar los transformadores monofásicos con inducciones, B , relativamente bajas, lo que supone encarecimiento de los aparatos.

¹ Si se forma un neutro artificial, mediante una bobina trifásica en estrella conectada en $a' - b' - c'$, la tensión de tal neutro artificial, respecto a tierra, sería, en todo momento, la de la tercera armónica, en el supuesto de que el neutro secundario del transformador estuviera puesto a tierra.

Inversamente, si el punto neutro n del transformador no está puesto a tierra, la tensión entre ésta y aquél viene dada por la tercera armónica estudiada. Basta tener presente que, en tal caso, las capacidades de las tres fases (a , b y c) de la línea hacen de la tierra un neutro artificial n' . Luego la tensión $n' - n$ es la de la tercera armónica.

§ III-4.3. CORRIENTES DE EXCITACIÓN EN LOS TRANSFORMADORES CON NÚCLEO TRIFÁSICO.

Se sigue suponiendo que las conexiones de los arrollamientos son en estrella, según figura III-2,2a. También que, por las razones expuestas en § III-4.2 (que el lector puede omitir), no se dispone neutro en la línea de alimentación del primario. Por lo tanto, no circularán terceras armónicas de corriente de excitación.

Si el núcleo es trifásico, la diferencia respecto al caso anterior es que (figura III-2,1c) se ha suprimido la cuarta columna de retorno. Esta supresión se fundaba en que $\Phi_I + \Phi_{II} + \Phi_{III} = 0$. Esto sigue siendo cierto en lo que se refiere a los flujos fundamentales, pero no en lo que concierne a las terceras armónicas de flujos, que pulsan a un tiempo (están en fase). Tienen a retornar por la cuarta columna. Pero esta es el aire, lo que significa que los circuitos magnéticos, para las terceras armónicas de flujos, tienen gran reluctancia. Por lo tanto, apenas existirán terceras armónicas de flujos, y las que débilmente subsistan retornarán por el aire (en parte cerrándose por la caja del transformador).

Resumiendo: a) la falta de conductor neutro en la línea de alimentación del primario, impide la circulación de las terceras armónicas de corriente de excitación, que, así, no pueden existir; b) la carencia de la cuarta columna es obstáculo para la existencia de terceras armónicas de flujos de cuantía.

Aquí, aparentemente, se presenta un hecho paradójico. La corriente de excitación y el flujo están relacionados, en los transformadores monofásicos, según el gráfico figura II-1,2, lo cual significa que, si la corriente no tiene tercera armónica, la tiene el flujo (figura III-4,2b y a), o viceversa. Y, no obstante, en nuestro caso carecen de terceras armónicas tanto las corrientes de excitación como los flujos. La paradoja no es tal, si se advierte que la supresión de la cuarta columna significa que el circuito magnético adquiere característica lineal (reluctancia del aire), por lo tanto, ya no entra en consideración la figura II-1,2, siendo compatibles flujos y corrientes prácticamente sin terceras armónicas.

La consecuencia, de orden práctico, es que las tensiones simples secundarias no presentan terceras armónicas de gran consideración, aun cuando se proyecte para trabajo en la zona de saturación.

§ III-5. Estudio de transformadores trifásicos estrella-estrella con cargas desequilibradas¹.

§ III-5.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

Es útil analizar el comportamiento de los transformadores trifásicos al aplicarles cargas desequilibradas. En la práctica, tales cargas se evitan, en la medida posible, ya que, aparte otros inconvenientes que pueden ofrecer, según se va a ver, en cualquier caso significan mala utilización de los transformadores, al no poder trabajar todas sus fases a plena carga². No siempre es posible lograr equilibrios de carga completos. En particular, son cargas desequilibradas los cortocircuitos asimétricos. En un primer estudio, el lector puede prescindir de las justificaciones y tomar nota de las conclusiones de valor práctico.

Para más fácil comprensión de los fenómenos propios del desequilibrio, y con el fin de que no interfieran otros efectos que obscurecerían, se formulan las siguientes hipótesis simplificadoras (transformador ideal o perfecto):

- 1.^a Se consideran inexistentes las caídas de tensión internas (óhmicas e inductivas).
- 2.^a Frente a las corrientes de carga, se despreciarán las corrientes de excitación. Ello equivale a suponer:
 - a) que no existen pérdidas en el hierro ($I_{Fe} \approx 0$);
 - b) que las reluctancias magnéticas de los circuitos son infinitamente pequeñas ($R_m \approx 0$), en cuyo caso las I_μ , necesarias para crear los flujos en vacío, son prácticamente nulas, aun no siéndolo los flujos.
- 3.^a Se imaginará un transformador relación 1/1, o, si se prefiere, con secundario reducido al primario. Es más, se supondrá $N_1 = N_2 = 1$.

§ III-5.2. CARGA ENTRE FASE Y NEUTRO EN UN TRANSFORMADOR ESTRELLA-ESTRELLA CON NÚCLEO TRIFÁSICO.

Se supone que al primario no va conductor neutro ya que, según § III-4.2, no es aconsejable³. Es el caso representado en la figura III-5,1. Ante todo,

¹ En el § III-8 y en el apéndice VI se estudiarán desequilibrios con otras conexiones.

² No sólo a los transformadores pueden causar perjuicio las cargas desequilibradas, también a otros elementos. Imagínese un generador, aunque sea sin neutro, cargado desequilibradamente. Al no haber corriente por el neutro, no existe componente homopolar, pero al haber desequilibrio, ello significa que admite descomposición en un sistema directo más otro inverso. El sistema inverso de corriente motiva, en el generador, calentamiento en el inductor y en los circuitos amortiguadores.

³ Si el primario estuviese conectado a un conductor neutro, con posibilidad de retorno de corriente, esta carga desequilibrada no causaría perjuicio. En tal caso, tanto el primario como el secundario quedarían cargados en una sola fase. El transformador trifásico trabajaría como monofásico, con los flujos compensados.

imagínese el transformador en vacío. Independientemente de los valores R_m , se establecerán los flujos comunes, determinados por las tensiones aplicadas. Se tiene un estado físico de equilibrio, tanto en los circuitos eléctricos (primario) como en los magnéticos.

Entre b y n se dispone cualquier carga $i_2 = 100$ (de referencia). Esto altera el equilibrio, por lo que, tras un estado transitorio, se establece otro, permanente, que se ha representado en la figura y se consigna en las conclusiones.

Las ecuaciones que definen el nuevo estado son: una de naturaleza electrocinética, y dos relativas a los circuitos magnéticos. En la figura III-5,1a, se han indicado las flechas de valoración (\rightarrow), arbitrariamente adoptadas. Se supone que el sentido instantáneo de la corriente de carga ($i_c = i_{2,II} = 100$), en un momento determinado, coincide con el indicado por su flecha de valoración (para mayor sencillez).

Primera ley de KIRCHHOFF en el primario (no existiendo neutro de retorno),

$$i_{1,I} + i_{1,II} + i_{1,III} = 0 ; I_{1,I} + I_{1,II} + I_{1,III} = 0$$

En cualquier anillo (trayecto cerrado) del núcleo ferromagnético trifásico se verifica, aproximadamente,

$$\Sigma \text{ fuerzas magnetomotrices} = \Sigma \Phi R_m \approx 0^1$$

Teniendo en cuenta $N_1 = N_2$, lo anterior permite escribir, figura III-5,1a,

$$i_{1,I} - i_{2,II} - i_{1,III} = 0^2 ; I_{1,I} - I_{2,II} - I_{1,III} = 0$$

$$i_{1,I} - i_{1,III} = 0^2 ; I_{1,I} - I_{1,III} = 0$$

Sumando las tres ecuaciones, se deduce

$$\begin{array}{l}
 i_{1,I} = \frac{i_{2,II}}{3} = 33,3 \\
 \text{Y, seguidamente,} \\
 i_{1,III} = i_{1,I} = 33,3 \\
 i_{1,II} = -i_{1,I} - i_{1,III} = -66,6
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} i_{1,I} = \frac{i_{2,II}}{3} = 33,3 \\ i_{1,III} = i_{1,I} = 33,3 \\ i_{1,II} = -i_{1,I} - i_{1,III} = -66,6 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 I_{1,I} = 33,3 \% I_{2,II} \\
 I_{1,III} = 33,3 \% I_{2,II} \\
 I_{1,II} = -66,6 \% I_{2,II}
 \end{array}$$

Para más fácil visión, en la figura III-5,1b, se han dibujado las flechas (\rightarrow) de las corrientes con los verdaderos sentidos que les corresponde en el instante considerado.

Con el fin de ver lo que sucede en los circuitos ferromagnéticos, los resultados precedentes están gráficamente dados en la figura III-5,1c. Nótese que, en cada anillo, se compensan las f.m.m. No ocurre lo mismo en cada columna. Más concretamente, todas las columnas tienen una f.m.m. resultante de igual sentido y valor 33,3 ($N_1 = N_2 = 1$). La conclusión

¹ Ya que, de acuerdo con la hipótesis 2b, $R_m \approx 0$.

² Dicho de otra forma, las Σ f.m.m. adicionales en cada columna tienen que ser iguales. Si no fuese así, se originarían flujos de circulación suplementarios, incompatibles con el supuesto de que al primario del transformador se aplica un triángulo equilibrado de tensiones.

física es que aparecen tres flujos alternos que pulsán a un tiempo (homopolares)¹. Al no tener retorno por una cuarta columna, saltan por el aire (a través de dieléctricos líquidos y sólidos, y de conductores) y, en particular, buscan, parcialmente, el camino ferromagnético ofrecido por la caja del transformador, que por tal motivo tiende a calentarse.

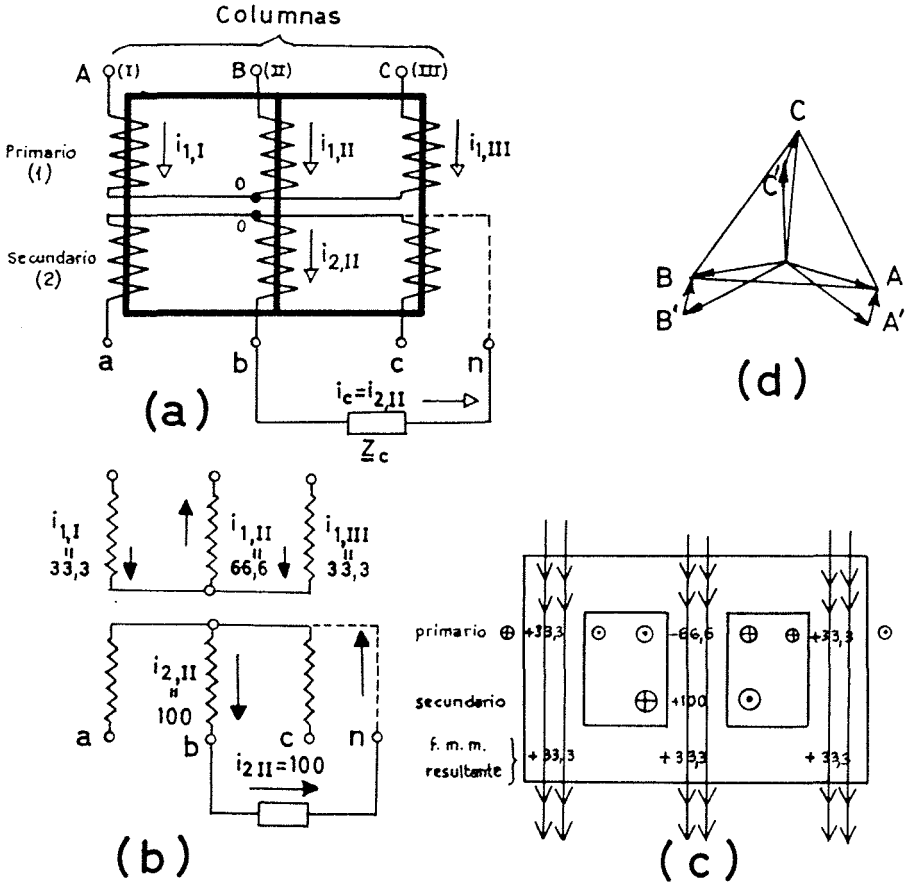


Fig. III-5,1

En lo que refiere a las tensiones, ocurre lo siguiente. Los flujos comunes originales (de régimen de vacío) motivan unas E_1 primarias: O - A', O - B', O - C' (fig. III-5,1d).

¹ Está claro que, en esta forma idealizada de razonar, únicamente se consideran los flujos (homopolares) originados por la carga desequilibrada. Además, existen los flujos normales de excitación, motivados por las tensiones aplicadas, a los que se aludió en el primer párrafo de este apartado. Forman un sistema directo o de secuencia positiva de flujos. Los reales serán la superposición de éstos con los homopolares. De esta forma, se tiene un sistema desequilibrado de flujos. Pueden originarse fuertes saturaciones. Al no ser lineales los circuitos magnéticos, el fenómeno resultante se complica. Esto altera los resultados en lo cuantitativo.

Pero hay que agregar otras f.e.m. inducidas por los flujos homopolares: $A' - A$, $B' - B$, $C' - C$. El transformador se convierte en generador de tensiones homopolares. Luego las tensiones simples resultantes son OA, OB, OC. El neutro O queda trasladado. Análogamente ocurre en las tensiones secundarias. Es evidente que la dirección del traslado depende de la clase de carga $i_2 = i_c$.

Conclusiones:

1.^a Se establecen las corrientes primarias tal como se ve en la figura III-5,1b.

2.^a Al no estar compensados los amperios-vuelta de cada columna, se originan unos flujos alternos homopolares que, por pulsar a un tiempo, tienen que saltar por el aire¹.

3.^a La corriente (carga), en una sola fase, del secundario se traduce en cargas repartidas, pero no equilibradas, en el primario (un sistema directo más otro inverso pero ninguno homopolar, pese a que la carga del secundario lo tiene).

4.^a Surge un traslado de neutro que desequilibra las tensiones simples, según figura III-5,1d.

Con el fin de evitar el desequilibrio de tensiones, se recomienda no emplear esta clase de transformadores en aquellos casos en que son de prever desequilibrios (fase-neutro) en las cargas. Como dato práctico, de orientación, se suele recomendar el uso del transformador estrella-estrella cuando el desequilibrio de la carga (fase-neutro) no se preve superior al 10 % de la intensidad nominal.

§ III-5.3. CARGA ENTRE DOS FASES EN UN TRANSFORMADOR ESTRELLA-ESTRELLA CON NÚCLEO TRIFÁSICO.

Si la carga monofásica se aplica entre dos fases, no se producen las anomalías que se acaban de ver en el caso anterior.

Los razonamientos empleados en el apartado precedente, aplicados aquí, conducen a las corrientes primarias que se ven en la figura III-5,2. Ahora bien, en este caso, las f.m.m. de cada columna se compensan. Luego la carga

¹ Forma abreviada de expresar que, por no tener retorno por circuito magnético del núcleo, los flujos pasan a través de los conductores y aislantes, caja del transformador, etc.

desequilibrada no ocasiona flujos adicionales. No existirán más que los flujos normales de excitación, motivados por las tensiones primarias aplicadas.

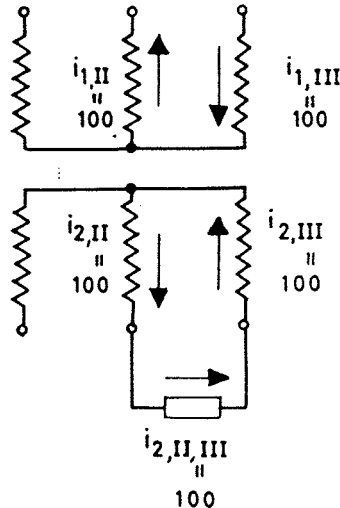


Fig. III-5,2

Conclusión:

Salvo el lógico mal aprovechamiento del transformador, las cargas entre fases no están contraindicadas.

§ III-5.4. CARGA ENTRE FASE Y NEUTRO EN BANCOS DE TRANSFORMACIÓN TRIFÁSICA Y EN TRANSFORMADORES CON CINCO COLUMNAS.

Cualitativamente subsiste lo visto en el caso análogo del § III-5.2, pero los efectos se agravan.

En la figura III-5,3a, se ven tres transformadores monofásicos, en transformación trifásica, con carga fase-neutro. Este esquema equivale al (b). En definitiva es un transformador monofásico en carga, con la particularidad de estar conectado a la red a través de dos bobinas previas.

Para fijar ideas, supóngase que la carga monofásica es óhmica. Las bobinas conectadas al primario significan caídas de tensión. Con poca importancia que tenga la corriente de carga, ha de originar fuerte saturación de los núcleos de los transformadores descargados. En efecto, las corrientes que por estos han de circular pasan a ser puras corrientes de excitación, y no se olvi-

den los valores muy reducidos que normalmente deberían tener tales corrientes. En (c) se ha representado el diagrama vectorial del conjunto (tensión A-N muy reducida). En resumen, sucede que al transformador monofásico

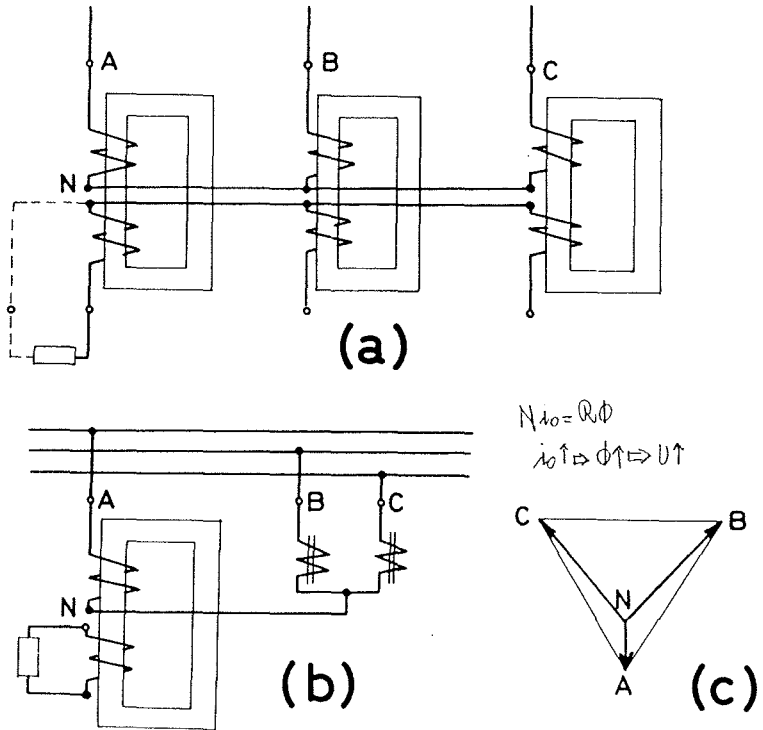


Fig. III-5,3

cargado se le han conectado (en el primario) unas reactancias adicionales. Los anglosajones denominan al fenómeno «*choking effect*» (*efecto choque*).

Algo parecido sucede con los transformadores con cinco columnas.

A los efectos de transporte, los grandes transformadores han de ceñirse a un gálibo determinado. Con el fin de reducir altura, cabe disminuir las secciones de las culatas, a base de que parte de los flujos (Φ_1 y Φ_2) retornen por dos columnas suplementarias sin arrollamientos. En la figura III-5,4a se ve tal tipo de núcleo. En (b) se ofrece el diagrama vectorial de flujos, en trabajo equilibrado normal.

Supóngase conexiones estrella-estrella. Este caso puede asimilarse, en principio, al examinado en el § III-5.2. La diferencia estriba en que los flujos

adicionales, creados por un desequilibrio fase-neutro, no están obligados a retornar por el aire. Aquí tienen fácil retorno por las dos columnas adicionales. Esto significa que, incluso corrientes de desequilibrio moderadas

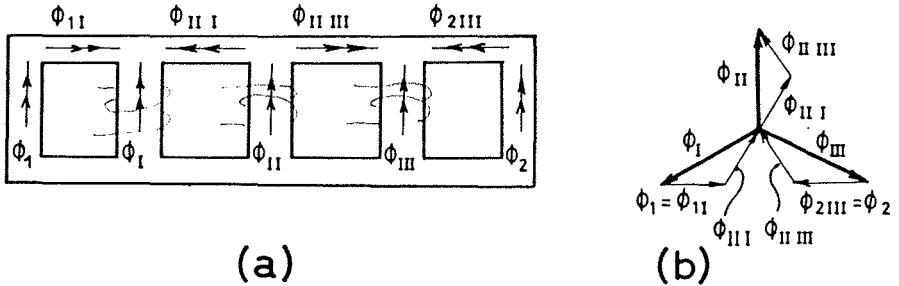


Fig. III-5,4

motivarán considerables flujos, limitados por fuertes saturaciones. Una vez más el proceso se sale del campo de lo lineal. El resultado es, como en el caso precedente, el efecto choque.

Conclusiones:

1.º Con el fin de que no puedan producirse desequilibrios fase-neutro, debe proibirse el uso de neutros en los secundarios, tanto en el caso de bancos a base de transformadores monofásicos como tratándose de transformadores con cinco columnas. Siempre en el supuesto de que no se está dispuesto a dar aportación de corriente por el neutro del primario.

2.º Las precedentes limitaciones o inconvenientes se evitan si uno de los arrollamientos está conectado en triángulo, o si se dispone un arrollamiento de compensación, según seguidamente puede verse.

§ III-6. Arrollamientos terciarios o de compensación.

Si en los transformadores estrella-estrella se dispone un *arrollamiento terciario* (figura III-6,1a y b), también llamado *de compensación*, conectado en triángulo, desaparecen los inconvenientes:

- a) motivados por las cargas entre fase y neutro (§ III-5.2 y 3);
- b) motivados por las terceras armónicas en las tensiones simples secundarias (§ III-4.2).

Aun cuando no es condición precisa, en la figura se supone que, siendo N_3 el número de espiras de cada fase del terciario, $N_1 = N_2 = N_3$.

a) Para poner de relieve la función del devanado terciario, imagínese, por el momento, que tiene el triángulo abierto. El transformador (figura III-6a), con su carga monofásica, trabaja exactamente como lo hacía sin el devanado terciario (figura III-5,1) En el devanado terciario, abierto, se

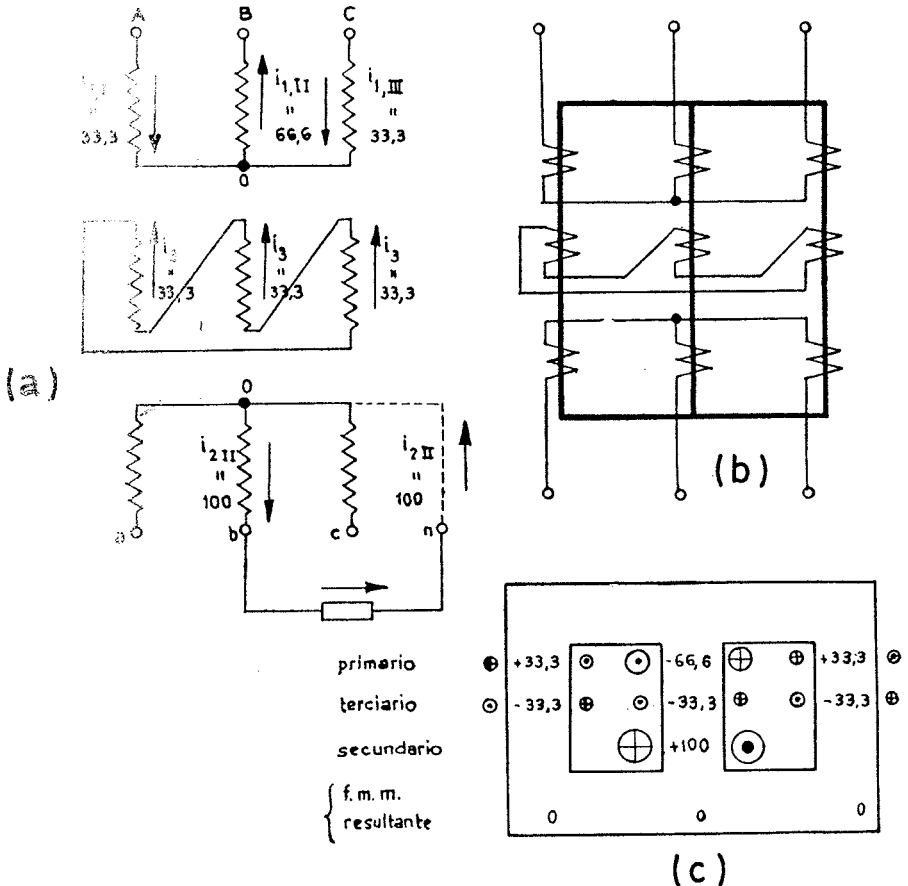


Fig. III-6,1

inducen tres fuerzas electromotrices, E_3 , en fase (homopolares) como consecuencia de los tres flujos en fase (homopolares) que la carga monofásica origina. Por lo demás tal devanado, al estar abierto, no hace más que acto de presencia.

Si se cierra el terciario, la f.e.m. total $3 E_3$ motivará una corriente que tenderá a oponerse a la causa originaria (aumento y disminución de los flujos $\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}$); en otras palabras, tenderá a «borrarlos». Ciertamente, no lo hará por completo, ya que, en tal caso, no se inducirían las E_3 y no existiría corriente. Dada la pequeña impedancia del devanado terciario (R_3 pequeña y escasos flujos de dispersión), la $3 E_3$, necesaria para mantener la corriente I_3 , es pequeña. Luego los flujos $\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}$ también son pequeños, los precisos para mantener la corriente de cortocircuito I_3 . El valor $i_3 = 33,3$ se justifica por el hecho de ser el necesario para anular los flujos homopolares (se ha visto que en la práctica no son nulos pero sí de reducido valor). Véanse las fuerzas magnetomotrices en la figura III-6,1c, y como en cada columna están compensadas.

b) El mismo devanado terciario elimina («borra»), por idéntico mecanismo, los flujos homopolares de terceras armónicas vistos en el § III-4.3. Tampoco quedan totalmente «borrados» pero sí fundamentalmente. Suele decirse que el devanado de compensación, y en general cualquier arrollamiento en triángulo, aportan (permiten la circulación de) las terceras armónicas de corriente necesarias para disponer de flujos senoidales.

Conclusiones:

Los devanados terciarios realizan la función de eliminar, prácticamente, los flujos homopolares. Con esto, desaparecen los inconvenientes de las cargas fase-neutro en los transformadores estrella-estrella. En consecuencia, con devanados terciarios nada hay que objetar a las cargas desequilibradas, salvo mal aprovechamiento del transformador.

§ III-7. Conexiones en los transformadores trifásicos: desfases, trabajo en paralelo.

§ III-7.1. DESFASES.

Se acaba de ver cómo los conjuntos destinados a transformaciones trifásicas tienen, según su constitución, unas u otras propiedades. Estas dependen de las conexiones primaria y secundaria, y, también, de la naturaleza de los circuitos magnéticos. A propósito se han estudiado, en varios aspectos, las conexiones estrella-estrella (con núcleo trifásico o no). Existen otras conexiones que conviene conocer. Por el momento, se pondrá especial atención en los desfases, o diferencia de fases entre las tensiones primarias y las correspondientes secundarias. Estos conceptos necesitan aclaraciones, que se van a dar seguidamente. Se avanza que, cuando se alude a los desfases, siempre se

entienden en vacío, haciendo caso omiso de las caídas internas del transformador, que aparecen en los regímenes de carga. Sin ello no podría hablarse del desfase propio de un transformador, es algo análogo a lo que ocurre con la relación de transformación.

§ III-7.2. DESIGNACIONES DE POLOS (EXTREMOS DE DEVANADOS) Y BORNES (SOBRE TAPA DE TRANSFORMADOR).

Se tratará el tema de forma que se podrá hacer abstracción de los sentidos de arrollamiento de los devanados («dextrorsum» o «sinistrorsum»), pero se supone que la disposición de dos arrollamientos en una columna se repite, idénticamente, en las restantes (figuras III-7,1a y b).

Recuérdese que, según § II-4.5, se dice que tienen igual polaridad dos extremos de arrollamientos de una misma columna si simultáneamente (con motivo de su flujo común) poseen potenciales positivos (o negativos) en relación con los opuestos.

En la primera columna, dos extremos con la misma polaridad se designarán por A-a, y los opuestos (también de igual polaridad entre sí) por A' — a', figura III-7,1a. Análogamente se procederá con las restantes columnas, a base de las letras B y C.

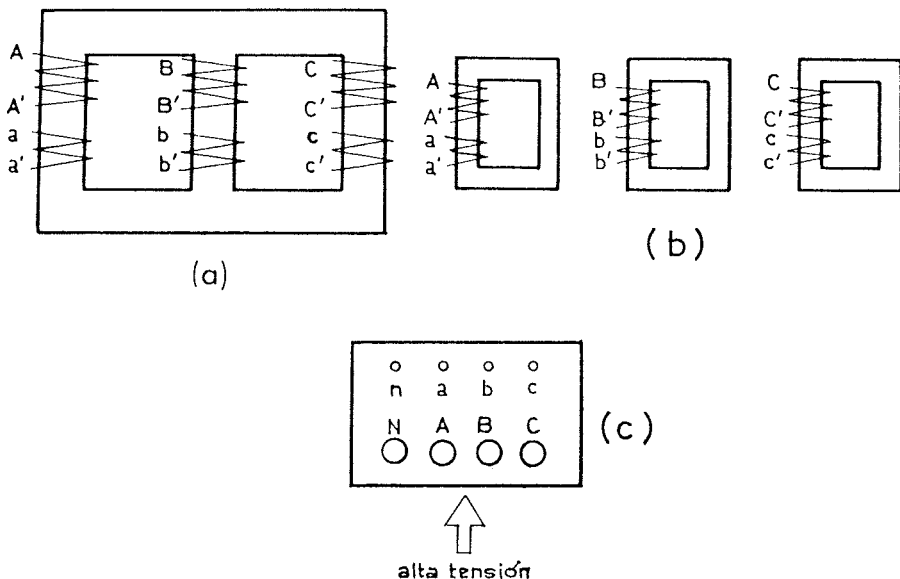


Fig. III-7,1

En (c) se ha representado, según la recomendación *UNESA 5201 B § 3,5*, la disposición y designación de los bornes de un transformador, vista la tapa desde arriba. Se especifica que, mirando el transformador desde el lado de alta tensión, el orden y designación de bornes será:

baja tensión	n	a	b	c
alta tensión	N	A	B	C ¹

A los bornes (alta y baja) con la misma letra se les denominará *homólogos* (recomendación *CEI 76 Transformadores de potencia § 4.2.5*). Ahora bien, pueden conectarse a bornes homólogos extremos de arrollamiento de igual polaridad (figura III-7,2a) o bien de polaridad opuesta (figura III-7,2b).

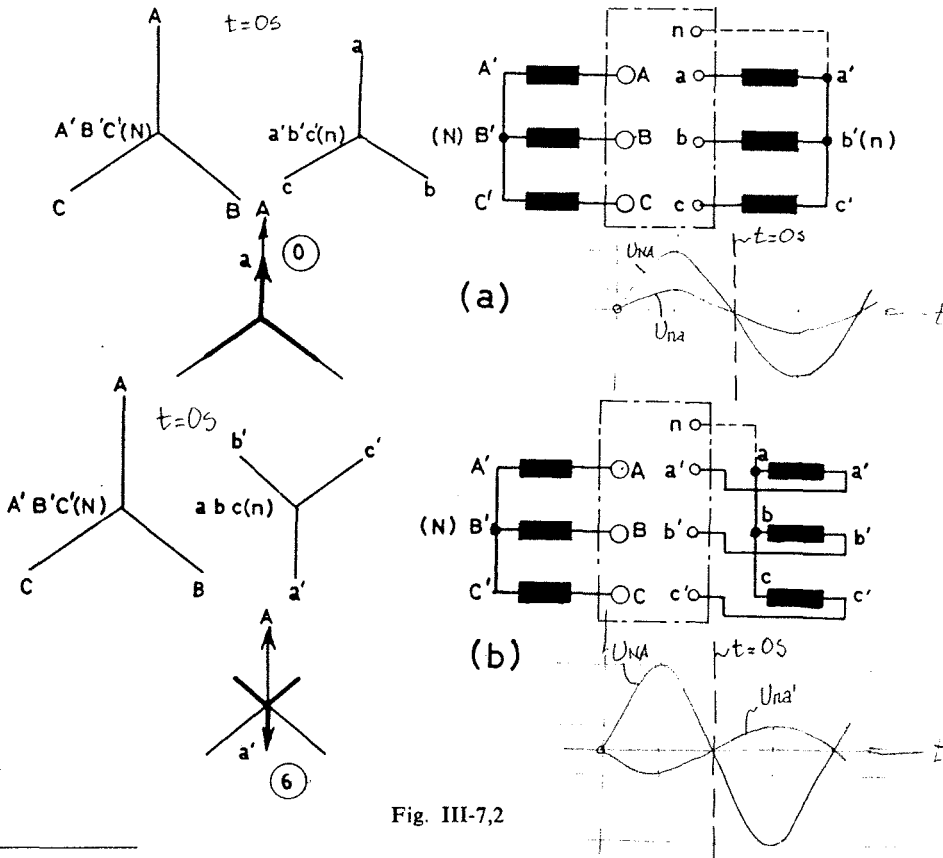


Fig. III-7,2

¹ En realidad, la mencionada recomendación *UNESA*, prescinde del símbolo N, al referirse, exclusivamente, a transformadores de distribución. Pero la recomendación *CEI 76 Transformadores de potencia § 32*, incluso aconseja indicar si la conexión en el neutro es en estrella o zigzag, a base de YN o ZN para los arrollamientos de alta tensión e yn o zn para los de baja.

Luego los conceptos homólogos e igual polaridad no son equivalentes. Por una cuestión didáctica, cuando los bornes homólogos sean de polaridades contrarias, se indicará. Así se tendrá:

baja tensión	n	a'	b'	c'
alta tensión	N	A	B	C

De esta forma se va a respetar la recomendación *CEI*, según la cual bornes homólogos estarán señalados por la misma letra, y la indicación suplementaria (tilde o no) informará sobre polaridades.

§ III-7.3. CONEXIONES ESTRELLA-ESTRELLA, YY 0 E YY 6.

A nuestros efectos (desfases), existen dos posibilidades:

- (1) formar los neutros A'B'C'(N) y a'b'c'(n).
- (2) o bien A'B'C'(N) y a b c (n).

Obsérvese que, conectando según (a), los *vectores homólogos* AN y an (etcétera) están en fase (desfase nulo). Procediendo según (b), los vectores homólogos están desfasados 180° (π).

§ III-7.4. INDICE DE DESFASE U HORARIO. SÍMBOLO DE CONEXIONES O DE ACOPLAMIENTOS.

A los efectos de las designaciones (nomenclatura), y de acuerdo con la *CEI*¹, un conjunto de conexiones de un transformador se designará dando, por este orden, la conexión en la más elevada tensión, la del arrollamiento de la tensión menor, y el desfase.

Las conexiones en la más elevada tensión se representarán por: Y, estrella; D (derivado de delta), triángulo¹.

Las conexiones en la menor tensión se representarán por: y, estrella; d, triángulo².

Los desfases, y a los efectos de nomenclatura, no se darán en grados (en nuestros casos 0° o 180°), ni tampoco en radianes (0 o π), sino en múltiplos de 30° . Es decir, se adopta como unidad de ángulo el de 30° . Así, en el caso (a), el desfase es 0, en el (b) es $180^\circ: 30^\circ = 6$. Estas designaciones son fáciles de retener. Basta comprobar que, superponiendo los diagramas vec-

¹ *CEI 76 Transformadores de potencia*, § 4.10.7.

² Existe otro tipo de conexión, zigzag, que se verá más adelante, se representará por Z o z.

toriales (figura III-7,2), los vectores correspondientes Aa (o bien Aa') señalan, considerados como manecillas de un reloj, una hora que coincide con el desfase (0h, respectivamente 6h). El valor de desfase, así indicado, recibe el nombre de *índice de desfase* u *horario*.

En definitiva, los *símbolos de conexiones* o *de acoplamiento* correspondientes a los dos casos consideradas son,

$$(a) \quad Y \text{ y } 0$$

$$(b) \quad Y \text{ y } 6$$

Aun cuando parezca supérfluo, se señala que los desfases son independientes del orden de sucesión de las fases. Es decir, en el transformador de la figura III-7,2a, el desfase es nulo tanto si a los bornes se aplica un sistema equilibrado directo de tensiones (ABC), como si se le aplica uno inverso (ACB). Lo mismo ocurre con el transformador (b). Esto no va a suceder con otros acoplamientos¹.

Nota. Por supuesto caben otras conexiones entre los polos (extremos de devanados) y bornes (de tapa).

Si en el caso (a), se realiza un corrimiento cíclico, en determinado sentido, entre las conexiones o bornes de alta (o en las de baja), se obtendrá un desfase de 120° ($2\pi/3$). Si se realiza el corrimiento en sentido contrario, será de -120° ($-2\pi/3$), o lo que es lo mismo 240° ($4\pi/3$). Para verlo basta que, en el diagrama vectorial, se corran cíclicamente, las letras a b c. Si se realizara en (b), se obtendrían los desfases 60° ($\pi/3$) y -60° ($-\pi/3$), en lugar de 180° (π).

En general, no se van a usar estas últimas posibilidades.

§ III-7.5. CONEXIONES (ACOPLAMIENTOS) TRIÁNGULO-ESTRELLA, DY 5 Y DY 11.

En la figura III-7,3, se va a estudiar la conexión mixta triángulo-estrella.

Existen dos formas posibles de cerrar el triángulo: según (a) y según (b). También caben dos formas de crear los neutros: (a) y (c). Esto da cuatro posibilidades. Existen, en definitiva, cuatro desfases posibles:

$$\pm 30^\circ (\pm \pi/6) \text{ y } \pm 150^\circ (\pm 5\pi/6).$$

En términos horarios: 1, 5, 7, 11.

Es fácil ver que incluso los cambios cíclicos de conexiones no producen nuevos tipos de desfases. En efecto, cambios de desfases de 120° convierten los de $\pm 30^\circ$ en $\pm 150^\circ$, o viceversa.

¹ Por ello habrá que añadir que los desfases, y por lo tanto los índices horarios, se entenderán a base de aplicar un sistema directo de tensiones, a los arrollamientos de alta, según el orden de secuencia alfabética.

Es de interés observar que, si en lugar de aplicar al transformador un sistema directo de tensiones ABC, se alimenta con un sistema inverso ACB, el desfase cambia de signo ($\pm 30^\circ$ pasa a $\mp 30^\circ$, horariamente 11 pasa a 1,

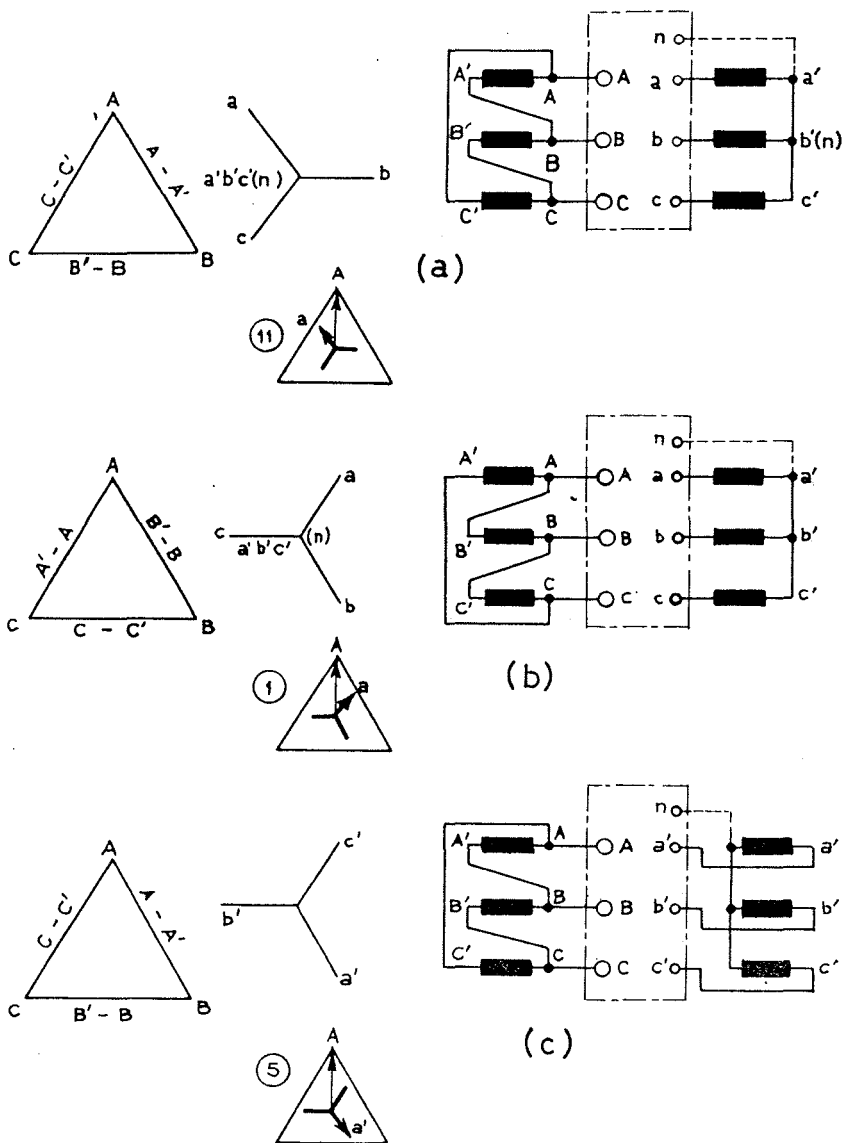


Fig. III-7,3

y viceversa). Para observarlo, en la figura III-7,4 se dibuja el diagrama vectorial del transformador, figura III-7,3a, a base de alimentarlo con un sistema inverso. Recuérdesse que esta alteración no se producía en los transformadores estrella-estrella.

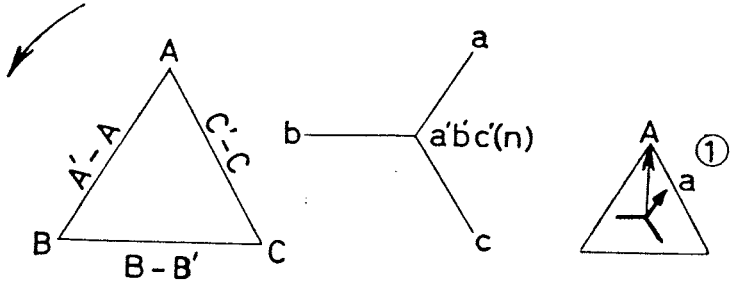


Fig. III-7,4

Por lo anterior, y a fin de que los índices horarios queden unívocamente determinados, hay que añadir que se determinarán a base de aplicar un sistema directo de tensiones, es decir, cuyo orden de sucesión de máximos, en los bornes, sea ABC. En estas condiciones, se contarán como ángulos positivos los de atraso de la menor tensión respecto a la más elevada. Los índices horarios son tales ángulos de atraso, en grados sexagesimales divididos por 30° .

Nótese que, en los acoplamientos triángulo-estrella, si los números de espiras son N_1 para el primario y N_2 para el secundario, la relación de transformación¹ (relación, en vacío, entre dos tensiones simples reales o ideales, o dos tensiones compuestas) es

$$r_t = \frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$$

Conclusiones:

- 1.º Los acoplamientos Dy, pueden proporcionar los desfases $\pm 30^\circ$ y $\pm 150^\circ$.
- 2.º Si en lugar de alimentar con un sistema directo de tensiones, se alimenta con uno inverso, cambia el signo del desfase.
- 3.º La relación de transformación es

$$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$$

¹ Se admite, como es corriente, $r_{te} = r_{ta} = r_t$.

§ III-7.6. CONEXIONES ESTRELLA-ZIGZAG, Yz 5, Yz 11.

Por propiedades especiales, que en § III-8 y § III-9 se estudiarán, interesa considerar la conexión en zigzag (representación z). En la práctica, solamente se emplea en el lado de menor tensión. Consiste en subdividir en dos partes iguales los devanados secundarios, en formar un neutro como se ve en la figura III-7,5, y en conectar en serie, a cada rama de la estrella, las bobinas, invertidas, de las fases adyacentes, en un determinado orden cíclico.

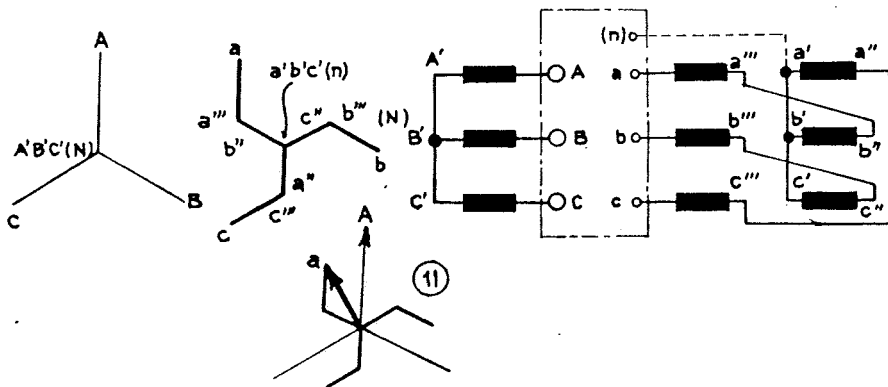


Fig. III-7,5

El examen atento de la figura lo aclara. Un estudio sistemático pone de manifiesto que pueden lograrse desfases de $\pm 30^\circ$ y $\pm 150^\circ$. Se usan Yz 5 e Yz 11.

La aplicación de un sistema inverso de tensiones, cambia el signo del desfase.

Es fácil comprobar que N_1 espiras en el lado de mayor tensión y N_2 (total, suma de las dos mitades) en el de menor, proporcionan una

$$r_t = \frac{N_1}{\frac{N_2}{2} \sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \approx 1,155 \frac{N_1}{N_2}$$

§ III-7.7. CUADRO DE ACOPLAMIENTOS UTILIZADOS.

En lo que precede, se han elegido, en reducido número, acoplamientos con los que se ha visto la forma de analizarlos, en cuanto a sus desfases y comportamiento según el orden de sucesión de las tensiones aplicadas. Con

las conexiones estrella, triángulo y zigzag, y las diferentes formas de realizarlas, existe una gran cantidad de combinaciones. En la práctica, se utiliza un número limitado de acoplamientos, que se dan en el cuadro *VDE* adjunto.

En el apéndice IV, se ofrece análogo cuadro según la recomendación *CEI 76*. El de *VDE 0532* está formado, únicamente, a base de tipos *CEI*, pero en número más reducido, resultando más didáctico para la presente exposición.

Es útil advertir que, no obstante, las designaciones de bornes del presente cuadro no son las originales de *VDE*, sino las de la recomendación (española) *UNESA 5201 A*, según se convinieron en el § III-7.2 (fig. III-7,1c).

Aun cuando en las normas *VDE* no se distingue si los extremos conectados son los *a b c* o los *a' b' c'*, por motivos didácticos se realiza tal distinción, según es habitual en esta obra.

§ III-7.8. EMPLEO DE COBRE (O MATERIAL CONDUCTOR) EN LOS ARROLLAMIENTOS, SEGÚN LA CONEXIÓN.

Si bien algo simplista, es útil realizar el siguiente breve análisis comparativo.

Se está proyectando un transformador que, en cualquier caso, trabajará con una inducción máxima B , y con un núcleo de sección S ya determinada (flujo máximo establecido). La sección s de los arrollamientos se va a calcular, en todos los casos, a base de una densidad de corriente máxima fija. En estas condiciones:

a) la *conexión en estrella* requiere N espiras de sección s ;

b) la *conexión en triángulo*, equivalente, precisaría $\sqrt{3} N$ espiras, con una sección $s/\sqrt{3}$, o sea, aproximadamente, el mismo volumen (peso) de material conductor;

c) la *conexión zigzag*, equivalente, supone

$$\frac{2}{\sqrt{3}} N = 1,155 N,$$

con la misma sección s que en el caso de conexión en estrella, luego un mayor consumo de material conductor en cuantía 15,5 %.

CUADRO DE GRUPOS DE CONEXIONES USUALES SEGÚN VDE 0532/11.71 ¹

Índice de desfase (horario)	SIMBOLO DE ACOPLAMIENTO O DE CONEXIONES	Esquema vectorial		Esquema de conexiones	Relación de transformación (2)
		mayor tensión	menor tensión		
0 (0°)	D d 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	(3) Y y 0				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 0				$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	(3) D y 5				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 5				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 5				$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
6 (180°)	D d 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	Y y 6				$\frac{N_1}{N_2}$
	D z 6				$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11 (330°) (-30°)	D y 11				$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
	Y d 11				$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
	Y z 11				$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

1 Con denominaciones usuales en esta obra.
 2 La relación de transformación se entiende en vacío y entre tensiones simples (reales o ficticias), o entre tensiones compuestas.
 3 En nuevas instalaciones se dará preferencia a los grupos recuadrados.

Un caso concreto fijará ideas. Compárense la conexión estrella-estrella, y la estrella-zigzag, a base de proporcionar la misma relación de transformación:

	estrella-estrella	estrella-zigzag
N.º espiras en primario	N_1	N_1
N.º espiras en secundario	N_2	N'_2
Relación de transformación r_t	$\frac{N_1}{N_2} = r_t$	$\frac{N_1}{N'_2} \frac{2}{\sqrt{3}} = r_t$

Luego es preciso

$$N'_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} N_2$$

Lo anterior muestra que la conexión zigzag es antieconómica, frente a las estrella o triángulo. Por lo tanto, no resultaría aconsejable, a no ser por las ventajas que aporta, según se verá en los § III-8 y § III-9.

Ejercicio

Se dispone del transformador representado en la figura III-7.6. Alimentando el primario a la tensión nominal prevista, los arrollamientos individuales del secundario dan 110 V. Interesan las tensiones y potencias que cabe obtener, en trifásico, a base de establecer diversas conexiones en el secundario.

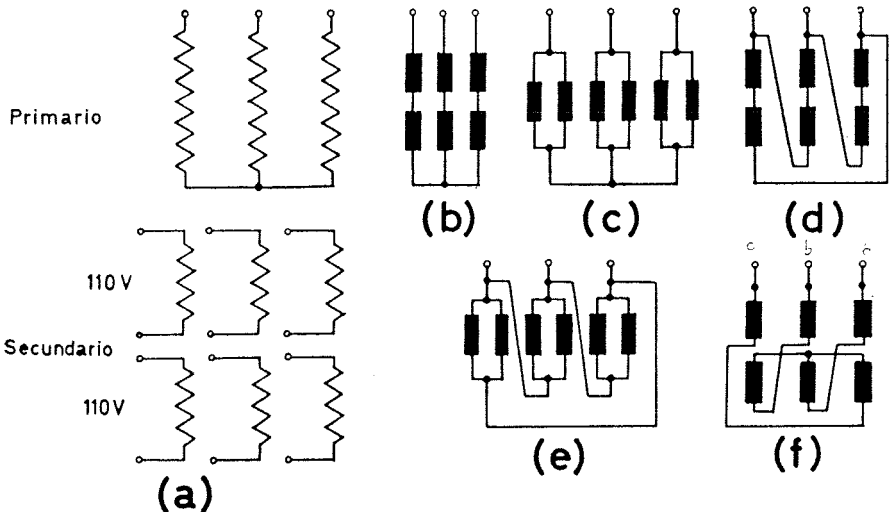


Fig. III-7,6

	Esquema	Tensión compuesta, nominal	Intensidad de línea, nominal	Potencia nominal
Estrella serie	(b)	380 V	I_{2n}	P
Estrella paralelo	(c)	190 V	$2 I_{2n}$	P
Triángulo serie	(d)	220 V	$\sqrt{3} I_{2n}$	P
Triángulo paralelo	(e)	110 V	$\sqrt{3} 2 I_{2n}$	P
Zigzag	(f)	330 V	I_{2n}	$0,87 P$
Estrella formando, además, un terciario		190 V	I_{2n}	$P/2$

§ III-7.9. TRABAJO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

Las condiciones precisas para el correcto trabajo en paralelo de dos transformadores trifásicos (figura III-7,7) son:

a) las mismas que para el trabajo en paralelo de los transformadores monofásicos, y por las mismas razones teóricas (§ II-14);

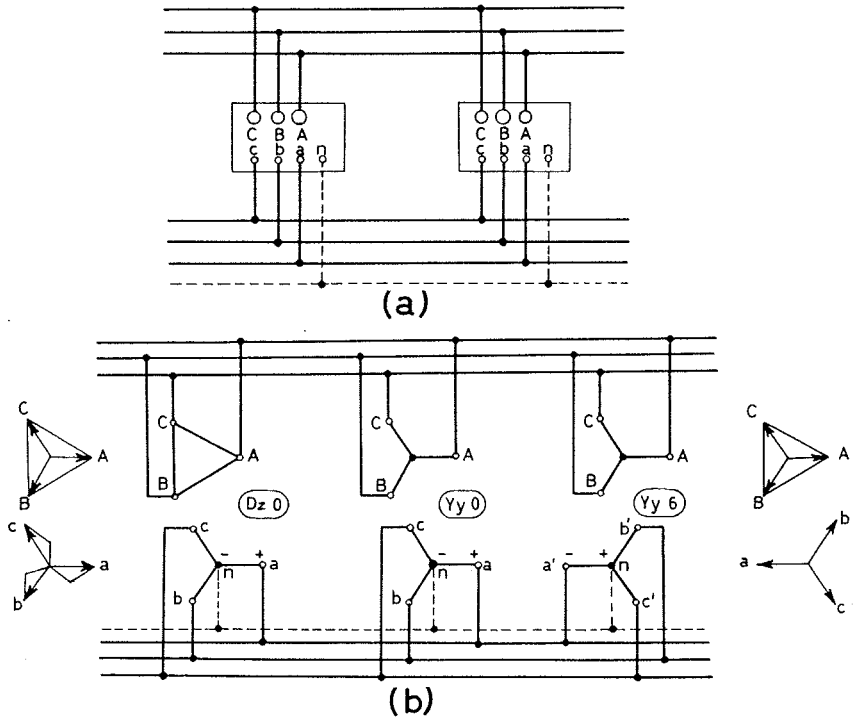


Fig. III-7,7

b) que los transformadores que se desea acoplar posean el mismo desfase.

Por lo tanto, no resta más que examinar la última condición, por lo demás lógica ya que con ello se evitan corrientes de circulación (cortocircuitos). Así, figura III-7,7b, es correcta la puesta en paralelo del transformador Dz 0 con el Yy 0 (compruébese, por ejemplo, el circuito formado por las tensiones simples n-a). Es incorrecta la puesta en paralelo del Yy 6 con los anteriores (procédase a la misma comprobación que en el caso anterior).

Luego la primera conclusión, simplista, es que, con vistas a la puesta en paralelo de transformadores, se solicitarán con el mismo índice horario (desfase). En tal caso, no hay dificultad, bastará conectar a cada fase de línea bornes de transformadores señalados con la misma letra. Así se procede, normalmente, en la práctica. Por lo menos en transformadores de distribución, las compañías evitan tener variedad de transformadores en cuanto a índices horarios.

No obstante lo anterior, en ciertos casos, existe la posibilidad de lograr un buen trabajo en paralelo de transformadores de distinto índice horario, a base de renunciar al cómodo método de conectar, a una misma fase de línea, bornes igualmente marcados. Sobre este particular, así como sobre la determinación del índice horario de un transformador, puede verse el apéndice V.

§ III-8. Cargas desequilibradas en los tipos de acoplamientos normalizados.

§ III-8.1. GENERALIDADES.

Se analizó, con detenimiento, lo que ocurre con las cargas desequilibradas en la conexión estrella-estrella, incluso con devanados terciarios. Se conocen nuevas conexiones posibles (triángulo y zigzag). Hay que examinar sus comportamientos que, como se verá, aportan novedades.

Conocida la forma de análisis, y lo fatigoso que resultaría practicarlo en cada caso, nos limitaremos a dar resultados, para extraer conclusiones de orden práctico¹.

Excepcionalmente, en el apéndice VI, se realiza el estudio de un caso más (Dy) ya que se desea emplear el método de las componentes simétricas. Se elige tal caso por ser particularmente simple e instructivo.

¹ Podría efectuarse por el método explicado en *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § IV-10, a base de conocer el comportamiento de los transformadores ante cada sistema equilibrado de tensiones, según se explica en el apéndice VI.

§ III-8.2. DESEQUILIBRIOS FASE-FASE.

Las conclusiones son:

1.º *Todos los tipos de acoplamiento normalizados se comportan bien ante esta clase de cargas desequilibradas. Hay que interpretar en el sentido de que en cada columna hay un equilibrio de fuerzas magnetomotrices (las de carga igual a las de reacción del primario). Por lo tanto, no se crean flujos adicionales imprevistos. En consecuencia, no hay desequilibrios de tensiones (traslados de neutros).*

2.º Y de interés secundario. En los casos de índices horarios 0 y 6, la carga desequilibrada secundaria se traduce, en el primario, en carga sobre dos conductores de la línea de llegada. En los grupos 5 y 11, resultan cargados los tres conductores de alimentación del primario, si bien desequilibradamente.

Lo que se acaba de enunciar se vió ya en las conexiones Yy 0 e Yy 6 (§ III-5.3), distribuciones de corrientes primarias véanse en figura III-5.2. También puede comprobarse en la Dy 11 (ver estudio en apéndice VI), cuya distribución de corrientes se da en la figura ap. VI,1b. En la figura III-8,1 se ven las distribuciones relativas a las conexiones Yd (5 o bien 11) e Yz (5 o bien 11).

Como ejercicio, compruébese el equilibrio magnético en cada columna.

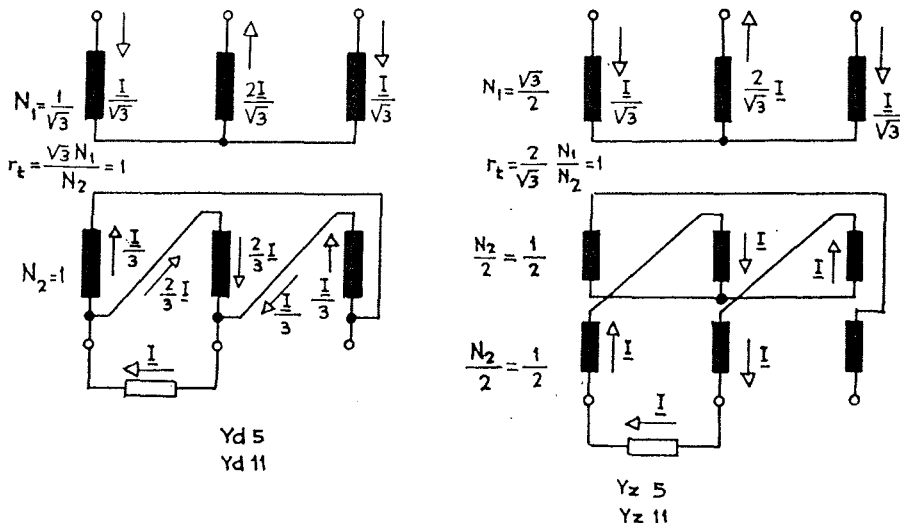


Fig. III-8,1

§ III-8.3. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE-NEUTRO.

Estrella-estrella. Este caso se estudió en el § III-5,2, viéndose su mal comportamiento, flujos homopolares en las columnas con sus inconvenientes, y distribución de corrientes según figura III-5,1b.

Estrella-estrella-terciario. La conexión en triángulo del terciario «borra» o anula los flujos homopolares (véase § III-6). Tipo de acoplamiento adecuado.

Triángulo-estrella. Tipo de conexiones adecuado. En la figura III-8,2a puede apreciarse la distribución de corrientes con el equilibrio de f.m.m. en cada columna.

Estrella-zigzag. Tipo de conexiones adecuado. Véase figura III-8,2b.

Compruébese el equilibrio magnético de cada columna.

Conclusión: Tan sólo los grupos de conexión Yy son inadecuados ante estas cargas desequilibradas. Si se agrega un devanado terciario son adecuados.

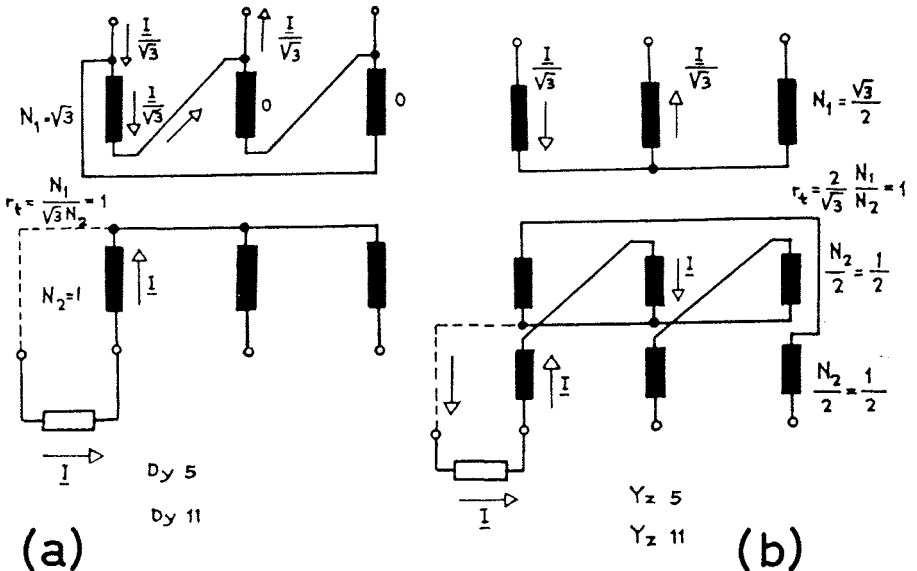


Fig. III-8,2

§ III-9. Terceras armónicas en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones secundarias de los acoplamientos normalizados.

Para no alargar en exceso, se van a estudiar solamente dos casos, más característicos, entre los acoplamientos normalizados. Este tema es continuación del correspondiente al § III-4, relativo al caso estrella-estrella, así como del § III-6 (terciario).

§ III-9.1. ESTRELLA-TRIÁNGULO YD 5 E YD 11.

Para simplificar, considérese el transformador en vacío, figura III-9,1. De tal forma, no aparecen corrientes de carga ni las correspondientes primarias. Tan sólo existen las corrientes de excitación que, en la figura, tampoco se han dibujado. Únicamente se consignan terceras armónicas (${}_3I$, ${}_3\Phi$).

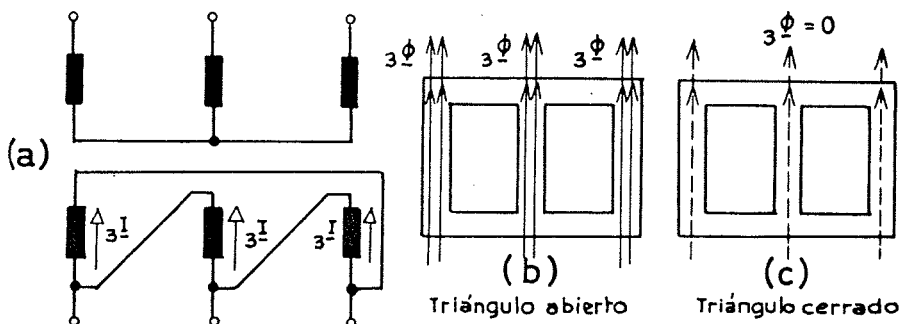


Fig. III-9,1

Supóngase, por el momento, el triángulo abierto. Las corrientes de excitación primarias no poseerán terceras armónicas, ya que pulsarían a un tiempo (serían homopolares) y no existe neutro para el retorno (según es práctica corriente). Al no haber terceras armónicas en las corrientes, existirán en los flujos (b), que, por ser homopolares, saltarán por el aire (conductores, aislantes sólidos y líquidos, y caja). Si en estas condiciones se cierra el triángulo, las tres f.e.m., ${}_3E$, homopolares, que en él se inducen, motivarán una corriente ${}_3I$ que tenderá a «borrar» (prácticamente borrará) los flujos homopolares ${}_3\Phi$ (c). Es el mismo efecto que producían los arrollamientos terciarios.

Conclusiones:

1.^a Si en un transformador tienden a formarse terceras armónicas de flujos, la presencia de un triángulo prácticamente los elimina.

2.^a En consecuencia, las tensiones secundarias no están afectadas de terceras armónicas.

3.^a Por el triángulo circulan (tratándose de núcleos magnéticos saturados), permanentemente, terceras armónicas de corrientes.

§ III-9.2. ESTRELLA-ZIGZAG YZ 5 E YZ 11.

Véase figura III-9,2.

Si no hay neutro para retorno en el primario, existirán terceras armónicas de flujos en las columnas (figura III-9,1b).

Al no haber ningún triángulo cerrado, no son «borrados» los flujos homopolares 3Φ .

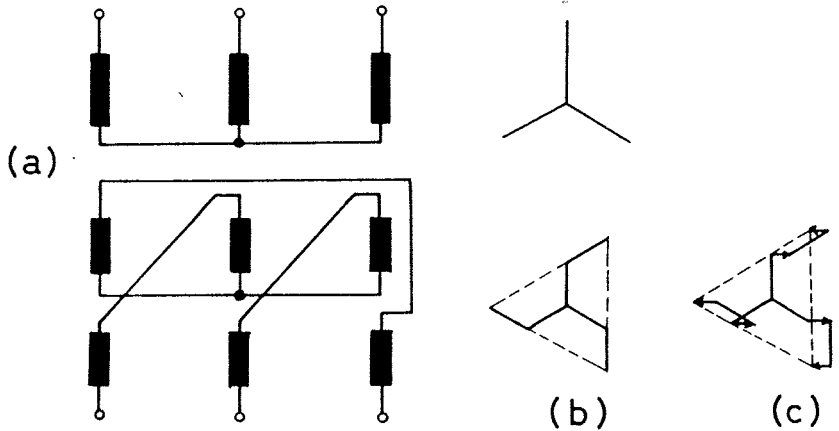


Fig. III-9,2

El transformador se ha convertido en un generador de terceras armónicas de tensiones. En la figura III-9,2b, se han dibujado los vectores fundamentales de este tipo de conexión, prescindiendo de las terceras armónicas. En (c) se ha repetido el diagrama vectorial del secundario, intercalando las f.e.m. terceras armónicas inducidas en cada semidevanado secundario

$$\frac{3E_2}{2}$$

Obsérvese que, como cada tensión simple secundaria está formada mediante dos semidevanados conectados con sentidos opuestos, los efectos de las tensiones terceras armónicas,

$$\frac{3E_2}{2} - \frac{3E_2}{2},$$

se anulan (incluso en las tensiones simples, en la conexión Yy existía una compensación mas solamente en las tensiones compuestas).

Conclusiones:

1.^a Si las corrientes primarias de excitación no aportan terceras armónicas, existen 3Φ .

2.^a Los 3Φ no tienen efectos totales perjudiciales en el secundario, tanto en las tensiones simples como en las compuestas.

§ III-10. Resumen de propiedades de diversos grupos de conexión. Ejemplos de aplicación.

§ III-10.1. CONSIDERACIONES PREVIAS.

Recuérdese que, para una misma potencia de transformador, y con iguales tensiones compuestas y flujos en los núcleos, se puede establecer el siguiente cuadro comparativo.

	Estrella	Triángulo	Zigzag
Tensión compuesta	\dot{U}	U	U
Intensidad de línea	I	I	I
Intensidad por arrollamiento	I	$\frac{I}{\sqrt{3}}$	I
Sección de arrollamiento (con igual densidad de corriente)	s	$\frac{s}{\sqrt{3}}$	s
Número de espiras	N	$\sqrt{3} N$	$\frac{2}{\sqrt{3}} N$
Peso de conductor	100	100	115,5

En los transformadores pequeños (y aun medianos) con tensiones elevadas (o muy elevadas), más claramente, en los devanados previstos para

corrientes pequeñas, el constructor prefiere conexiones en estrella que, al propio tiempo, resultan más económicas. En efecto, con conexiones en triángulo corresponderían secciones muy débiles ($s/\sqrt{3}$), poco resistentes a eventuales solicitaciones dinámicas (cortocircuitos). Además, se trataría de devanados más caros de construcción y de aislamiento (elevado número de espiras, $\sqrt{3}N$)¹. Tratándose de potencias elevadas y de tensiones moderadas (más claro, de intensidades elevadas), se preferirá el triángulo,

$$(I/\sqrt{3}, s/\sqrt{3}),$$

que no obligará a usar pletinas con grandes secciones, difíciles de trabajar, o puede evitar tener que disponer ramas en paralelo.

Con estos antecedentes, y con los resultados de los apartados anteriores, se puede resumir.

§ III-10.2. ESTRELLA-ESTRELLA.

De uso cuando se desee disponer neutro en baja, si bien descargado. Transformadores de distribución, lado baja tensión 380-220 V o bien 220-127 V. También en alta tensión, para puestas de neutro a tierra, evitando una bobina trifásica de puesta a tierra.

Solamente se emplearán cuando no se prevean grandes desequilibrios fase-neutro en las cargas (10 % I_{2n} máximo, en transformadores con núcleo trifásico; proscritas las cargas desequilibradas fase-neutro en bancos trifásicos con transformadores monofásicos).

Útil para transformadores con potencias pequeñas, o moderadas, conectados a tensiones elevadas. Ejemplo de adecuación de la conexión Yy, una factoría desea alimentar motores trifásicos de mediana potencia a 6 kV (cargas equilibradas) y la compañía proporciona 60 kV. No precisándose neutro, el secundario puede ser triángulo: así que Yy o bien Yd. Esta última conexión sería preferible si se tratara de una tensión secundaria relativamente baja (380 V), que motivara intensidades elevadas.

§ III-10.3. ESTRELLA-ZIGZAG.

Sólo se usa, prácticamente, tratándose de transformadores de distribución de reducida potencia. Se puede sacar neutro en baja. Se puede conectar

¹ Por mayor número de espiras ($\sqrt{3}N$), lo que significa más cantidad de materiales aislantes, mayor espacio requerido. Añádase que las ondas de choque, procedentes del exterior (por ejemplo, descargas atmosféricas), requieren espiras de entrada con aislamientos reforzados. En los arrollamientos en triángulo hay entrada por ambos extremos de cada fase.

a tensiones relativamente elevadas. Admite toda clase de desequilibrios. Las tensiones secundarias no presentan terceras armónicas.

Es más caro que el estrella-estrella, por mayor empleo de material en su construcción.

§ III-10.4. ESTRELLA-TRIÁNGULO.

Adecuado como transformador reductor (final de línea), cuando no se requiere puesta a tierra en el secundario. No genera terceras armónicas de tensión.

§ III-10.5. TRIÁNGULO-ESTRELLA.

Es útil como transformador elevador (de principio de línea, o de central). No motiva flujos por el aire en caso de cargas desequilibradas (cortocircuitos), ni traslados de neutros (sobretensiones). Tampoco es generador de terceras armónicas de tensión.

Además, encuentra aplicación como transformador de distribución, con propiedades que recuerdan las de la conexión estrella-zigzag; posibilidad de sacar neutro en baja, admite cargas desequilibradas, en bornes secundarios no aparecen terceras armónicas. No requiere el 15,5 % más de material conductor, en el secundario, que precisa el zigzag. Menos económico que el estrella-zigzag, pese a lo anterior, cuando hay que conectar a tensiones elevadas.

§ III-10.6. ESTRELLA-ESTRELLA-TERCIARIO.

Transformador más caro, por el terciario. Permite puestas a tierra en cualquier lado. Admite desequilibrios. No crea terceras armónicas de tensión. El devanado terciario, triángulo, puede tener aplicación (ver transformadores con tres arrollamientos, § V-1), por ejemplo, para alimentar un grupo síncrono para regular la tensión de una línea.

§ III-10.7. EJEMPLOS.

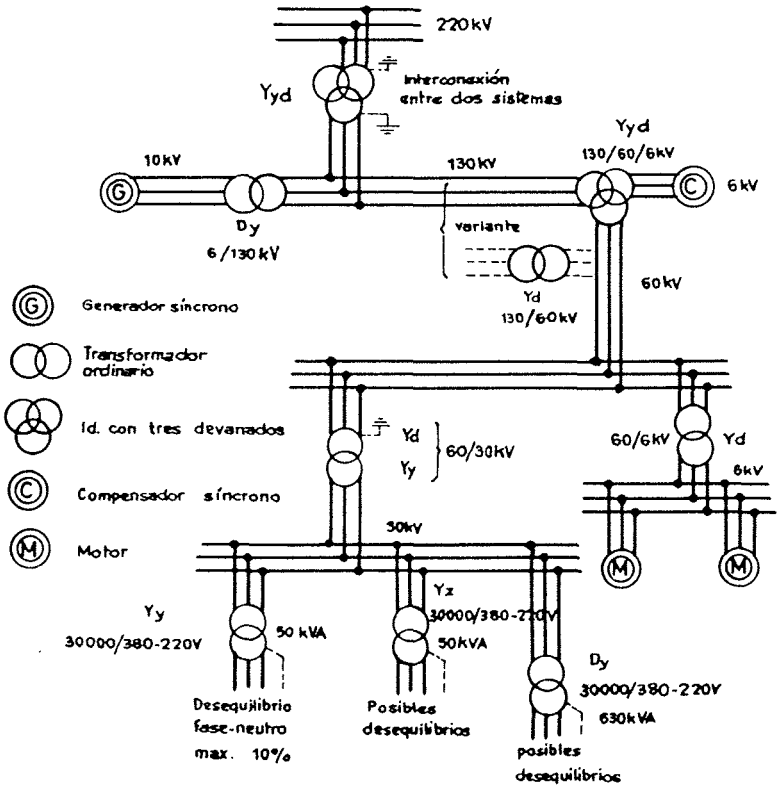


Fig. III-10,1

Ejercicio. Un horno de arco para fusión de acero (Heroult) constituye una carga trifásica desequilibrada (incluso variable), justifique el lector por qué puede alimentarse con un transformador estrella-estrella.

§ III-11. Cálculo de tensiones de cortocircuito correspondientes a conjuntos de transformadores. Aplicaciones.

§ III-11.1. TENSIONES DE CORTOCIRCUITO DE UN GRUPO DE TRANSFORMADORES EN SERIE.

Para destacar el valor práctico de cuanto sigue, supóngase el ejemplo de la figura III-11,1. Se trata de dos transformadores (T1 y T2) en serie, unidos mediante una línea inductiva¹. Se desea determinar la ϵ_{cc} del conjunto.

¹ Las líneas aéreas (fases separadas) poseen, además de R_L , X_L .

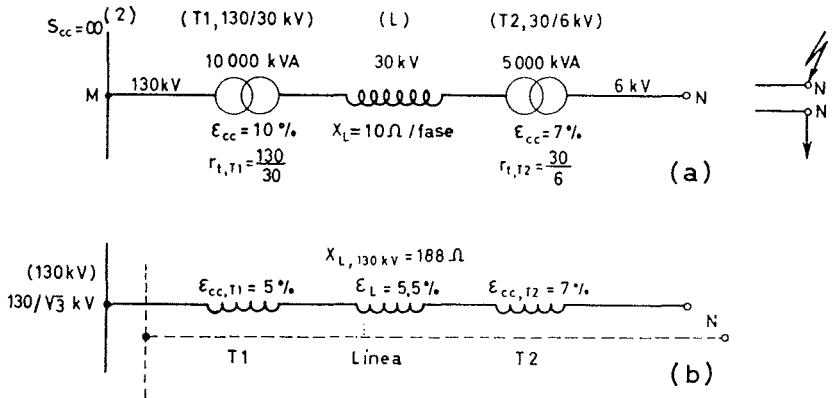


Fig. III-11,1

Con este ejemplo se pondrá de relieve el interés:

- a) de la reducción de elementos a una de las tensiones;
- b) del concepto *tensión de cortocircuito porcentual*, o su análogo *tensión de cortocircuito unitaria*.

Con el fin de simplificar se supondrán:

$$\epsilon_{R_{cc}, T1} = 0, \quad R_L = 0, \quad \epsilon_{R_{cc}, T2} = 0$$

Esto significa que únicamente se considerarán reactancias, de forma que se admitirá

$$\epsilon Z_{cc} = \epsilon X_{cc} = \epsilon_{cc}$$

Confírase a este conjunto un valor nominal de carga, por ejemplo 5 000 kVA. Puede ser otro, arbitrariamente elegido, por cuyo motivo es preferible denominarla *potencia base* o *de referencia*. En lugar de expresar la carga en potencia, puede darse en intensidad de corriente, y se tiene el concepto *corriente base* o *de referencia*. Pero, para una potencia base determinada, la intensidad depende de la tensión considerada, así que se adoptará una *tensión base*¹.

Sin que se afirme que sean preferibles, en el ejemplo se eligen los valores base

$$U_{base} = 130 \text{ kV } (130/\sqrt{3})$$

$$S_{base} = 5\,000 \text{ kVA}$$

$$I_{base} = \frac{5\,000}{\sqrt{3} \cdot 130} = 22,2 \text{ A}$$

² $S_{cc} = \infty$, significa potencia de cortocircuito infinita. Equivale a decir que, cualquiera que sea la potencia que se solicite al sistema, la tensión en el punto *M* permanece inalterada.

¹ Tratándose de sistemas trifásicos, las tensiones se suelen dar en valores compuestos, más como se van a representar sistemas monofásicos, induciría a error no considerar tensiones simples. Por tal razón, y aunque innecesariamente, aquí se darán los dos valores, por ejemplo: 130 kV ($130/\sqrt{3}$).

Habiéndose asignado al sistema (luego a T1) la potencia 5 MVA, su tensión de cortocircuito pasa a ser del 5 % (véase primer ejercicio de § II-7.1). Los elementos base elegidos se han representado en la figura (b) (esquema monofásico fase-neutro). Para esto se han efectuado las reducciones de todos los elementos del esquema trifásico (a) a la tensión base (130 kV) $130/\sqrt{3}$ kV. Tal reducción (§ II-4.1) es bien sencilla, ya que con ella quedan inalteradas las potencias (§ II-4.1) y las ϵ_{cc} (§ II-7.1). En este caso, únicamente ha de reducirse X_L ¹,

$$X_{L, 130} = 10 \left(\frac{130/\sqrt{3}}{30/\sqrt{3}} \right)^2 = 10 \left(\frac{130}{30} \right)^2 = 188 \Omega$$

Obsérvese que, en el esquema resultante, un tramo de línea no se diferencia de un transformador, pues todos estos elementos del sistema se reducen a una reactancia. Incluso si no se hubiesen despreciado las R_{cc} y R_L , tampoco habría diferenciación cualitativa entre un transformador y un tramo de línea. Es útil unificar expresando X_L en forma

$$\epsilon_L \% = \frac{X_{L, 130} I_{n, 130}}{U_n/\sqrt{3}} 100 = \frac{X_{L, 130} I_{n, base}}{U_{base}/\sqrt{3}} 100 = \frac{188 \cdot 22,2}{130\,000/\sqrt{3}} 100 \approx 5,5 \%$$

Nótese que, en forma análoga a como se definían las $\epsilon_{cc} \%$ en § II-7.1, $\epsilon_L \%$ no es más que la caída de tensión porcentual, referida a la tensión base, originada por $X_{L, 130}$ al circular la I_{base} . La ϵ_L es independiente de la tensión base.

Imagínese que por el sistema circula la I_{base} , interesa la caída de tensión motivada por los tres elementos existentes (T1, X_L , T2), referida porcentualmente a la tensión base. Resulta evidente que

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{cc, T1} + \epsilon_L + \epsilon_{cc, T2} = 17,5 \%$$

Como todo valor ϵ_{cc} , es independiente de la tensión base elegida.

§ III-11.2. APLICACIÓN AL CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.

Supóngase que, en N, se produce un cortocircuito simétrico (trifásico), la corriente permanente de cortocircuito es (§ II-12.1)

$$I_{cc, 130 \text{ kV}} = \frac{100}{\epsilon_{total}} I_{n, 130} = \frac{100}{17,5} 22,2 = 127 \text{ A}$$

Si interesa conocer los valores reales de las corrientes permanentes de cortocircuito en la línea a 30 kV, o en la de 6 kV, bastará reducir el valor hallado a la tensión que corresponda:

$$I_{cc, 30 \text{ kV}} = 127 r_t = 550 \text{ A}; \quad I_{cc, 6 \text{ kV}} = 127 \frac{130}{6} = 2\,755 \text{ A}$$

¹ Esto pudo haberse evitado de dos maneras: a) eligiendo la tensión base 30 kV; o bien, b) habiendo previamente convertido X_L en ϵ_L , según luego se verá. No obstante, para que no pase desapercibida la operación de reducción a una tensión, que aquí se realiza, se ha procurado que, por lo menos uno de los elementos, requiera reducción.

La tensión base se ha elegido arbitrariamente, mas obsérvese que, si únicamente hubiese interesado la corriente de cortocircuito en la línea, habría sido preferible adoptar tensión base 30 kV.

Para los valores máximos de la corriente transitoria de cortocircuito, véase § II-12.2.

§ III-11.3. IMPEDANCIA BASE (véase § III-3.3).

Aun cuando se puede prescindir de tal concepto, se advierte que en la práctica se emplea (véase el ejemplo de § III-3.3). Elijase, por ventajosa, la tensión base 30 kV. Se define la *impedancia base* de carga, Z_{base} ,

$$3 Z_{base} I_{base}^2 = S_{base} ; Z_{base} = \frac{U_{base}^2 \text{ (compuesta)}}{S_{base}}$$

En el ejemplo,

$$Z_{base, 30} = \frac{30\,000^2}{5\,000\,000} = 180 \, \Omega$$

Fácilmente se puede ver otra forma simple de calcular ϵ_L ,

$$\epsilon_L = \frac{X_{L, 30}}{Z_{base, 30}} 100 = \frac{10}{180} 100 \approx 5,5 \%$$

Observe el lector que existen cuatro valores base, y que, elegidos dos, los restantes quedan determinados.

§ III-11.4. APLICACIÓN AL CÁLCULO DE CAÍDAS DE TENSIÓN.

Tratándose del cálculo de caídas de tensión, no siempre es lícito prescindir de las resistencias (R_{cc} , R_L)¹. Recuérdese, en efecto (§ II-11), la expresión de la caída de tensión en un transformador.

$$\epsilon_{I_2, \varphi_2} = C \epsilon_{R_{cc}} \cos \varphi_2 + C \epsilon_{X_{cc}} \sin \varphi_2$$

No obstante, si bien los cálculos son más entretenidos, los conceptos adquiridos siguen siendo válidos.

Como ejemplo véase el representado en la figura III-11,2

Para mayor comodidad, el *esquema* (b) se ha dibujado *unifilar*.

¹ En el caso de las corrientes de cortocircuito lo ha sido, ya que allí no interesa tanto un valor exacto de tal corriente como un valor máximo. Prescindir, en el ejemplo, del valor R_L , significa calcular una I_{cc} algo mayor que la real, es decir, trabajar con cierto margen de seguridad. En el cálculo de caídas de tensión, interesa conocer el servicio que se va a dar, luego pueden requerirse valores exactos de las tensiones.

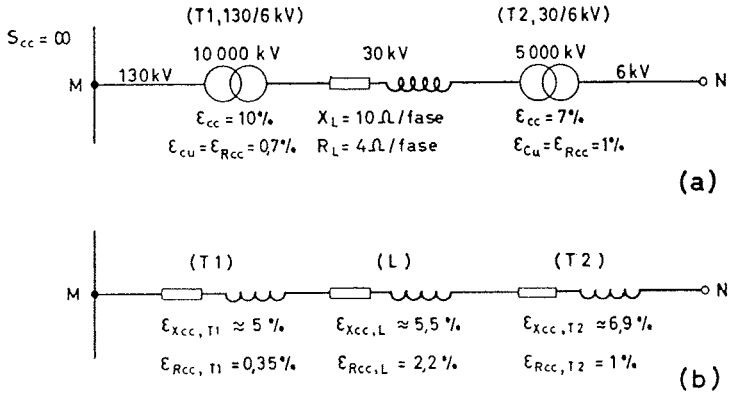


Fig. III-11,2

Se recuerda [II-7,4], que en los transformadores se verifica: $\epsilon_{Cu}\%$ (valor que figura en los protocolos de ensayo de los transformadores) = ϵ_{Rcc} . Por lo tanto:

$$(T 1) \quad \epsilon_{Rcc} = 0,7\% \quad (10 \text{ MVA}); \quad \epsilon_{Rcc} = 0,35\% \quad (5 \text{ MVA})$$

$$\epsilon_{Xcc} = \sqrt{\epsilon_{cc}^2 - \epsilon_{Rcc}^2} = 9,97 \approx 10\%; \quad \epsilon_{Xcc} \approx 5\%$$

$$(T 2) \quad \epsilon_{Rcc} = 1\%$$

$$\epsilon_{Xcc} = 6,93\% \approx 6,9\%$$

Los valores porcentuales correspondientes a la línea, se obtienen fácilmente mediante el valor impedancia base hallado en § III-11.3:

$$\epsilon_{Rcc, L} = \frac{4}{180} \approx 2,2\%$$

$$\epsilon_{Xcc, L} = \frac{10}{180} \approx 5,5\%$$

Los valores totales del sistema son:

$$\epsilon_{Rcc, total} \approx 0,35 + 1 + 2,2 = 3,55\%$$

$$\epsilon_{Xcc, total} \approx 5 + 6,9 + 5,5 = 17,4\%$$

Véanse las caídas de tensión resultantes a plena carga (5000 kVA) y factor de potencia 0,8, calculando a base de la figura III-11,2b, o bien a base del método simplificado (figura III-11,1b):

$$\text{Esquema III-11,2b} \quad \epsilon_{cc} = 3,55 \cdot 0,8 + 17,4 \cdot 0,36 = 8,9\%$$

$$\text{Esquema III-11,1b} \quad \epsilon_{cc} = 17,5 \cdot 0,36 = 6,3\%$$

No está de más comparar los valores resultantes para la corriente permanente de cortocircuito:

Esquema III-11,2b
$$I_{cc, 130 \text{ kV}} = \frac{100}{\epsilon Z_{cc}} I_{n, 130} \approx \frac{100}{17,7} 22,2 \approx 125 \text{ A}$$

Esquema III-11,1b
$$I_{cc, 130 \text{ kV}} = \frac{100}{\epsilon X_{cc}} I_{n, 130} \approx 127,5 \text{ A}$$

§ III-11.5. TRANSFORMADORES EN PARALELO.

En la figura III-11,3 se representa una disposición análoga a la estudiada, con algunas variantes. Existen dos transformadores en paralelo, sus tensiones nominales son 29/6 kV. Además, en el momento del cortocircuito en N, la tensión M es la nominal más 2,5 %. Todo ello se representa en (a).

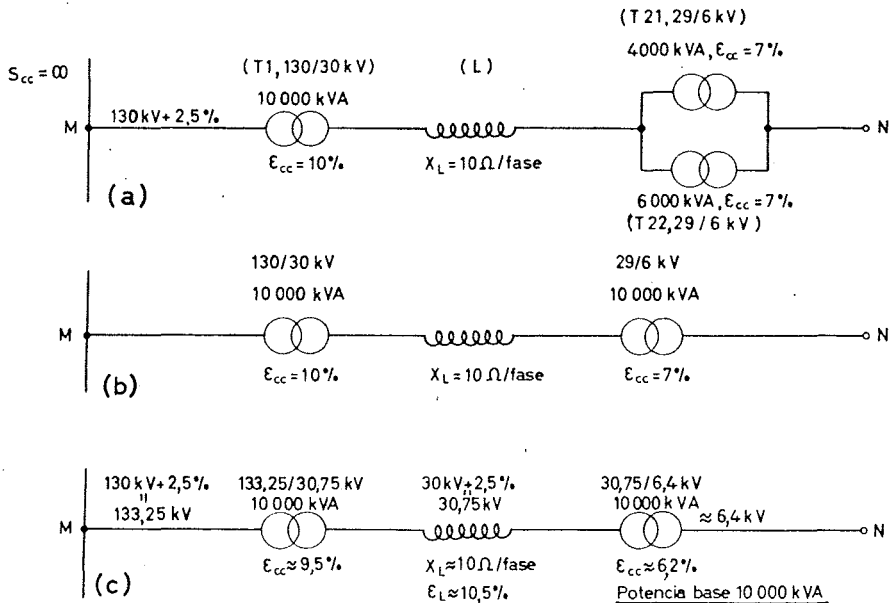


Fig. III-11,3

En el esquema (b), los dos transformadores T2 se han sustituido por uno equivalente (se procede según se vió en el ejercicio 1.º del § II-14.2).

En el esquema (c), se ven las tensiones correspondientes al régimen de vacío. Se adoptan como nuevas tensiones nominales. Esto obliga a rectificar las ϵ_{cc} de los transformadores cuyas potencias nominales se admiten invariables (se procede según el ejercicio 2.º del § II-7.1). En este caso la impedancia base (§ III-11.3) es

$$Z_{base}; 30,75 \text{ kV} = \frac{30\,750^2}{10\,000\,000} \approx 95 \Omega$$

Luego

$$\varepsilon_{L, 30,75 \text{ kV}} \approx \frac{10}{95} 100 \approx 10,5 \%$$

El lector puede suponer, si lo desea, que con el aumento de la tensión crece en igual proporción la potencia nominal de los transformadores (potencia base = 10 000 kVA + 2,5%). Con este supuesto se establecería un nuevo esquema (c'), con otros valores. Lógicamente, los cálculos de corriente permanente de cortocircuito, partiendo del esquema (c) o del (c'), conducirían a un mismo resultado, ya que el fenómeno físico es uno.

Los diversos supuestos que se vienen haciendo sobre las potencias nominales, no juzgan nada en cuanto a calentamientos realmente admisibles. De ahí que a tales potencias, de referencia para el cálculo, conviene designarlas *potencias base* (de cálculo), quedando así claramente diferenciadas de las *potencias nominales*.

CAPÍTULO IV

REGULACIÓN DE TENSIONES

§ IV-1. Autotransformadores monofásicos; potencia de paso y potencia propia.

§ IV-1.1. JUSTIFICACIÓN.

Tienen justificado su empleo en determinados casos en que hay que realizar la transformación de una tensión en otra relativamente parecida (por ejemplo, discrepantes en un 25 %). En tal caso, el autotransformador es notablemente más económico que el transformador. Puede ser reductor o elevador.

Los símbolos recomendados por *CEI (publicación 117-2)* son los de la figura IV-1,1.

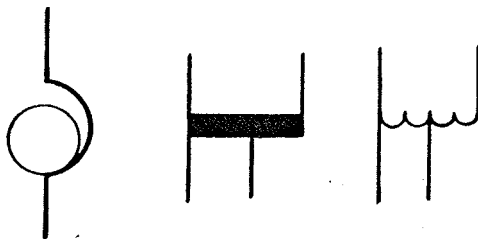


Fig. IV-1,1

§ IV-1.2. CONSTITUCIÓN DEL AUTOTRANSFORMADOR MONOFÁSICO, VENTAJAS FRENTE AL TRANSFORMADOR.

Se empezará por considerar el autotransformador reductor, según figura IV-1,2b. Imagínese el transformador (a)¹.

¹ Se supone ideal, sin caídas internas.

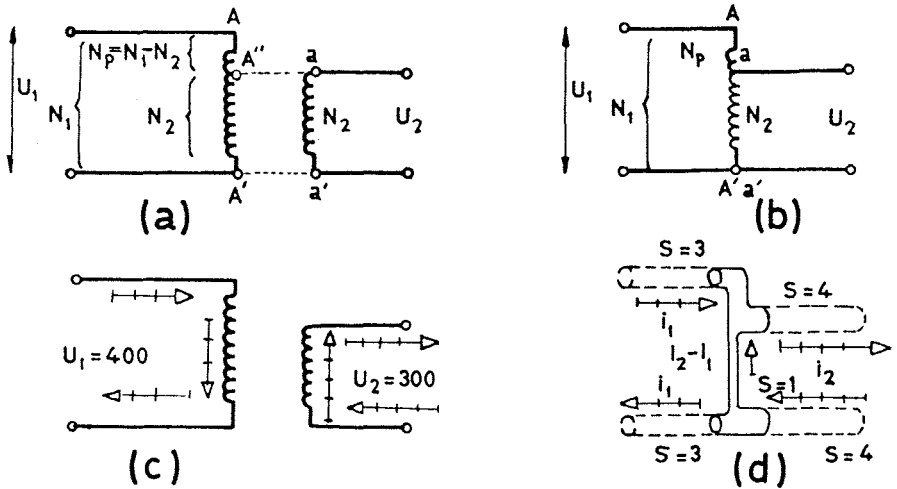


Fig. IV-1,2

Para fijar ideas, $U_1 = 400$ V ($N_1 = 400$) y $U_2 = 300$ V ($N_2 = 300$). Únanse, eléctricamente, A' con a' . También pueden unirse A'' con a , ya que ambos puntos están a un mismo potencial (el mismo número de espiras, N_2 , en ambas columnas). Puede suprimirse el arrollamiento a — a' . Queda el autotransformador de la figura (b). En definitiva, no es más que un divisor de tensión.

Fácilmente puede apreciarse el ahorro en material conductor, a base de las figuras (c) y (d). En (c) se indica las corrientes en cada porción de circuito eléctrico del transformador. En (d), y de una forma libre, pero gráfica, se indica las secciones necesarias en el transformador (proyectado a base de igual densidad de corriente, y despreciando la corriente de excitación, como se viene haciendo). Así queda justificado (d) que una parte (la menor) del arrollamiento único tenga la sección normal (en el transformador) y que el resto de arrollamiento sea a base de una débil sección. Está claro que, si l'_2 es la longitud de las N_2 espiras señaladas en el primario, el ahorro, en volumen, vale, aproximadamente, $2 l'_2 s_1$.

Pero tal ahorro no se limita al conductor. La eliminación de las N_2 espiras secundarias y la reducida sección de las correspondientes del primario, permiten construir un circuito magnético con una «ventana» más pequeña (reducción de la longitud media del circuito magnético, así como del peso de éste).

Lo anterior se refiere a ahorro en materiales activos, pero, además, existe una notable disminución en pérdidas. El lector puede, fácilmente, razonar que el ahorro de pérdidas en el cobre (efecto JOULE) es de

$2 \rho \frac{l_2'}{s_1} I_1^2$ (supresión de efecto JOULE en secundario y parte del primario).

Hay que añadir que la construcción del núcleo con menor longitud (peso) implica la disminución proporcional de las pérdidas en el hierro.

La disminución de pérdidas totales, permite proyectar el autotransformador con elementos de refrigeración (aceite y caja) más económicos.

Los autotransformadores tienen, por naturaleza, escasos flujos comunes (de dispersión), ya que la mayor porción de los arrollamientos es común. Se viene razonando siempre en el supuesto U_2 del orden de magnitud de U_1 . En tal caso, tendrá reducido valor ϵ_{cc} (pequeñas X_{d1} y X'_{d2}). El autotransformador tendrá, por concepción, pequeñas caídas de tensión en carga (incluso con cargas principalmente inductivas).

Resumen de ventajas, frente al transformador:

- i) ahorro en materiales activos y no activos, así como en tamaño y peso;
- ii) mejora en rendimientos;
- iii) transformación con reducidas caídas de tensión;
- iiii) menor corriente de vacío.

§ IV-1.3. ESTUDIO CUANTITATIVO COMPARATIVO ENTRE UN AUTOTRANSFORMADOR Y UN TRANSFORMADOR, POTENCIAS PROPIA Y DE PASO.

Cabe preguntarse: ¿Puede valorizarse, de una forma general, el ahorro de material que un autotransformador supone, frente a un transformador?. En efecto, es posible. Se dispone de un transformador según la

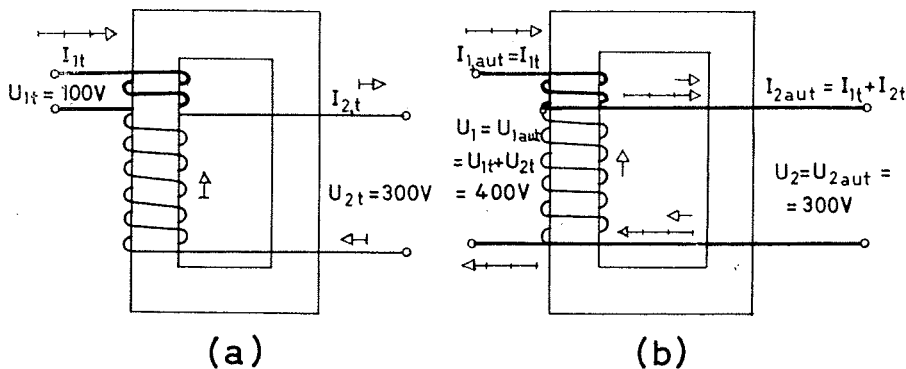


Fig. IV-1,3

figura IV-1,3a. Para fijar ideas, se ha dado valores concretos a las tensiones nominales del transformador (U_{1t} y U_{2t}). En (b) se ha constituido un autotransformador sin más que un cambio de conexiones, simplemente se han conectado en serie primario y secundario del transformador. Si al autotransformador así constituido se le aplica una tensión primaria

$$U_1 = U_{1 \text{ aut}} = U_{1t} + U_{2t}$$

$$\text{(en el ejemplo, } U_1 = U_{1 \text{ aut}} = 400 \text{ V),}$$

en ambos casos se trabajará con el mismo flujo Φ .

Nótese, en efecto, que los voltios por espira son iguales en uno y otro caso, es decir, no se altera el valor

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} = \frac{U_1 + U_2}{N_1 + N_2} = 4,44 f \Phi$$

$$\frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = 4,44 N f \Phi$$

En estas condiciones, no se va a forzar los arrollamientos, se trabajará con las mismas intensidades

$$I_{1t} = I_{1 \text{ aut}}$$

$$I_{1t} + I_{2t} = I_{2 \text{ aut}}$$

Por lo tanto, las pérdidas en el hierro y en el cobre quedan inalteradas. Luego, con igual refrigeración, habrá el mismo calentamiento.

Véase lo que sucede con las potencias transformadas:

$$\text{Potencia del transformador, } U_{1t} I_{1t} \approx U_{2t} I_{2t} \approx 100 I_{1t} \approx 300 I_{2t}$$

$$\begin{aligned} \text{Potencia del autotransformador, } U_{1 \text{ aut}} I_{1 \text{ aut}} &\approx U_{2 \text{ aut}} I_{2 \text{ aut}} \approx 400 I_{1t} \approx \\ &\approx 300 (I_{2t} + I_{1t}) \end{aligned}$$

En general,

$$\frac{S_{\text{aut}}}{S_t} = \frac{(U_{1t} + U_{2t}) I_{1t}}{U_{1t} I_{1t}} = \frac{U_{1 \text{ aut}}}{U_{1 \text{ aut}} - U_{2 \text{ aut}}} = \frac{U_1}{U_1 - U_2}$$

Esto significa que, con el material necesario para construir un transformador de potencia S_t se logrará construir un autotransformador capaz para transformar

$$S_{\text{aut}} = S_t \frac{U_{1 \text{ aut}}}{U_{1 \text{ aut}} - U_{2 \text{ aut}}} = S_t \frac{\text{Tensión mayor}}{\text{Tensión mayor} - \text{Tensión menor}}$$

En efecto, se ha razonado a base de un autotransformador reductor, se puede comprobar que lo anterior subsiste en el tipo elevador. No hay más que recordar que los transformadores y los autotransformadores son reversibles.

En el ejemplo concreto,

$$S_{\text{aut}} = S_t \frac{400}{400 - 300} = S_t 4$$

S_{aut} constituye la llamada *potencia de paso*, o sea la potencia aparente transformable. Se denomina *potencia propia* o *interna*, a S_t , o sea la del transformador cuyo material constructivo (valor de adquisición) precisa. Así que,

$$S_{\text{int}} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} S_{\text{paso}} = \left(1 - \frac{1}{r_t}\right) S_{\text{paso}} \quad 1$$

Ejercicio

Se dispone de un transformador monofásico, de 200 kVA, relación 60/380 V (análogo al de la figura IV-1,3), que se ha dispuesto para constituir un autotransformador 440/380 V. El rendimiento del transformador original es 98 %. ¿Cuál será el del autotransformador?

La potencia de paso del autotransformador, trabajando con las mismas densidades de corriente y con iguales inducciones, luego con las mismas pérdidas, es

$$\text{Potencia de paso} = 200 \frac{440}{60} = 1\,460 \text{ kVA}$$

Luego las pérdidas y el rendimiento del autotransformador serán:

$$\text{Pérdidas} = 2\% \frac{200}{1\,460} = 0,275 \%$$

$$\text{Rendimiento} = 99,725 \%$$

Razónese parecidamente con la corriente de vacío. Si $i_{o,t}$ es la correspondiente al transformador, e $i_{o,\text{aut}}$ la que se prevé para el autotransformador, como en ambos casos el flujo Φ es el mismo, se tiene

$$i_{o,t} (N_1 - N_2) = i_{o,\text{aut}} N_1$$

N_1 = número de espiras del primario en el autotransformador de la figura IV-1,3b

N_2 = id. del secundario

Resultado

$$i_{o,\text{aut}} = i_{o,t} \frac{N_1 - N_2}{N_1}$$

¹ La última relación es invariable tanto si el autotransformador es reductor como si es elevador. Véase nota 1 de pie de página 3.

En el ejemplo, suponiendo $I_{0,t} = 1\% I_{1n}$ (en ambos casos la corriente nominal es la misma),

$$I_{0, \text{aut}} = 1\% \frac{60}{440} = 0,136\% I_{1n}$$

§ IV-1.4. TRANSMISIÓN DE LA POTENCIA TRANSFORMADA.

En un autotransformador, la potencia es transmitida, parcialmente, electromagnéticamente (por inducción como en los transformadores), el resto lo es por conducción.

Por ser más didáctico, y por haberse examinado ya el caso del autotransformador reductor, considérese otro elevador, figura IV-1,4. Se sigue suponiendo que el autotransformador carece de caídas internas, y que es despreciable la corriente de vacío, lo que en autotransformadores es aún más aceptable que en transformadores.

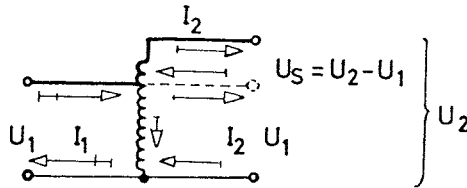


Fig. IV-1,4

La potencia de paso es $U_1 I_1 = U_2 I_2$,

la potencia conducida $U_1 I_2$,

la potencia transmitida inductivamente (por acoplamiento electromagnético) $U_s I_2$, es la llamada *potencia propia* o *interna*.

Por este examen, se llega a la misma relación entre potencia transformada (de paso) y potencia propia que se vió en § IV-1,3.

§ IV-1.5. INCONVENIENTES DE LOS AUTOTRANSFORMADORES.

Lo constituye el bajo valor de ϵ_{cc} que, si en el aspecto caídas internas de tensión es favorable, en lo que concierne a la corriente de cortocircuito (accidente) es inconveniente,

$$I_{lcc} = I_{1n} \frac{100}{\epsilon_{cc}}$$

Lo anterior se traduce en que, así como los transformadores suelen ser dinámicamente resistentes a los cortocircuitos a que puedan estar sometidos (ver § II-12), los autotransformadores no suelen serlo por sí solos. Pueden no resultar peligrosos, en una instalación, si otras reactivas externas (de la línea o de un transformador previo) aportan la necesaria limitación de I_{cc} . En la placa de características deberá figurar la máxima intensidad de cortocircuito que el autotransformador puede tolerar.

Otro inconveniente es el siguiente: para que surja con toda su gravedad se examinará en el autotransformador 6 000/220 V, es decir, con una r_t muy distinta de la unidad.

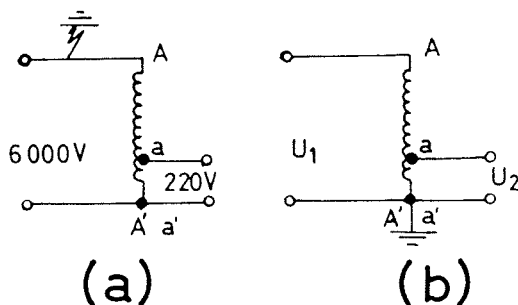


Fig. IV-1,5

Supóngase una accidental puesta a tierra de la fase de la línea que alimenta el borne A (figura IV-1,5a), con lo cual resulta que las fases de baja tensión, conectadas en a' y en a, están, en relación con tierra, respectivamente a 6 000 V y 5 780 V.

El inconveniente señalado ha de evitarse con la puesta a tierra, permanente, del punto A'-a' (figura IV-1,5b). Una interrupción del arrollamiento común (entre a-a') reproduce el accidente pese a la puesta a tierra. Lo indicado no es grave si U_1 es tensión parecida a U_2 .

Se habrá observado que las ventajas de los autotransformadores tienden a perder valor cuando r_t aumenta. Al propio tiempo, el segundo inconveniente se agrava. Por ello la reglamentación española limita el uso de los autotransformadores y obliga a la puesta a tierra precautoria.

Otra desventaja de los autotransformadores estriba en su dificultad en el trabajo en paralelo. Los bajos valores de ϵ_{cc} hacen difícil su ajuste. Además, inductancias externas, por ejemplo de las líneas, conexiones, etc., pueden influir sensiblemente.

§ IV-2. Autotransformadores trifásicos.

La disposición en autotransformador, puede adoptarse en las transformaciones trifásicas, según esquemáticamente se ha representado en la figura IV-2,1 con la reglamentaria puesta a tierra del neutro.

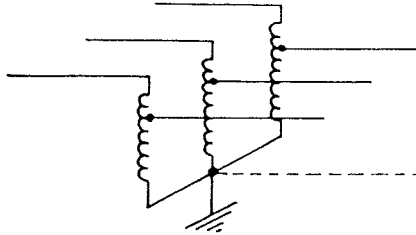


Fig. IV-2,1

La conexión en estrella no es la única posible, aunque sí la generalmente empleada. En la figura IV-2,2, pueden verse conexiones en triángulo y en zigzag.

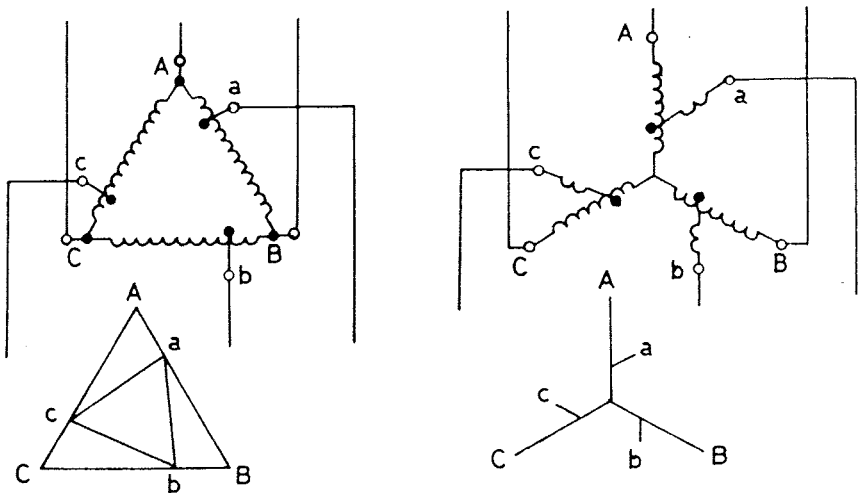


Fig. IV-2,2

Nótese que, en el caso de conexión en triángulo, el desfase depende de la relación de transformación.

Ejercicio

En un autotransformador trifásico en estrella, 133/100 kV se ha omitido la puesta a tierra del neutro. Una de las fases del primario (133 kV) establece contacto con el suelo. Interesan las tensiones, respecto a tierra, de las diversas fases del secundario.

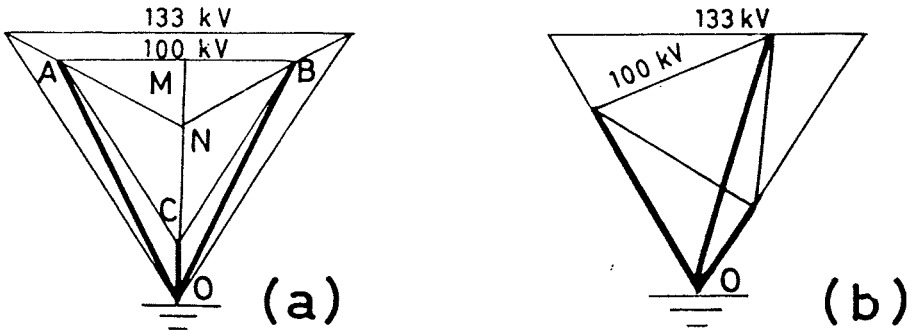


Fig. IV-2,3

En la figura IV-2,3a, se aprecian, trazos gruesos, tales tensiones.

$$\overline{MC} = \sqrt{100^2 - 50^2} = 86,5$$

$$\overline{MN} = 86,5/3 = 28,8$$

$$\overline{OB} = \sqrt{50^2 + (28,8 + 133/\sqrt{3})^2} \approx 116$$

Dos fases se hallan a 116 kV

La tercera a $33/\sqrt{3} \approx 19,1$ kV

Obsérvese, figura IV-2,3b, que si el autotransformador, de igual relación, fuese $\Delta\Delta$, aparecerían otras tensiones.

§ IV-3. Reguladores de inducción.

§ IV-3.1. REGULADORES MONOFÁSICOS.

Conceptualmente es un autotransformador, dispuesto para poder variar de un modo continuo (sin saltos) la relación de transformación. Para concebirlo fácilmente, imagínese el autotransformador monofásico representado en la figura IV-3,1a. No discrepa del autotransformador conocido más que

en haberse dispuesto el núcleo con dos *entrehierros*. Ciertamente ello aumentará la reluctancia R_m del circuito magnético y, en consecuencia, la corriente de vacío será sensiblemente mayor.

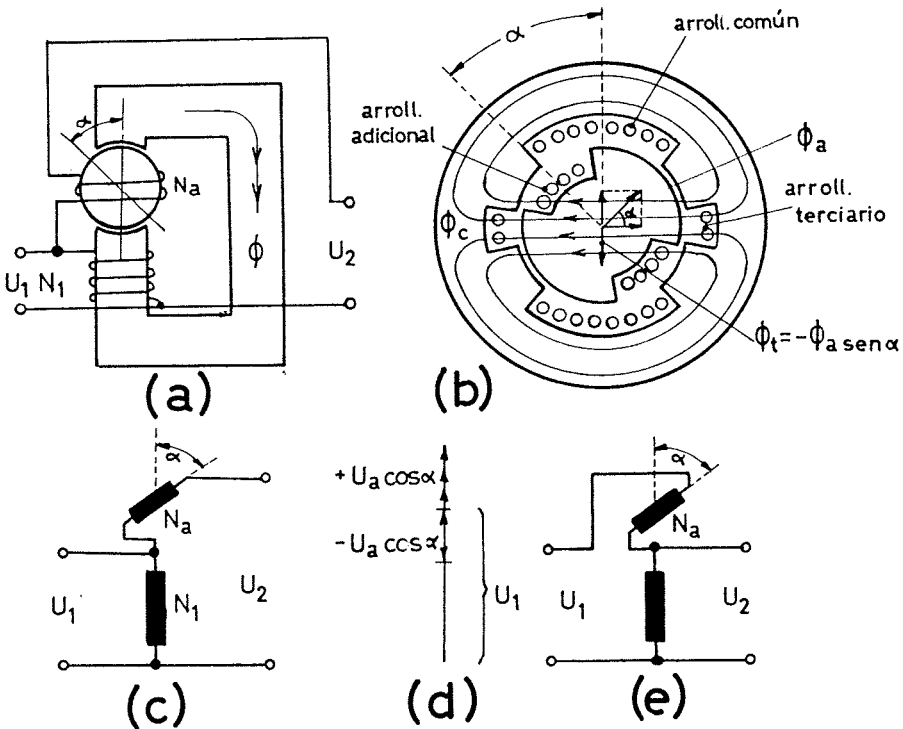


Fig. IV-3,1

En principio, supóngase un autotransformador elevador (figuras IV-3,1a y c). Las N_1 espiras comunes se disponen en la parte fija del circuito magnético. Las espiras adicionales (N_a) se arrollarán en el sector móvil del circuito magnético. Tal sector puede experimentar el giro α (0° a 180°), pero, en unas determinadas condiciones de trabajo, está fijo. Dispuesto como en la figura, la tensión secundaria valdrá

$$U_{2, \alpha^\circ} = U_1 + U_{a, \alpha^\circ} = U_1 + U_1 \frac{N_a}{N_1}$$

Si se trabajase tras haber colocado el sector móvil girado un ángulo α ,

el flujo abarcado por las espiras adicionales (N_a) sería $\Phi \cos \alpha$. Por lo tanto, la tensión secundaria resultaría

$$U_{2, \alpha^\circ} = U_1 + U_{a, \alpha^\circ} = U_1 + U_1 \frac{N_a}{N_1} \cos \alpha \quad \alpha = \begin{cases} 0^\circ \\ 90^\circ \\ 180^\circ \end{cases} \quad \cos \alpha = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases}$$

En (d) se ha trazado el diagrama vectorial aproximado¹. La novedad notable es que la tensión adicional,

$$U_1 \frac{N_a}{N_1} \cos \alpha,$$

puede establecerse a voluntad, de forma que la tensión U_{2, α° resulta regulable entre $U_1 \pm U_{a, \alpha^\circ}$, o sea con el margen de regulación $2 U_{a, \alpha^\circ}$.

Como en los autotransformadores, se definen las potencias propia y de paso, que, en el presente caso, se entenderán las máximas posibles, es decir:

$$\text{Potencia de paso} \quad U_{2, \alpha^\circ} I_2$$

$$\text{Potencia propia (interna)} \quad U_{a, \alpha^\circ} I_2$$

Ahora bien, ha de tenerse presente que la potencia transformable es función de U_{2, α° (de α) ya que vale

$$S_{\text{transf.}} = U_{2, \alpha^\circ} I_2$$

Se ha puesto de manifiesto que el regulador de inducción, en teoría, no es más que un autotransformador regulable. La práctica ha demostrado, no obstante, que no es adecuada la constitución según la figura (a). Se construye a base de elementos clásicos de motores de inducción, dándoles la disposición que, esquemáticamente, se ve en la figura (b). Por supuesto que el rotor está fijado, aunque movable a mano o mediante un servomotor. Las espiras comunes (N_1) suelen disponerse en el *estator*, y las adicionales en el *rotor*.

Obsérvese que el arrollamiento adicional (véase como parte del arrollamiento secundario de un transformador), crea (con su corriente de carga I_2) un flujo Φ_a , cuyo eje se ha dibujado en (b). Puede descomponerse, según está en la figura, en $\Phi_a \cos \alpha$ y en $\Phi_a \sin \alpha$. El primero es el clásico de la teo-

¹ Como en el estudio de autotransformadores, se siguen despreciando las caídas internas. De esta forma, los vectores tensión están en fase y se adicionan aritméticamente.

ría de transformadores, que será compensado por la corriente adicional de carga del primario, I'_2 . Ahora bien, el segundo ($\Phi_a \text{ sen } \alpha$) es flujo del secundario que no concatena con el primario, es flujo de dispersión del secundario. Tal flujo puede ser importante ($\alpha = 90^\circ$), representando una $X_{d,2}$ notable. Esto ha de motivar caídas de tensión internas secundarias inaceptables. Para la eliminación de $\Phi_a \text{ sen } \alpha$, se dispone un *arrollamiento terciario*, constituido por unas espiras en cortocircuito (circuito cerrado). Como otros arrollamientos terciarios, prácticamente borra los flujos que tiendan a establecerse normalmente a su plano de espiras. Si se prefiere, crea un flujo $\Phi_t = -\Phi_a \text{ sen } \alpha$.

El regulador de inducción puede estar conectado en la forma indicada en (e). Se suele elegir entre las conexiones (c) o (e), de forma que el flujo común Φ_c . (la inducción B_m) tienda a no variar según las condiciones previstas de trabajo. Más claro:

tensión de llegada $U_1 \approx$ constante, se desea una U_2 variable a fines de ensayos en laboratorio, conexión adecuada (c);

tensión de llegada, U_1 , variable, con necesidad de estabilizarla a un valor fijo U_2 (eventualmente se automatizará), la conexión adecuada es (e).

Cuando las potencias de los reguladores de inducción son algo elevadas, se suelen construir sumergidos en aceite, como elemento refrigerante, adoptando esta técnica característica de los transformadores.

§ IV-3.2. REGULADORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS.

No se van a estudiar ya que, si bien contruidos, también, a base de elementos de motores, su teoría se basa en la de los campos giratorios, que es el fundamento de las máquinas rotatorias.

§ IV-3.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS REGULADORES DE INDUCCIÓN.

Véanse en el próximo apartado relativo a transformadores con tomas.

§ IV-4. Transformadores con tomas.

§ IV-4.1. TOMAS DE REGULACIÓN.

Los reguladores de inducción constituyen, técnicamente, un excelente medio para regular tensiones, de forma continua y sin contactos. No obs-

tante, resultan caros y tienen limitaciones que se expondrán al final de este apartado. Los transformadores proporcionan otro medio de regular tensiones, a base de poder variar la relación entre espiras N_1/N_2 .

Tratándose de un transformador monofásico, figura IV-4,1a y b, se establecen diversas derivaciones, llamadas «tomas», en uno de los arrollamientos, y, al propio tiempo, se dispone un medio para conmutar. Las tomas pueden preverse en uno u otro de los arrollamientos.

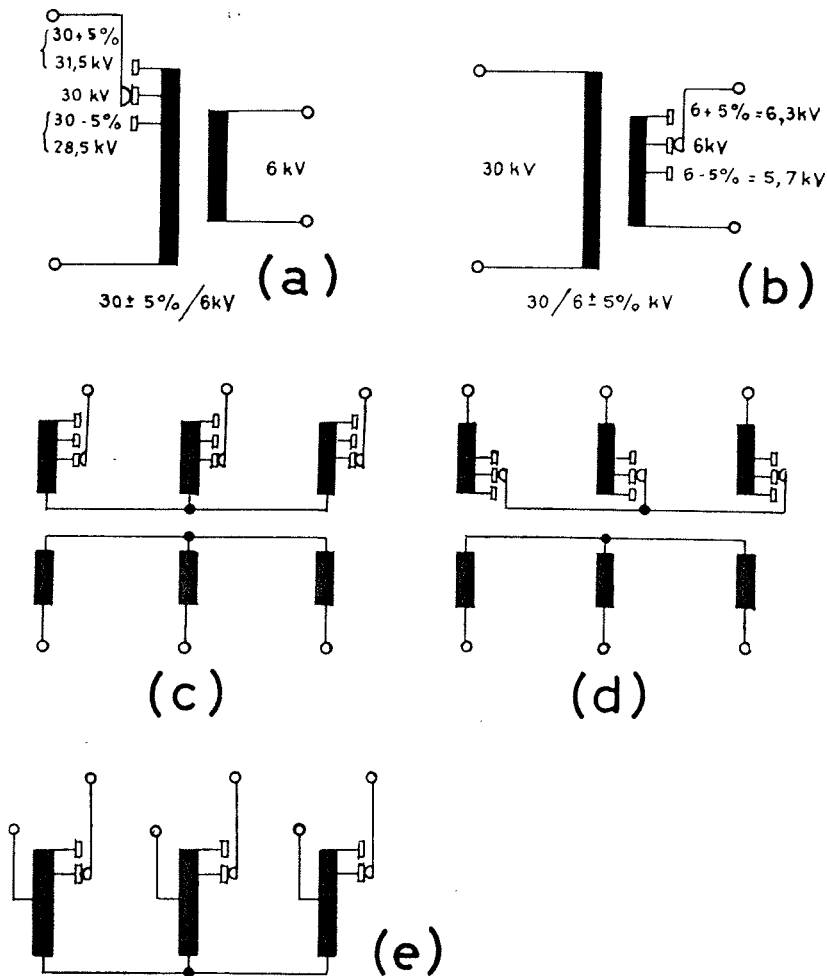


Fig. IV-4,1

En la figura IV-4,1 (c) y (d), se han representado transformadores trifásicos con tomas. Según se ve, puede precederse de dos formas:

- c) disponer las tomas en las entradas de las fases¹;
- d) variar N_1 por corrimiento del punto neutro².

Finalmente, en la figura IV-4,1e, se esquematiza un autotransformador, con tomas, a base de solución análoga a la (c). En autotransformadores, la solución de corrimiento de neutro no se emplea.

Desde el punto de vista económico, no es indiferente el empleo de cualquiera de las posibles soluciones técnicas.

i) No es económico disponer las tomas en baja tensión o, en general, en arrollamiento con tensiones relativamente bajas. Las derivaciones de los devanados, y los contactos de los conmutadores, deberían reverse para elevadas intensidades. Es más económico conmutar en alta.

ii) Si primario y secundario son para altas tensiones, desde el punto de vista del conmutador, pueden ser aceptables cualquiera de las dos soluciones. En tal caso, es preferible disponer la conmutación en el arrollamiento correspondiente a la tensión variable. El objeto es poder proyectar el transformador con la mayor economía, es decir, trabajando, en todos los casos, con la misma inducción B .

En autotransformadores, no se emplea la solución teórica de variar r_t por corrimiento de neutro, ya que se alterarían, a un tiempo, y en igual sentido, N_1 y N_2 . Ello obligaría a tener que recorrer excesivo número de espiras para una determinada variación de r_t (recuérdese que, en autotransformadores, $N_1 \approx N_2$). Esto conduciría a trabajar con inducciones muy distintas. Ofrece otros inconvenientes (cortocircuitos).

Es preciso notar que, si un arrollamiento con tomas tiene una sección constante (todas sus tomas están previstas para la máxima intensidad nominal, I_{1n}), la potencia del transformador será diversa para cada toma. En la figura (a):

toma superior $I_{1n} 1,05 U_{1n}$;

toma normal $I_{1n} U_{1n}$;

toma inferior $I_{1n} 0,95 U_{1n}$.

Puede proyectarse el transformador con secciones escalonadas, de forma que las tomas estén preparadas para intensidades inversamente proporcionales a las tensiones. Así se tienen los transformadores de potencia constante, frente a los anteriores de intensidad constante.

¹ Para expresarlo en forma fácilmente comprensible. Al final de este apartado se formulan reparos.

² Posible tratándose de arrollamientos de transformadores en estrella. Son reducidas las tensiones entre los elementos de conmutación de las diversas fases. Pueden montarse en aislado r único. Caso de fase a tierra, su tensión respecto a tierra será la simple.

Se entenderá por potencia nominal de un transformador la correspondiente a la toma normal. Esta determinará, también, la r_{tn} o relación de transformación nominal.

En principio, puede establecerse cualquier número de tomas, así,

$$30\,000 \pm 2,5\% \pm 5\% - 7,5\% / 380 - 220 \text{ V.}$$

En el ejemplo, el campo de regulación es $+5\%$ hasta $-7,5\%$. Desde el punto de vista económico, conviene no excederse, innecesariamente, en el margen de regulación. El lector imaginará, fácilmente, las razones inmediatas de encarecimiento, al haber muchas tomas con gran margen de regulación. Pero, además, existe otra razón de seguridad, en relación a los cortocircuitos.

Los arrollamientos de una columna han de estar, en lo posible, centrados. De otra forma, en casos de cortocircuito, se producirían fuertes esfuerzos axiales¹. Estos esfuerzos ponen en peligro al transformador, respectivamente lo encarecen si, en el proyecto, se prevé la forma de contrarrestarlos. Por brevedad, y al propio tiempo para aclarar las ideas del lector, en la figura IV-4,2, se dan representaciones gráficas de las actuaciones de los esfuerzos según

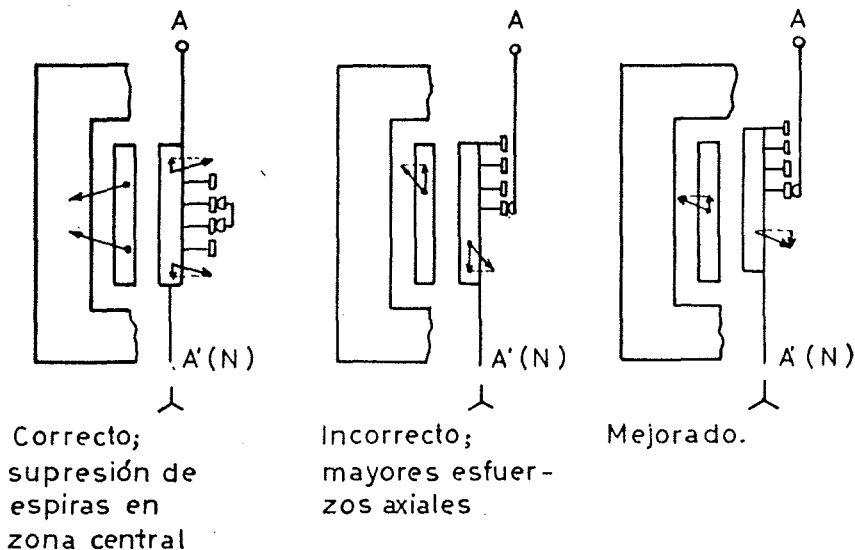


Fig. IV-4,2

¹ Se suponen devanados concéntricos. En caso de cortocircuito, se establecen, en primario y secundario, fuertes corrientes, con sentidos opuestos, que se rechazan. En los sentidos radiales, se traducirá en que las espiras externas tenderán a extenderse, mientras que las internas tenderán a comprimirse. La forma circular es adecuada a estas sollicitaciones. El peligro está en los esfuerzos axiales. Véanse § I-4.3 y § II-3.6.

los casos. Ello conduce a que las variaciones de números de espiras no se realicen en los extremos de los devanados, sino en su parte media. Así se incurre en menores asimetrías axiales.

Lo anterior aconseja evitar márgenes de regulación excesivos, que tienden a motivar asimetrías difíciles de evitar. También explica que no se empleen regulaciones por corrimiento de neutro, en los autotransformadores, ya por naturaleza débiles frente a cortocircuitos.

§ IV-4.2. ELEMENTOS DE CONMUTACIÓN O DE AJUSTE DE LA TRANSFORMACIÓN.

El paso de una tensión a otra puede realizarse en forma simple (económica) o en forma más práctica. Las modalidades de conmutación son:

- 1, con transformador sin tensión;
- 2, con transformador en carga.

1-1. Lo más económico es disponer los extremos de las tomas hasta un tablero, situado en el interior de la caja del transformador, accesible mediante un registro.

1-2. Una mejora, sin gran encarecimiento, consiste en hacer accesibles las diversas tomas desde el exterior (*tomas sobre tapa*). Puede lograrse disponiendo tantos juegos de aisladores sobre tapa como derivaciones existan, o bien dando salida por un mismo *pasamuro* (*atravesador*) a todas las derivaciones de una misma columna, dadas las escasas tensiones que suelen existir entre tales tomas. Cabe una solución mixta entre 11 y 12, es decir, de las diversas tomas sobre tablero, conectar, con salida al exterior, aquellas que, en un sector de trabajo determinado, se cree que van a tener más utilización.

1-3. Otra mejora consiste en disponer conmutadores (tres monofásicos o uno trifásico), que permitan la maniobra, desde el exterior, sin tensión. Su cuerpo de conmutación suele estar sumergido en el aceite de la caja, ya que no realiza cortes de corriente.

2. En ocasiones, no es tolerable la interrupción del servicio. En otras, dada la frecuencia con que se prevé realizar los cambios de tomas, es inconveniente tener que proceder a previas interrupciones. Existen casos (hornos eléctricos) en que las conmutaciones de tensiones se realizan, normalmente, en los procesos de trabajo. Interesan *conmutadores* o *reguladores de tensión bajo carga*.

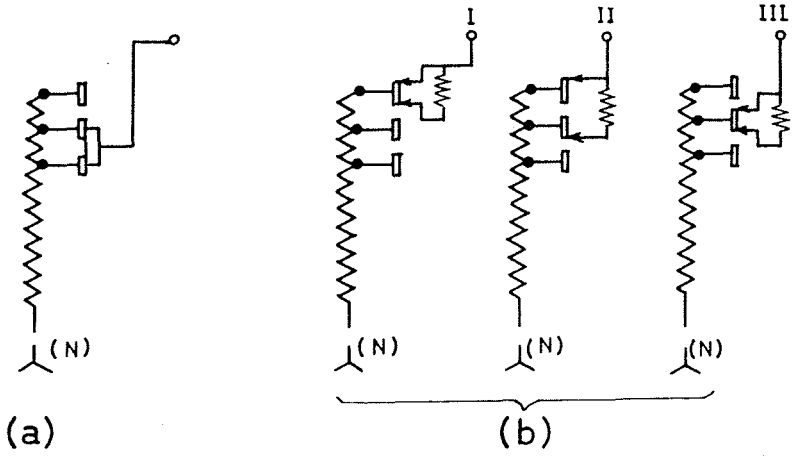


Fig. IV-4,3

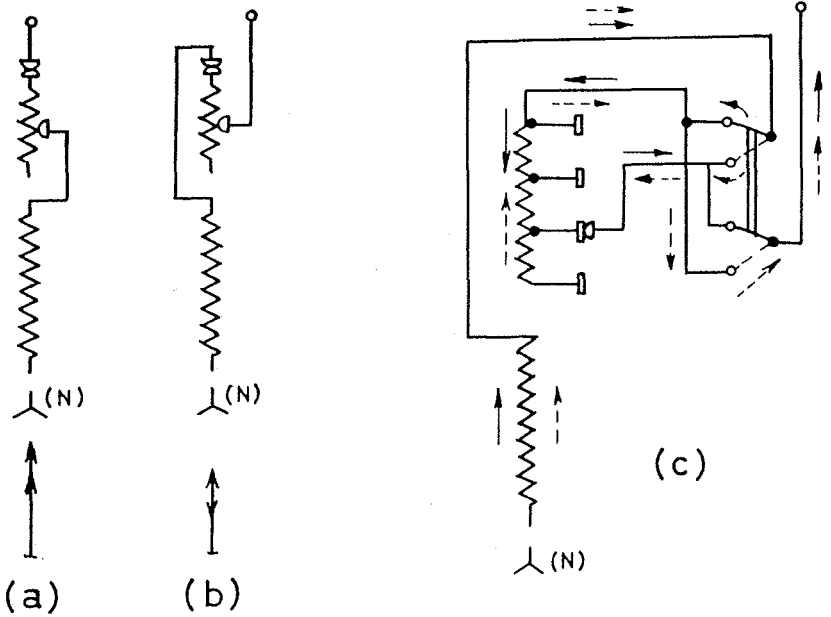
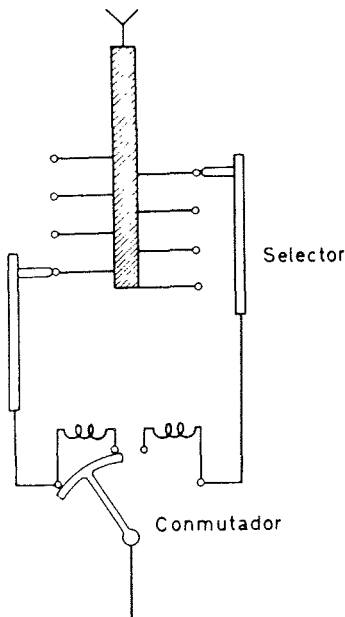


Fig. IV-4,4

La necesidad de no interrumpir el paso de corriente (carga) crea el problema que se ve en la figura IV-4.3a. Al estar el contacto móvil, pasajeramente, «puenteando» unas espiras del arrollamiento, se crea, localmente, en ellas, un cortocircuito. La forma de evitarlo se ve en (b). Se ha representado la operación de la conmutación en tres tiempos. Los dos contactos móviles están unidos a través de una impedancia (puede ser una bobina o, incluso, una resistencia, dado el breve tiempo de la conmutación) de valor reducido, pero suficiente para moderar la corriente de cortocircuito. El proceso completo de la conmutación está mecánicamente establecido, de forma que sea brusco y completo, es decir, independiente de la voluntad del operador. Al existir cortes de arco, se producirán alteraciones del aceite. Esto hace necesario disponer la conmutación en departamento con aceite separado del resto. Es preciso evitar la difusión de los productos del arco.

Otra particularidad de interés consiste en establecer un inversor, lo que permite reducir el número de tomas a derivar en cada arrollamiento, según puede verse en la figura IV-4.4. En (a) se ve como a las espiras fijas se les agregan las espiras elegidas de regulación (tratándose del secundario, puede verse, en la parte inferior, el diagrama vectorial). En (b), por el contrario, las espiras actúan substractivamente. Esto duplica la eficacia de las tomas establecidas, reduciendo el número de espiras de conmutación (asimetría). En (c) se representa el inversor.

En la figura IV-4.5 se distinguen dos órganos, el selector y el conmutador. El selector (maniobrado a mano, o por motor auxiliar) permite la elección de nueva toma. Una vez elegida, y a voluntad, se puede realizar la conmutación. Solamente el conmutador precisa estar en departamento separado.



Las características de un regulador de tensión en carga son: tensión de servicio (aislamiento), número de tomas, tensión máxima de escalón, intensidad de contactos y, finalmente, se indicará si es tipo para neutro o no. Según sean las características requeridas será más recomendable una ejecución simple o más elaborada. Los recursos de que se dispone son: selector de fina regulación, selector de regulación grosera, inversor y conmutador.

Se ha visto (figuras IV-4.1c y e) que los conmutadores trifásicos pueden preverse para actuar en la formación del neutro, o en los extremos opuestos. Tratándose de transformadores, lo primero es más económico, ya que se maniobrará casi sin tensiones. Con lo segundo, existe tensión entre las tres fases del conmutador. Según explicado, en los autotransformadores no puede utilizarse la ventaja de realizar la conmutación en el neutro.

Fig. IV-4,5

§ IV-4.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS REGULADORES DE INDUCCIÓN, DE LOS TRANSFORMADORES Y DE LOS AUTOTRANSFORMADORES.

	Reguladores de inducción	Transformadores con tomas	Autotransformadores con tomas
Valor de compra	elevado	x	muy favorable
Rendimiento	desfavorable	x	muy favorable
Corriente de vacío	elevada	x	muy favorable
Regulación de tensión	continua	discontinua	discontinua
Contactos	x	implican conservación	implican conservación
Resistencia a cortocircuitos	poco resistentes	x	poco resistentes
Posibilidad de construir para altas tensiones	limitada	x	x

Esto conduce a que, en las regulaciones con grandes potencias se usen los transformadores o autotransformadores. En laboratorios, para disponer de una gama completa y continua de tensiones, se usan reguladores de inducción.

Ejemplo

Elección de las tomas convenientes. Se pueden presentar circunstancias diversas. Un ejemplo ejercitará en razonar, aun cuando surjan otros casos.

Se estudia un transformador de 40 MVA para la transformación nominal 115/60 kV. La tensión de entrada oscilará entre $U_1 = 120 \div 100$ kV.

El secundario alimenta una línea que, a plena carga con el más desfavorable factor de potencia previsible (0,75), motivará una caída de tensión de 2 kV. El propio transformador, para aquella carga, dará una caída interna de 4 kV (véase § II-11). En vacío se desea poder disponer de 60 kV, y en carga, al final de línea, igualmente de 60 kV.

Dado que las caídas de tensión (de la línea e interna del transformador) totalizan 6 kV, se necesita, en el secundario, una tensión de 66 kV (sin carga) que, con las indicadas caídas proporcionará la deseada en final de línea, al haber la referida carga.

Cabe proceder de varias formas. Podrían preverse reguladores de tensión tanto en alta como en baja, solución excesivamente onerosa. Se dispondrá, únicamente, regulador de tensión en alta, pues, dada la potencia relativamente elevada, resultaría caro un conmutador en 60 kV (670 A). La circunstancia de ser variable la tensión de entrada abona tal elección.

Al no existir tomas en el lado 60 kV, y, sin embargo, tenerse que proporcionar tensiones

variables entre 60 y 66 kV, hay que contar con inducciones B , a su vez variables, según el régimen de trabajo. Las recomendaciones *VDE 0532*, § 34b, admiten, para las tensiones (luego para Φ y B en los núcleos) variaciones de $\pm 5\%$. Por lo tanto, el margen de variación deseado (6 kV, 10%) se puede lograr sin tener que pensar en un transformador especial¹.

La tensión nominal secundaria aconsejable es

$$60 + 6/2 = 63 \text{ kV}$$

En virtud de lo requerido, las relaciones de transformación extremas serán

$$r_{t \text{ max}} = 120/60 = 2$$

$$r_{t \text{ min}} = 100/66 = 1,515$$

Dada la tensión nominal secundaria (denominada 63 kV), las denominaciones de las tensiones límites primarias han de ser:

$$U_{1, \text{max}} = 63 \cdot 2 = 126 \text{ kV}$$

$$U_{1, \text{min}} = 63 \cdot 1,515 = 95,4 \text{ kV}$$

Con estos márgenes de regulación puede lograrse lo apetecido, comprobación:

en vacío

$U_1 = 120 \text{ kV}$, aplicada a la toma 126 kV

$$U_2 = 120 \frac{63}{126} = 60 \text{ kV}$$

$U_1 = 100 \text{ kV}$, aplicada a la toma 105 kV

$$U_2 = 100 \frac{63}{105} = 60 \text{ kV}$$

a plena carga

$U_1 = 100 \text{ kV}$, aplicada a la toma 95,4 kV

$$U_2 = 100 \frac{63}{95,4} = 66 \text{ kV}$$

tensión en bornes (plena carga y $\cos \varphi = 0,75$) = 62,5 kV

tensión final de línea (p.c. y $\cos \varphi = 0,75$) = 60 kV

¹ Si bien se examina, la inducción B no llegará a sufrir variaciones de $\pm 5\%$. Nótese, en efecto, que la tensión más elevada se requiere con una carga desexcitante.

$U_1 = 120$ kV, aplicada a la toma 114,4 kV

$$U_2 = 120 \frac{63}{114,4} = 66 \text{ kV}$$

tensión en bornes (p.c. y $\cos \varphi = 0,75$) = 62,5 kV

tensión final de línea (p.c. y $\cos \varphi = 0,75$) = 60 kV

Como tensión nominal de entrada se adoptará

$$U_{1n} = (126 + 95,4) : 2 = 110,7 \text{ kV}$$

Se desea poder regular por escalones o saltos, en valor absoluto uniformes, que no excedan el 2,5 % de la tensión nominal de entrada:

Tensión por escalón 2,5 % de 110,7 kV = 2 767,5 V

Campo de regulación (126-95,4) kV = 30 600 V.

Número mínimo de escalones $30\,600 / 2\,767,5 \approx 12$ escalones.

Se tratará de un regulador para trece tomas, o sea la nominal ± 6 .

En relación con el tema que se acaba de estudiar es oportuna la lectura del apéndice XV.

CAPÍTULO V

TRANSFORMACIONES ESPECIALES¹

§ V-1. Transformadores con tres arrollamientos.

§ V-1.1. TEORÍA ELEMENTAL.

Imagínese un transformador con un primario y dos o más secundarios estos últimos con diversos números de espiras (e incluso, si se desea, con distintas conexiones), se tiene un transformador múltiple. Con él se realizan, mediante una sola máquina, y simultáneamente, las transformaciones a dos o más tensiones secundarias².

La teoría, en el transformador idealizado (sin caídas internas ni corrien-

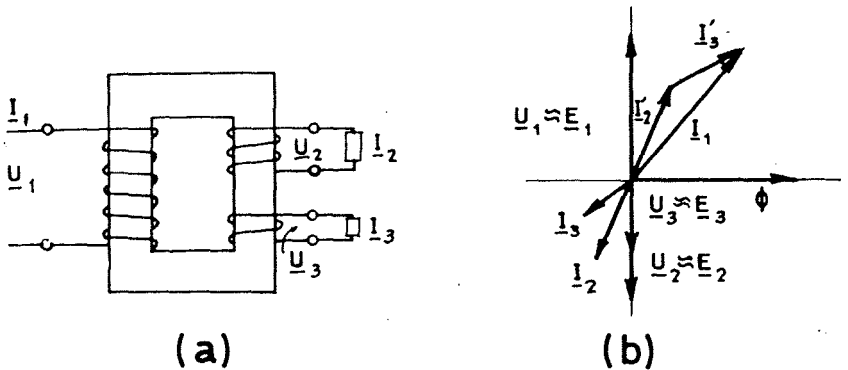


Fig. V-1,1

¹ Brevemente, sin análisis detenidos, se va a dar noticia sobre algunas transformaciones especiales.

² También pueden existir más de un primario y uno o varios secundarios. En general se sigue el criterio de no complicar excesivamente la unidad. Antiguamente las transformaciones solían realizarse separadamente. La seguridad alcanzada en los transformadores, y razones de economía, justifican el uso de transformadores con tres devanados.

te de vacío) se interpreta, simplemente, mediante el diagrama vectorial de la figura V-1,1, referido a un transformador monofásico (convenciones de signos y flechas de valoración como en la figura II-3,1).

En cuanto a las f.m.m. en el núcleo, y prescindiendo de la de excitación (en vacío), se ha de cumplir

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 + N_3 i_3$$

Así pues

$$i_1 = \frac{N_2}{N_1} i_2 + \frac{N_3}{N_1} i_3 = i'_2 + i'_3$$

Y, en valores vectoriales,

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 + \frac{N_3}{N_1} I_3 = I'_2 + I'_3$$

Parece lógico que la potencia nominal del primario sea la suma de las potencias nominales de los secundarios. Así sería si no existiese la posibilidad de poder dar diversas clases de servicio, incluso la plena potencia del primario en la transformación U_1/U_2 o bien, indistinta, pero no simultáneamente, en la U_1/U_3 . En cualquier caso está claro que la potencia del primario tendrá que ser igual a la suma de las máximas potencias secundarias que simultáneamente tengan que servirse.

Ejemplo, los valores y símbolos se darán según orden decreciente de tensiones :

$$50 - 40 - 20 \text{ MVA}$$

$$132 \pm 5\% - 7,5\%/66 \pm 2,5\%/6 \pm 2,5\%$$

$$Y, \text{ y } 0, \text{ d } 5$$

Estos transformadores se representan según se ve en figura V-1,2c.

A los efectos estimativos de pesos y dimensiones, un transformador con tres arrollamientos pueda asimilarse a uno de dos arrollamientos cuya potencia sea igual a la mitad de la suma de las potencias de los tres arrollamientos. En el ejemplo, $(50 + 40 + 20)/2 = 55$ MVA.

Las mismas posibilidades de servicio no las ofrecerían sino dos transformadores de 40 MVA y 20 MVA respectivamente. Ello permite formarse idea del ahorro que el transformador con tres arrollamientos representa. En realidad, el ahorro es mayor por razones fáciles de imaginar.

§ V-1.2. CIRCUITO EQUIVALENTE.

Interesa disponer, para un transformador con tres arrollamientos, de un esquema análogo al que se conoce para los transformadores con dos devanados (§ II-6). Se recuerda que, en éstos, el esquema equivalente era el de la figura V-1,2a.

Para los problemas que se presentan en la práctica, suele ser suficiente el esquema simplificado (b)¹.

En el caso de transformadores con tres arrollamientos, el esquema equivalente simplificado es según figura V-1,2d. Todas las impedancias (Z_1 , Z_2 y Z_3) se entienden reducidas a una tensión, por ejemplo U_1 .

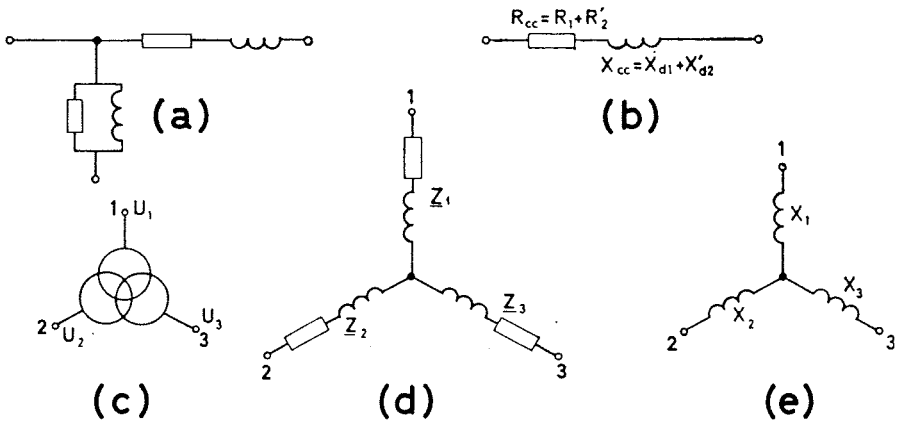


Fig. V-1,2

Aun admite otra simplificación, que la práctica demuestra ser útil y suficiente (problemas de cortocircuito y de estabilidad) en bastantes casos. Consiste en confundir Z_{cc} con X_{cc} ². Así queda el sencillo esquema equivalente de la figura V-1,2e.

Como ampliación al tema, véase apéndice VII.

Hay que tener presente que, además, en las transformaciones pueden producirse (según los grupos horarios) desfases. En los circuitos equivalentes cabe representarlos mediante transformadores ideales (sin caídas internas) de relación 1/1. Un ejemplo, a base de esquema unifilar, véase en la figura V-1,3.

¹ Esto es más aceptable, en el caso de transformadores con tres devanados, ya que suele tratarse de grandes unidades, lo que significa que suelen poseer valores relativos de I_0 pequeños. Véase apéndice VII.

² Esto es más aproximado tratándose de transformadores grandes, y, por consiguiente, en transformadores con tres arrollamientos que suelen serlo. Véase apéndice VII.

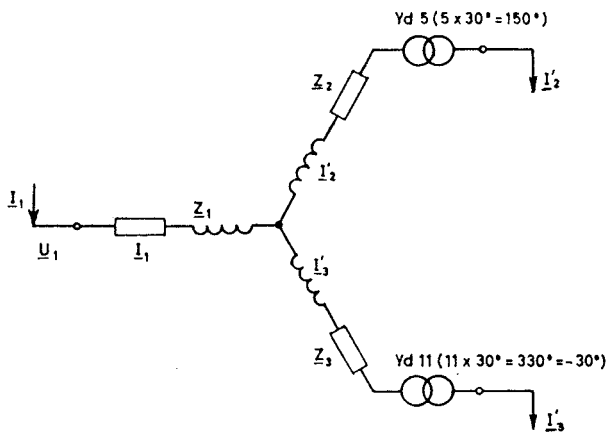


Fig. V-1,3

§ V-2. Conexión de transformadores en V.

La transformación a base de banco trifásico, mediante tres transformadores monofásicos conexión Dd, permite la eliminación de un transformador, por ejemplo en caso de avería. Queda un banco en conexión Vv. Se realiza la misma transformación trifásica, si bien con potencia reducida:

U = tensión compuesta,

Corrientes correspondientes a la transformación trifásica, a base de tres transformadores monofásicos $\left\{ \begin{array}{l} I = \text{de línea} \\ I_f = \text{de fase} \end{array} \right.$

1.º, potencia de un transformador monofásico $U I_f = \frac{1}{\sqrt{3}} U I$

2.º, potencia del banco con tres transformadores $3 U I_f = \sqrt{3} U I$

3.º, potencia de transformación del banco con dos transformadores

$$\sqrt{3} U I_f = U I$$

4.º, potencia instalada en el último caso $2 U I_f = \frac{2}{\sqrt{3}} U I$

Se observa un mal aprovechamiento del banco en conexión Vv que, teniendo una potencia instalada

$$\frac{2}{\sqrt{3}} U I,$$

no puede servir, en trifásico, más que *UI*. Únicamente ha de utilizarse como recurso.

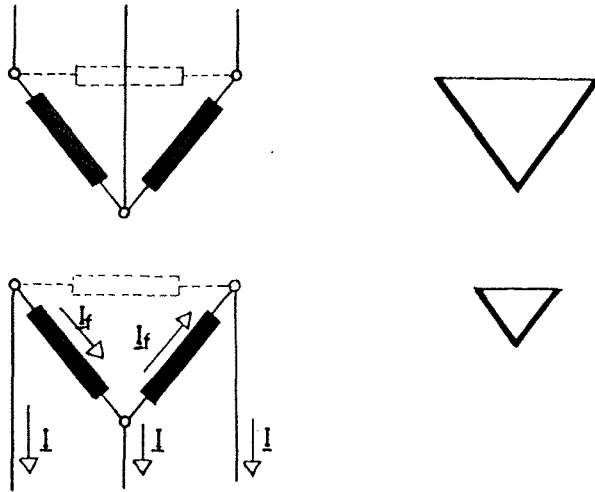


Fig. V-2,1

§ V-3. Transformación de sistemas trifásicos en monofásicos.

§ V-3.1. PLANTEO DEL PROBLEMA.

Aun cuando se procura evitarlos, en la práctica se presentan consumos monofásicos. Son conocidos los inconvenientes¹. Si se trata de pequeños consumos (usos no industriales), las compañías los toleran, a base de procurar un reparto de diversos consumos de este tipo entre las distintas fases. Por la ley de los grandes números, se suele lograr una carga total trifásica, suficientemente equilibrada.

Cuando existen consumos monofásicos de importancia, las compañías exigen el empleo de un sistema que reparta aquella carga entre las tres fases de un sistema trifásico. Esta es la motivación de esta transformación.

La solución ideal del problema consistiría en lograr que, en la línea trifásica, las cargas fuesen equilibradas (corrientes con igual módulo, y desfasadas 120°). La dificultad estriba en lo siguiente, un consumo equilibrado, por el primario (lado trifásico), supone una entrada de potencia instantánea

¹ Como ejemplos: calentamientos que los sistemas inversos de corriente ocasionan en los amortiguadores de los generadores, desequilibrios en las tensiones por distintas caídas de tensión en las diversas fases, etc.

constante¹, mientras que el consumo monofásico (en el secundario) es un flujo de energía no constante (su potencia instantánea responde a una senoide trasladada, de frecuencia doble que la del sistema)¹. Esta discrepancia solamente se puede tratar de cubrir mediante acumulamientos de energía más o menos caros y complicados, eventualmente con bajos rendimientos².

En general se admiten repartos imperfectos de la carga monofásica, entre las tres fases del lado primario, aun cuando no se logre el equilibrio. Según sea la magnitud de la carga monofásica, se puede ser más o menos exigente en el equilibrado parcial.

A base de esta solución incompleta del problema, existen bastantes métodos relativamente simples y económicos (nunca tanto como la transformación trifásico-trifásico). A título de ejemplo, se va a informar sobre dos, entre los más conocidos.

§ V-3.2. CONEXIÓN SCOTT³.

Consiste, en dos transformadores monofásicos con los convenientes números de espiras. Los primarios se conectan en T, y los dos secundarios

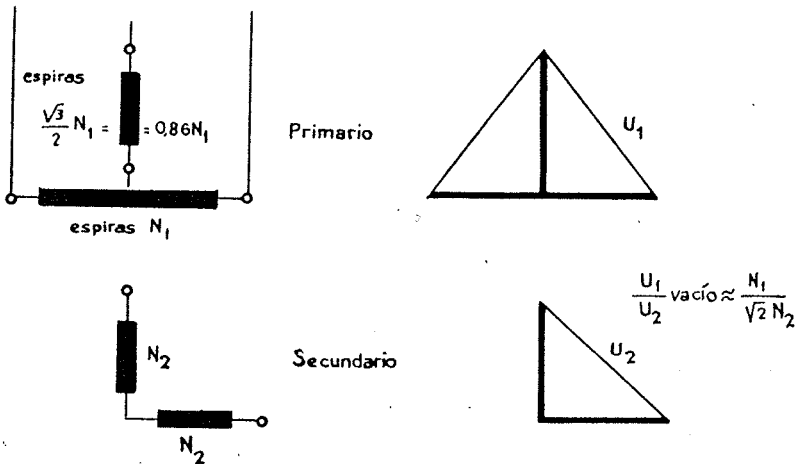


Fig. V-3,1

¹ Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § III-8.2 y § II-29.

² Un medio sencillo, que inmediatamente se ocurre, es un sistema rotatorio formado por un motor trifásico accionando a un generador monofásico. La masa del grupo actúa como volante. Si se supone masa infinita, se tiene un consumo equilibrado y constante. Otros sistemas de almacenamientos son condensadores, bobinas y, en general, circuitos magnéticos.

³ Conexión realmente concebida para la transformación, trifásico en bifásico, que aquí no se trata. También para la transformación de un sistema trifásico en doble monofásico. Se ha utilizado en tracción para la alimentación de dos sectores monofásicos de línea. Lo más adecuado es a base de dos transformadores monofásicos. Si las dos cargas monofásicas son iguales, el reparto en el sistema trifásico es simétrico.

en L, según se ve en la figura V-3,1. Los números de espiras de los arrollamientos primarios están en la misma relación que la altura y la base de un triángulo equilátero.

Cuando la transformación trifásico-bifásico se realiza mediante un núcleo trifásico, la conexión se denomina *LEBLANC* (véase *Vocabulario CEI*).

Según se adopte una u otra solución, el tipo de reparto de cargas en el primario es distinta.

§ V-3.3. CONEXIÓN V-Y INCOMPLETA.

Esta conexión, también llamada *V-v invertida*, consiste en conectar los primarios en V, mientras los secundarios se disponen según dos brazos de una Y, véase figura V-3,2.

Está clara la ventaja de la inversión de la conexión en el secundario. Si la intensidad de fase secundaria es I_{f2} , las potencias de los secundarios son:

(b) con inversión de la conexión secundaria,

$$U_{2b} I_f = U_1 \frac{\sqrt{3} N_2}{N_1} I_{f2};$$

(c) sin inversión de la conexión secundaria,

$$U_{2c} I_f = U_1 \frac{N_2}{N_1} I_{f2}$$

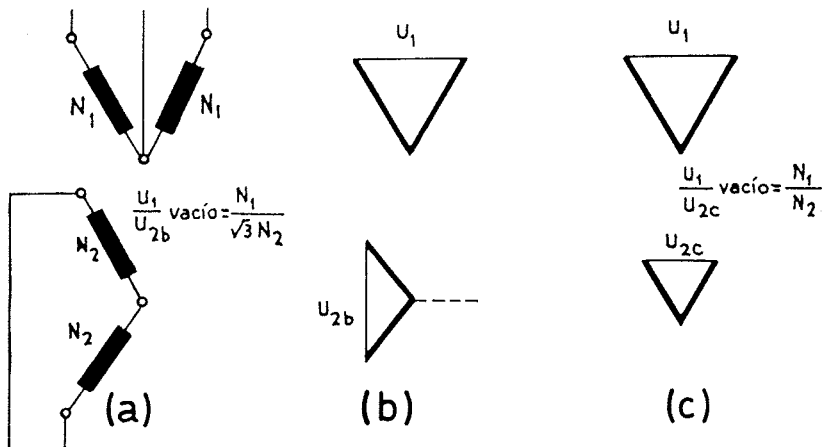


Fig. V-3,2

La conexión V-y incompleta puede realizarse con dos transformadores monofásicos, o a base de núcleo trifásico con tres columnas (de igual sección). La columna central, sin arrollamiento, da el retorno de los flujos de las otras.

§ V-4. Transformación de sistemas trifásicos en exafásicos.

Los sistemas exafásicos se usan, casi exclusivamente, a fines de rectificación. La figura V-4,1, pone de relieve la ventaja del sistema exafásico, que, al ser rectificado, proporciona tensiones y corrientes con menor factor de armónicas¹.

La transformación en exafásico puede lograrse de varias formas, el primario puede disponerse en triángulo, como se ve en la figura V-4,1, o bien en estrella, como está en la figura V-4,2. Independientemente, el secundario puede conectarse en:

- i) *doble estrella*, figura V-4,2a, diagrama vectorial (a'),
- ii) *doble triángulo* (b), diagrama vectorial (b'),
- iii) «*horquilla*» (c), diagrama vectorial (c').

Como se ve, únicamente las conexiones doble estrella y «horquilla» proporcionan neutro.

¹ Véase *Análisis de Fourier y cálculo operacional aplicados a la electrotecnia*, del mismo autor.

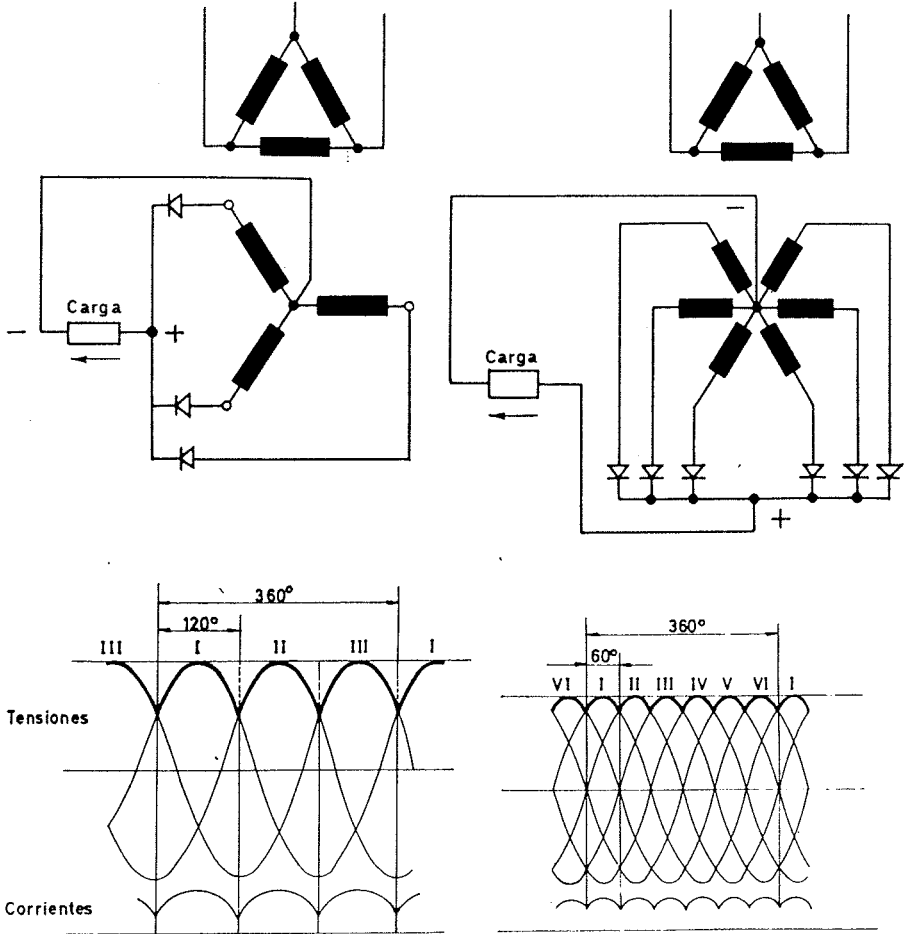


Fig. V-4,1

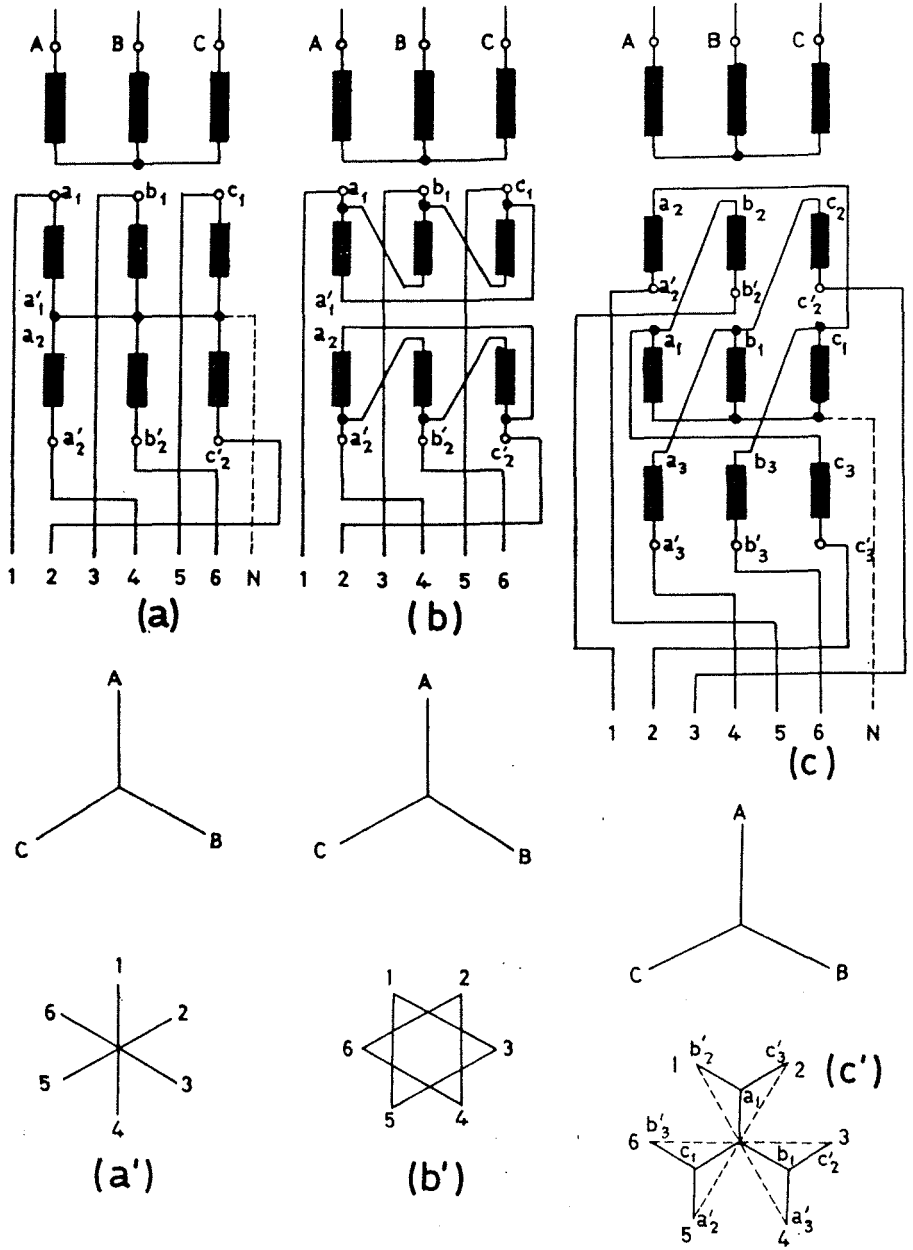


Fig. V-4,2

§ V-5. Transformación de sistemas trifásicos en dodecafásicos.

También con fines de rectificación, y persiguiendo menor contenido en armónicas, interesa disponer de sistemas dodecafásicos partiendo de sistemas trifásicos. Entre otras soluciones, puede lograrse con una doble transformación trifásico-exafásico, recurriendo a la conocida propiedad de los grupos Dy de desfazar 330° ($\pm 30^\circ$ o $\pm 150^\circ$), frente a los grupos Yy 0 (0° o 180°). Véase figura V-5,1.

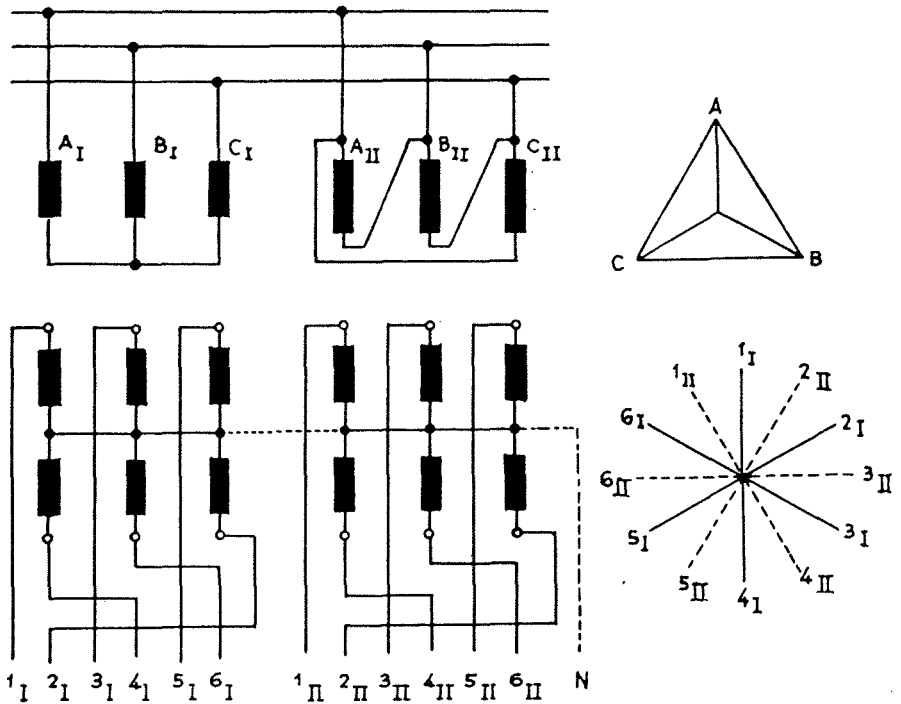


Fig. V-5,1

CAPÍTULO VI

TRANSFORMADORES DE MEDIDA Y DE PROTECCIÓN

§ VI-1. Transformadores de medida y de protección. Objetivos básicos.

En las instalaciones eléctricas existe la necesidad de conectar aparatos de medida. También es preciso disponer relés (reveladores, «relais») con finalidades diversas (protección, aviso, enclavamiento, etc.). Unos y otros suelen ser de constitución delicada, reducidas dimensiones y buena precisión. Frecuentemente las magnitudes que hay que medir (o vigilar) son elevadas tensiones, corrientes fuertes, o concurren ambas circunstancias. Se suele requerir que los aparatos de medida o de vigilancia vayan dispuestos en cuadros o pupitres centralizados. Surge la dificultad de conducir tensiones y corrientes elevadas hasta aquellos cuadros, los inconvenientes saltan a la vista.

Por ello, y no podía ser de otra forma, casi al propio tiempo que se iniciaba el uso de la corriente alterna, nacieron los transformadores de medida.

Se resuelve a base de conducir magnitudes proporcionales a las originales, pero con valores más manejables. Los aparatos más importantes son los transformadores de medida inductivos:

- i) transformadores de corriente;
- ii) transformadores de tensión.

Con sus primarios conectados en alta o en baja tensión, según corresponda, transforman las magnitudes que se desea medir, en corrientes y tensiones moderadas en el secundario (que por motivos de seguridad puede conectarse a tierra). De esta forma, cabe construir aparatos de medida o de protección

(relés) normalizados (por ejemplo: a base de bobinas amperimétricas para intensidades nominales 5 A, y bobinas voltimétricas para tensiones nominales 110 V). Tales corrientes y tensiones se conducen económicamente (secciones reducidas y aislamientos bajos) a cuadros, etc.

Aun sin el problema de las canalizaciones, los transformadores de medida son de utilidad. Supóngase la necesidad de medir corrientes con intensidades del orden de los 800 A, en baja tensión. La instalación directa de un amperímetro obligaría a un aparato grande difícilmente compatible con los requerimientos de precisión. Pero, además, no deben olvidarse las posibles perturbaciones magnéticas que tan fuertes corrientes pueden motivar en los aparatos. Finalmente, en caso de cortocircuito en la instalación, se crearían considerables esfuerzos dinámicos que tendrían que soportar delicados órganos amperimétricos.

Resumiendo, los objetivos principales de los transformadores de medida son:

1.º Aislar o separar los circuitos y aparatos de medida, protección, etc., de la alta tensión.

2.º Evitar perturbaciones electromagnéticas de las corrientes fuertes, y reducir corrientes de cortocircuito a valores admisibles en delicados aparatos de medida.

3.º Obtener intensidades de corriente, o tensiones, proporcionales (por lo menos en determinada zona) a las que se desea medir o vigilar, y transmitir las a los aparatos apropiados.

Este examen pone de manifiesto que la buena elección en transformadores de medida no se limita a una relación de transformación y a una tensión nominal (aislamiento). Debe, además de proporcionar la debida precisión, garantizar la seguridad del personal y de la instalación, así como proteger a los aparatos. Y, sin embargo, la experiencia demuestra cuán frecuente es la mala elección de transformadores a los que, estándoles confiada la protección, no ofrecen garantías en los momentos críticos.

Si bien pueden destinarse a mediciones o a protecciones, cuando no sea imprescindible distinguir, se les denominará, genéricamente, transformadores de medida. Es más, en ocasiones, un mismo transformador alimenta aparatos de medida y elementos de protección.

§ VI-2. Primeras ideas sobre transformadores de corriente.

En la figura VI-2,1a se representa un transformador de corriente en disposición de trabajo

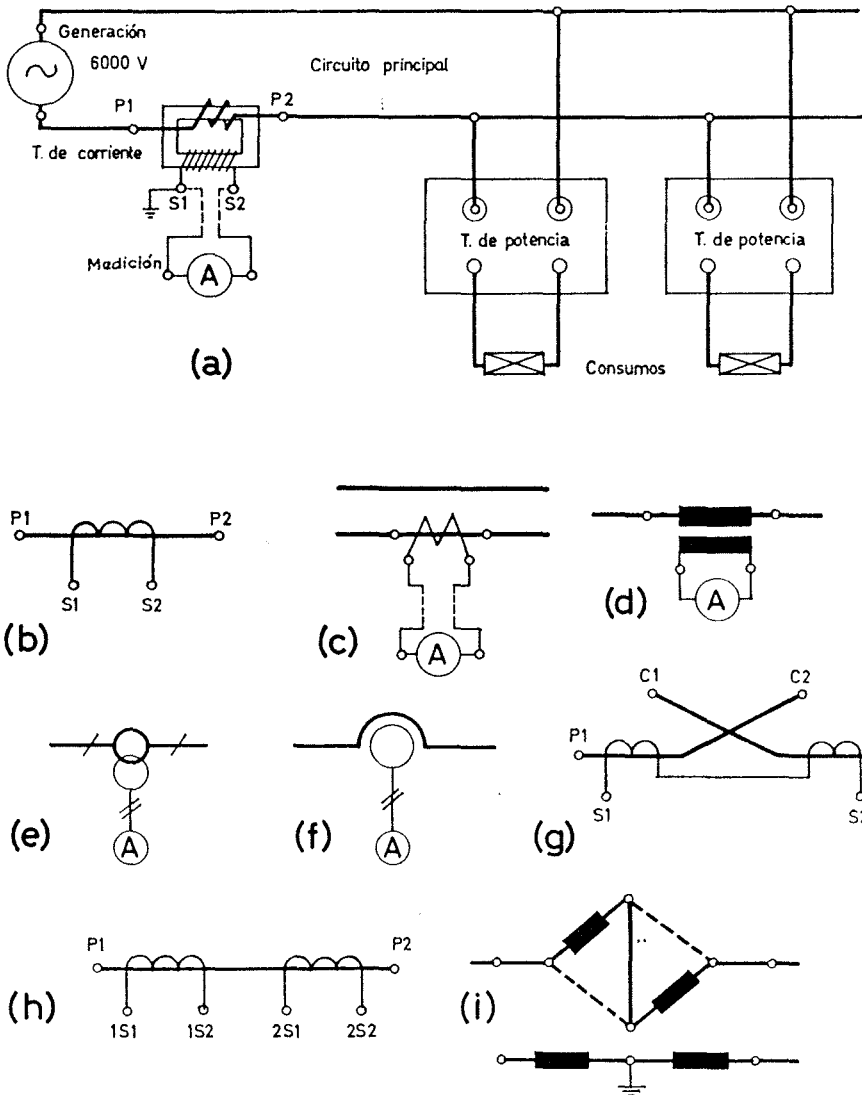


Fig. VI-2,1

El primario tendrá aislamiento adecuado para la tensión a que esté destinado (tensión nominal, en el ejemplo 6 kV¹). Al propio tiempo, realiza la transformación de corriente (por ejemplo, nominal 400/5 A). El secundario se ve puesto a tierra, para garantía del usuario y de la instalación.

En (b), (c), (d), (e) y (f) se dan representaciones esquemáticas usuales para transformadores de corriente. La (b) es la recomendada por *UNE* y por *CEI*.

En (g) e (i) se representan transformadores de doble relación, de los que se tratará. En (h) un transformador con dos secundarios. Otras modalidades pueden verse en las aludidas normas.

Por la figura (a), se ve que la constitución general de un transformador de esta naturaleza es análoga a la de un transformador monofásico de potencia. Pero ha de observarse su forma especial de trabajo. El *primario*, en efecto, *esta dispuesto en serie* en relación con el *circuito principal* (objeto de medición), siendo así que los transformadores de potencia se alimentan en derivación. En cuanto a las cargas de los secundarios, la diferencia es, también, esencial. Las impedancias de carga son bobinas amperimétricas, luego con bajos valores. Esto significa que los transformadores de corriente trabajan relativamente próximos al cortocircuito del secundario². Nótese que, a diferencia de un transformador de potencia, por el primario del transformador de corriente circula una intensidad, independientemente de la carga que tenga conectada el secundario³.

Más adelante se verá que el transformador de tensión trabaja cerca del régimen de vacío. Los transformadores de potencia suelen hacerlo con cargas intermedias.

Tampoco habrá pasado desapercibido que, mientras el transformador de potencia recibe en el primario la plena tensión de la línea (en el ejemplo 6 000 V), en el de corriente se reduce a una simple caída de tensión en la línea. Será, necesariamente, pequeña, pues, de otra forma, alteraría excesivamente el régimen del circuito objeto de medición.

¹ Se entenderá por tensión nominal la de placa de características. En este momento es suficiente la idea. No obstante, para una determinada tensión de trabajo puede requerirse mayor o menor garantía. A tal efecto, se define el *nivel de aislamiento* por dos valores: tensiones de ensayo, garantizadas, a frecuencia industrial y con onda de choque.

² A base de secundarios con corrientes nominales de 5 A (véase más adelante), la tensión en los bornes del secundario oscila, según cargas, entre 0 y 15 V. En el caso en que por el circuito principal circule una corriente de cortocircuito ($I_1 = I_{cc}$), puede alcanzar algunos centenares de voltios.

³ El secundario de un transformador de corriente constituye un ejemplo de fuente de corriente.

Obsérvese que, al existir multiplicidad de cargas, en los transformadores de corriente se disponen en serie (aumenta Z_c), mientras que en los de potencia suelen disponerse en derivación (se aumenta la carga disminuyendo Z_c).

En definitiva, y prescindiendo de otras características más especiales que luego se estudiarán, las básicas se reducen a la siguiente especificación:

transformador de corriente 10 kV, 400/5 A.

Ello significa ser adecuado para trabajar en líneas con tensión hasta 10 kV (en el ejemplo 6 kV) y transformar las corrientes según el cociente de intensidades indicado.

Las corrientes nominales normalizadas para los secundarios son 5 A y 1 A, la CEI también admite 2 A. Tanto UNE como CEI dan preferencia a 5 A.

En el caso de tener que alimentar conducciones de gran longitud, puede ser interesante 1 A. La ventaja de este valor nominal consiste en permitir reducir las secciones de «filería», y en disminuir consumos (véanse § VI-6.2 y Ap. XII-2).

Ejemplo

Un transformador monofásico de corriente tiene, según placa de características, una potencia de precisión ¹ de 50 VA. La línea, entre secundario de transformador y aparatos de medida, se instalará con conductor de 4 mm², con una resistencia de 0,0044 Ω/m. Luego, con la corriente nominal secundaria $I_{sn} = 5$ A, la potencia empleada, por metro de conexión, será $RI_{sn}^2 = 0,11$ VA. Longitud máxima de la conexión $l = 50/0,11 = 454$ m (distancia máxima entre transformador y aparatos 227 m).

Con un transformador de 50 VA, pero con corriente nominal secundaria $I_{sn} = 1$ A, el consumo, por metro de conductor de 4 mm², sería 0,0044 VA. Luego el conductor de conexión podría tener una longitud máxima de 11 360 m.

Lógicamente, las longitudes útiles reales tienen que ser notablemente inferiores, ya que buena parte de la potencia disponible ha de emplearse en bornes de aparatos alimentados. Se ha tratado, nuevamente, de una comparación a base de longitudes teóricas máximas. Aclaraciones se verán en el § VI-6 y en el apéndice XII-2. Así, si el consumo previsto para los aparatos es de 25 VA (mitad de los 50 VA), las longitudes máximas disponibles serían la mitad de las antes calculadas.

Existen transformadores conmutables, para doble relación. Se obtienen, véase figura VI-2, 1g e i disponiendo dos elementos primarios en serie o en paralelo. También pueden obtenerse por el secundario.

También se recurre, como en los transformadores de potencia, a establecer diversas tomas, bien sea en el primario o en el secundario.

Un transformador de corriente puede estar previsto para los dos valores normalizados 5 A, y 1 A.

Existen transformadores para más de dos relaciones, véase, por ejemplo, § VI-5.

¹ Véase § VI-6. No debe excederse, si se desea la garantía de precisión del transformador.

Ejemplo de utilización

Se estudia una línea trifásica que, en una primera etapa, va a transmitir, a 110 kV, 60 MVA. Se proyecta de forma que, en segunda etapa, pueda transportar 240 MVA a 220 kV (se instalarán conductores en «duplex»). Las intensidades correspondientes son:

$$1.^{\text{a}} \text{ etapa} \quad \frac{60}{\sqrt{3} \cdot 110} \cdot 1\,000 = 315 \text{ A}$$

$$2.^{\text{a}} \text{ etapa} \quad \frac{240}{\sqrt{3} \cdot 220} \cdot 1\,000 = 630 \text{ A}$$

El transformador aconsejable es el tipo 220 kV, primario conmutable 350 ó 700 A, secundario 5 A o 1 A. Si simplemente se instalara un transformador 700/5 A, en la primera etapa se emplearía a base de intensidades reducidas, en relación con las nominales. Esto motivaría mayores errores (véase apéndice XII). Además del inconveniente indicado, podría suceder que, con la relación 700/5 A en la primera etapa, los aparatos de medida estuvieran desprotegidos (se verá en § VI-7).

La designación del transformador elegido es:

$$700||350/5 \text{ A} \quad \text{o} \quad 700||350/1 \text{ A}$$

§ VI-3. Primeras ideas sobre los transformadores de tensión.

Se utilizan para alimentar bobinas voltimétricas (contadores, voltímetros ordinarios o registradores, relés, etc.).

Según se dijo, los aparatos se suelen instalar centralizados en paneles. No cabe pensar en acceder con la alta tensión hasta el cuadro, ni en construir aparatos de medida o protección para tales tensiones. Se reducen a valores proporcionales moderados. Para seguridad, el secundario estará puesto a tierra.

En la figura VI-3,1a, se aprecia la constitución y forma de trabajo de un transformador de tensión, análogas a las de un transformador de potencia. En (d) (e) y (g) se dan representaciones unifilares usuales. En (b) y (c) otras representaciones, también usadas, la primera se refiere a la medición de una tensión compuesta. En (f) se ven un transformador de corriente (alimentando las bobinas amperimétricas de un amperímetro y de un vatímetro), y un transformador de tensión (alimentando las voltimétricas de un voltímetro y de un vatímetro). Finalmente, en (g) se da un esquema unifilar simplificado, análogo al (f), pero, alimentando, además, a un contador (Wh).

Las tensiones secundarias normalizadas en Europa son 110 y 100 V¹. En ocasiones, se prevén secundarios con dos tomas para disponer de ambas tensiones.

¹ UNE 21-088-81 (2) recomienda 110 V, mientras que VDE 0414 prescribe 100 V. Estas tensiones se entenderán cuando los transformadores monofásicos tengan que instalarse en líneas monofásicas, o entre fases de una línea trifásica. En los transformadores instalados entre fase y neutro, los valores normalizados serán $110/\sqrt{3}$ y $100/\sqrt{3}$ V. CEI 186 admite 100 y 110 V.

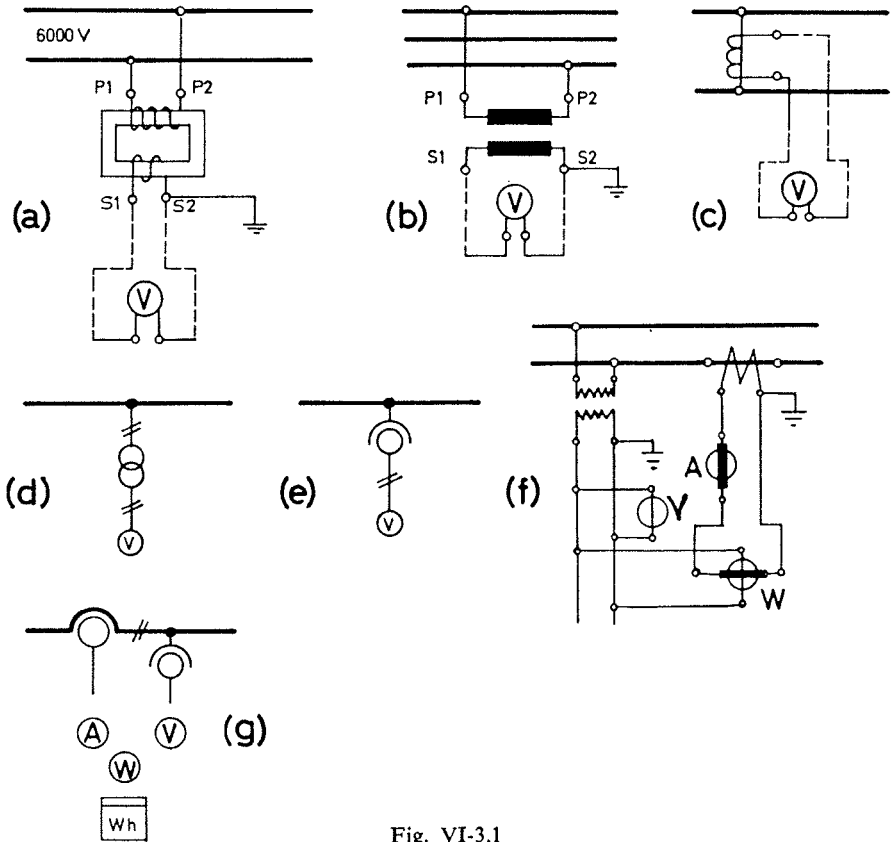


Fig. VI-3,1

Lo explicado permite construir aparatos de medida y de protección con bobinas voltimétricas normalizadas. Al ser usado, un aparato de medida, permanentemente con un transformador de tensión, su escala estará, lógicamente, graduada en tensiones del primario, es decir, las tensiones medidas estarán, realmente, multiplicadas por la relación de transformación nominal.

Complementos prácticos sobre transformadores de tensión pueden verse en el apéndice XII.

§ VI-4. Funcionamiento del transformador de corriente.

§ VI-4.1. FUNCIONAMIENTO NORMAL.

En la figura VI-4,1a, se han representado las resistencias y las reactancias de dispersión de primario y secundario. Z_c es la impedancia de carga del

secundario¹. Aun cuando para los arrollamientos se dibujan distintos números de espiras, en lo que sigue se supondrá que los elementos del secundario han sido reducidos al primario (§ II-4).

En (b) se ve el diagrama vectorial del transformador en su trabajo normal.

No se suponga que los vectores dibujados guardan proporción con los valores que suelen tener en la práctica. El diagrama es desproporcionado para que resulten visibles todos sus elementos, y con el fin de poder estudiar, más adelante, los errores que la transformación motiva. En particular, se ha dibujado exagerada la corriente I_0 , en la realidad muy pequeña. Además, si el transformador trabaja con su carga nominal², en la práctica es $R'_s \ll R'_c$ y $X'_{ds} \ll X'_c$. También suele ser $X'_{ds} < R'_s$.

Hasta aquí, y salvo el hecho de que el primario esté en serie con el circuito principal, no se habrán observado, en lo cualitativo, grandes discrepancias en relación con los transformadores de potencia.

Las diferencias aparecen al considerar diversas formas de trabajo:

I) En los transformadores de potencia se puede considerar $U_1 = \text{constante}$. Pueden variarse las impedancias de carga y, correspondientemente, I_1 .

II) En los transformadores de corriente pueden variar, incluso independientemente, Z_c e I_p . Se va a ver que, en tal caso, U_p no se mantiene constante. Como ya fue indicado, U_p asume aquí el carácter de una caída de tensión en el circuito principal.

Antes de proseguir, se dirá que el transformador de corriente se proyectará de forma que, dentro de su campo de trabajo, la corriente I_0 sea muy pequeña, prácticamente despreciable.

Supóngase que, en el circuito principal (objeto de la medición) varía la corriente (I_p), por ejemplo reduciéndose, mientras el secundario sigue alimentando la misma carga (se conserva Z_c). Compárese el anterior diagrama (b) con el nuevo (c). Salta a la vista que I_0 y Φ han quedado reducidos. Luego no sucede, como en los transformadores de potencia, que I_0 y Φ se mantienen casi constantes (dentro del campo normal de trabajo del transformador). Es más, aquí resulta impropio designar a I_0 por corriente de vacío. Es la *corriente de excitación* (I_e). Al variar I_p , resultan notablemente variadas, a su vez, \underline{U}'_c y \underline{U}_p .

Si, por el contrario, I_p aumenta, crecerán I_0 y Φ , con la posibilidad de alcanzar la saturación del núcleo. En tal caso se afectará sensiblemente la relación I_p/I_s (error de relación). En particular, sucederá en el caso en que, por el primario, circule una corriente de cortocircuito $I_p = I_{cc}$.

¹ Suma de las impedancias de las bobinas amperimétricas en serie que se alimentan (p. ej. figura VI-3,1f) más la correspondiente a los conductores de conexión.

² Se define en § VI-6.

Examínese, ahora, el comportamiento al variar Z_c . Imagínese que el transformador estaba alimentando, exclusivamente, a un amperímetro (b). En el secundario se intercalan, suplementariamente, otras bobinas amperimétricas. En (d) se ve el nuevo diagrama de trabajo. En el supuesto de que I_p se mantenga como en (a), resultan aumentados U'_c , E'_s , Φ , I_0 y U_p . Como I_0 forma parte de I_p , al mantenerse ésta, queda modificada I_s (generalmente disminuida I_s al aumentar Z_c). Esto no tendrá gran importancia mientras I_0 siga conservando valores muy reducidos $I_0 \ll I'_s \approx I_p$. Pero si con el aumento de Z_c , y consiguiente aumento de Φ , se alcanzara la saturación, I_0 introducirá errores en la relación I_p/I_s . Luego no es lícito que la impedancia Z_c (bobinas amperimétricas en serie) alcance un valor excesivo.

Se ha partido del supuesto práctico según el cual, al aumentar Z_c , se mantiene I_p . Nótese que en (d) ha aumentado U_p . Si se prefiere, dígame que, para el circuito principal, la impedancia intercalada, a que equivale el transformador de corriente con su carga (dípolo), ha quedado aumentada. No obstante, ha de suponerse que tal impedancia equivalente permanece (dentro de los límites de trabajo) pequeña frente a la total del circuito principal, es decir, que U_p siempre es muy pequeña frente a la tensión nominal de la línea.

Obsérvese que lo fundamental se resume como sigue:

a) En los transformadores de potencia ($U_1 = \text{constante}$), la corriente secundaria es la causa y la primaria el efecto. Se persigue alterar los factores que constituyen la potencia.

b) En los de corriente, es la primaria la causa y la secundaria el efecto. Se persigue una proporcionalidad, lo más exacta posible, entre intensidades.

§ VI-4.2. IMPROCEDENCIA DEL SECUNDARIO ABIERTO.

El razonamiento precedente justifica la norma general de proscribir la apertura del secundario de un transformador de corriente cuyo primario esté en servicio. No hay más que considerar el diagrama de la figura VI-4,1d, imaginando que Z_c crece indefinidamente hasta ∞ . Como dicho, U'_c aumentaría, tendiendo a mantenerse, al principio, I'_s , aunque adquiriendo, luego, valores menores, cuando Z_c los adopta elevados (para $Z_c = \infty$, $I'_s = 0$). En estas condiciones $I_p = I_0$, o sea que toda la corriente primaria ha pasado a ser de excitación, sin que exista fuerza magnetomotriz secundaria oponente. Afortunadamente, el núcleo se satura, con lo que el flujo Φ no llega a alcanzar el valor que, por proporcionalidad, correspondería a $N_p I_p$. No obstante este factor atenuante, resultan, según figura VI-4,1e, valores elevados para Φ , $E'_s = U'_c$ y U_p .

Lo examinado significa un peligro personal, por la tensión que surge entre bornes del secundario (desde decenas hasta del orden del millar de voltios), y un riesgo para el aislamiento, sin olvidar el calentamiento del núcleo, por los crecidos valores de B . Tales condiciones de trabajo mantenidas, pueden conducir a un deterioro del transformador, e incluso a una explosión.

Queda aclarada la improcedencia de la apertura del secundario. Por el contrario, nada cabe objetar, en principio, a que el secundario esté en cortocircuito¹, $Z_c = 0$, $U_s = 0$. Por él circulará la corriente I_s correspondiente a I_p , según la relación de transformación nominal. Para una I_p determinada, E_s tendrá el menor valor posible. Correspondientemente los tendrán I_0 y Φ .

La conclusión es que, si por algún motivo hay que desconectar la carga Z_c (revisiones de aparatos, etc.), se «puenteará» el secundario, tras lo cual puede retirarse Z_c , lo que puede realizarse sin interrumpir el servicio de la línea principal. Se evitará tener el secundario abierto, ni siquiera en breve tiempo, circulando corriente por el primario.

Otra consecuencia de lo visto es que no deberá protegerse el secundario mediante fusibles, ya que su actuación provocaría la apertura del circuito.

Si bien lo dicho es general, y correcto para cualquier régimen normal de trabajo, hay que advertir que algunos transformadores de corriente, con secundario cerrado sin carga, podrían sufrir en caso de cortocircuito en el circuito principal ($I_p = I_{cc}$). En estos casos, es recomendable sustituir los aparatos que se retiran por una pequeña resistencia que hará, entretanto, las veces de carga.

Se aclara con el siguiente ejemplo, lo que no dejará de ejercitar al lector en el manejo del diagrama vectorial y en la visión práctica.

En el mercado existen transformadores de medida que han sido proyectados con mayor densidad de corriente en el secundario. Esto significa mayores calentamientos en esta parte del aparato. Conviene que, en caso de cortocircuito, $I_p = I_{cc}$, entre en juego la saturación del núcleo, limitando la I_s . Se logra a base de $U_s \neq 0$.

Resumiendo: existen transformadores cuyo secundario puede «puentearse», pero otros requieren una resistencia de protección.

§ VI-5. Errores de intensidad, o de relación, y de fases. Exigencias constructivas.

El *error de intensidad*, ε_i , también llamado *error de relación*, para una corriente primaria I_p , y una carga secundaria Z_c , es

$$\varepsilon_i (\%) = \frac{I_s K_n - I_p}{I_p} 100 = \frac{I_s - \frac{I_p}{K_n}}{\frac{I_p}{K_n}} 100$$

(K_n = relación de transformación nominal)²

¹ Esto es así, en general, con la salvedad que se verá al final de este apartado.

² Según UNE 21-088 y CEI 185, la *relación de transformación nominal*, K_n , es el cociente de las intensidades nominales primaria y secundaria.

Luego es la diferencia entre los valores real, I_s , y el esperado, I_p/K_n , para la corriente del secundario, referida, en tanto por ciento, a la corriente esperada.

Por la teoría conocida, está claro que tal error depende de la carga y de la corriente del circuito principal.

El *error de fase*, δ_i , también llamado *desfase* o *error de ángulo*, se aprecia en la figura VI-4,1b. Se mide en minutos y da el ángulo de diferencia de fases entre las corrientes primaria y secundaria, una vez girado 180° el segundo vector en el mencionado diagrama. Se conviene error positivo cuando avanza la corriente secundaria (lo es en la figura).

Si simplemente se trata de medir una intensidad de corriente (módulo), el error de fase carece de interés. Si, por el contrario, se trata de alimentar bobinas amperimétricas de vatímetros o de contadores de energía eléctrica, los errores de fase tienen importancia, pues falsean el factor de potencia. Un error en el ángulo de fase, traducido en potencia, activa, es tanto más grave cuanto más bajo es el factor de potencia, véase el ejemplo del § VI-6.2.

El examen de los diagramas vectoriales, figura VI-4,1b y d, pone de relieve:

- i) La corriente I_0 es la causante de los errores de intensidad y de ángulo. Conviene, no obstante, resaltar lo que sigue,
- ii) Para una I_p determinada, valores elevados de Z_c , aumentan los errores (por aumento de I_0).
- iii) Para una Z_c dada, valores elevados de I_s aumentan los errores (por aumento de I_0).

Lo dicho condiciona normas constructivas. A fin de lograr muy bajos valores para I_0 , se utilizan chapas magnéticas aleadas a base de silicio¹, u otras especiales altamente aleadas (30 ÷ 70 %). Tales materiales, en particular los últimos, tienen elevadas permeabilidades (véase § VI-8). Se proyectará a base de inducciones bajas². Los caminos magnéticos serán los más cortos posibles, evitándose, en lo posible, entrehierros³.

Las impedancias internas secundarias (R_s y X_{ds}) tienen el significado de un aumento de Z_c , que conviene evitar⁴.

¹ Hoy día se emplean las llamadas de grano orientado, con bajo contenido en carbono (véase § I-4.2).

² Significa secciones de núcleo relativamente grandes. Se suele trabajar, con corriente nominal, con $B < 0,3$ Tesla, bien entendido que ello depende de los tipos de chapa y de las precisiones requeridas.

³ Son frecuentes circuitos magnéticos circulares, figura VI-5,1 con chapas cortadas en una pieza (*transformadores tipo anillo*). También se forman núcleos de este tipo a base de bandas de chapa arrolladas, véase figura VI-5,1c. En ocasiones, para determinadas aplicaciones, se construyen transformadores de corriente con entrehierros, a fin de obtener una característica $B \div I_0$ prácticamente lineal, aunque sea en detrimento de la potencia de precisión. Son los llamados *transformadores linealizados*.

⁴ En el siguiente apartado se trata del consumo de los instrumentos alimentados. El producto $Z_c I_0^2$ es lo que suele llamarse *consumo interno* del transformador. Reduce la potencia externa, o útil, disponible, dentro de una clase de precisión.

Obsérvese, figura VI-4,1b, como la reactancia primaria de dispersión, X_{dp} , no tiene influencia en los errores ¹. Esto justifica formas constructivas que, a primera vista, pueden sorprender. Tales son los llamados *transformadores en anillo*, sin primario, de relación variable. Se representan, esquemáticamente, en la figura VI-5,1a. En ellos, el primario está constituido por el cable o conductor cuya corriente se trata de medir. Pasando dos veces tal cable (b), o, en general, n veces, se consiguen diversas relaciones de transformación.

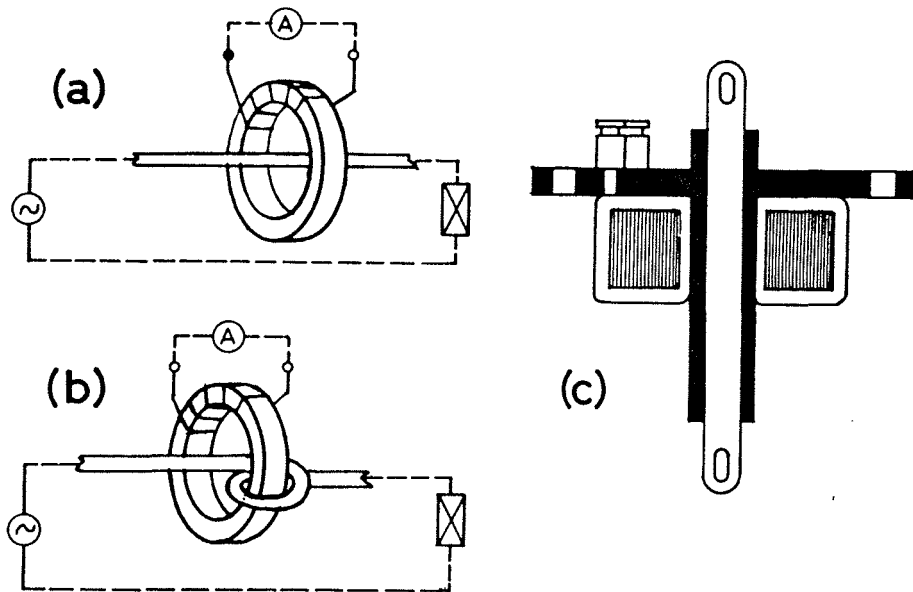


Fig. VI-5,1

Otro ejemplo es el *transformador atravesador* o *monoconductor*, representado en (c).

Nótese que, en estos casos, el flujo de dispersión del primario depende del circuito primario, o sea de su forma de instalación, sin que sea obstáculo para la debida precisión.

§ VI-6. Carga y potencia de precisión en los transformadores de corriente.

§ VI-6.1. CARGAS Y POTENCIAS DE PRECISIÓN O NOMINALES.

Se ha visto que los errores de intensidad y de fase dependen de la naturaleza de la carga. Y, sin embargo, es preciso caracterizar un transformador por su grado de precisión. Se define la *carga de precisión* o *carga nominal* ²,

¹ Únicamente supone una reactancia en serie, introducida en el circuito principal, lo que motivará una pequeña caída de tensión adicional (figura VI-4,1a).

² UNE 21-088-81 (1) y CEI 185 la designan carga de precisión, VDE 0414 carga nominal.

expresada en ohmios y factor de potencia, con base a la cual se cumplen los errores máximos de garantía, o sea de la clase de precisión que luego se definirá.

Las impedancias que ofrecen las bobinas amperimétricas prácticas son de naturaleza inductiva, con factores de potencia comprendidos entre 0,4 y 1. Las cargas de precisión suelen definirse con $\cos \varphi = 0,8$ inductivo, salvo con potencias inferiores a 5 VA en cuyo caso se considera $\cos \varphi = 1$.

En lugar de la carga de precisión o nominal, puede darse (y es más usual) la *potencia de precisión o nominal* del transformador. Es el valor de la potencia aparente (VA) que el transformador proporciona al circuito secundario con la carga e intensidad nominales. Por lo tanto, es el producto $I_{sn}^2 Z_c$. Hay que especificar el factor de potencia, que es el de la carga.

Según UNE 21-088-81 (1), los valores de la potencia de precisión normalizados son:

$$2,5 - 5,0 - 10 - 15 - 30 \text{ VA}$$

Pueden utilizarse valores superiores según necesidades.

Esto significa que las cargas de precisión normalizadas son, siendo $I_{sn} = 5 \text{ A}$:

$$0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 \text{ y } 1,2 \Omega.$$

Obsérvese que, mientras en un transformador de potencia su potencia nominal (carga) viene definida por una condición térmica, y corresponde a una Z_c mínima admisible, aquí el condicionamiento es de precisión, y supone un valor máximo de Z_c ¹.

§ VI-6.2. ÍNDOLE DE LAS CARGAS EN LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE: TRANSFORMADORES PARA MEDIDAS Y TRANSFORMADORES PARA PROTECCIÓN.

Los diversos tipos de aparatos que normalmente constituyen las cargas de los transformadores de corriente pueden requerir transformadores con distintas características, más aún, con distinto comportamiento. Y ello puede ser así aún cuando se trate de cargas con análogas impedancias. Imagínese que un transformador de corriente alimenta aparatos de medida y que por su primario circula corriente de cortocircuito, en ocasiones incluso más de un centenar de veces la nominal. Reflejada casi proporcionalmente en el secundario, aquella corriente puede averiar los aparatos de medida. Por el

¹ Esto se verá al definirse las clases de precisión, que se garantizarán mientras Z_c no supere la carga de precisión.

contrario, si el transformador alimenta aparatos de protección, puede convenir la reproducción fiel en el secundario para que la protección actúe proporcionalmente. Por lo expuesto hay que distinguir entre los transformadores destinados a uno u otro de los siguientes tipos de cargas:

a) Aparatos para medida, de contaje y análogos como son amperímetros y bobinas amperimétricas (vatímetros, varímetros, contadores de energía activa o reactiva, etc.). Se trata de aparatos destinados a medir corrientes normales sin que, ante valores anormales, tengan que provocar reacciones o respuestas correctoras.

b) Relés de vigilancia o de protección en relación con la intensidad de la corriente y, eventualmente, con su ángulo. Estos aparatos, ante valores anormales de la corriente, por exceso (o por sentido o ángulo), han de dar una respuesta de aviso o de acción (por ejemplo una interrupción del circuito primario).

Por su naturaleza, los aparatos de medida no suelen poder soportar sobrecorrientes exageradas ni se les exige mediciones de valores anormalmente elevados. Más aún, para evitar posibles averías, interesa que, a partir de ciertas cuantías de los valores de las sobrecorrientes, el secundario, por decirlo gráficamente, se «desembrague» del primario. Esto se logra diseñando el transformador de corriente de forma que el error de relación aumente ante valores excesivos de las corrientes primarias. Recuérdese que aquel error siempre es por defecto, o sea que la corriente real del secundario es menor que la teórica según la relación de transformación (K_n), en virtud de la corriente de excitación (I_e). Por otro lado, la tensión secundaria es $U_2 = I_s Z_c$, donde Z_c es la impedancia de la carga secundaria más la del arrollamiento. Al aumentar I_s lo hará proporcionalmente U_2 ¹. De acuerdo con la conocida expresión $U_2 = 4,44 B_{\max} sN_2f$, y al ser $I_e = f(B_{\max})$, según la característica magnética del núcleo, con una determinada carga Z_c (nominal o no), al aumentar notablemente I_p , lo harán I_s , U_2 , B_{\max} e I_e y con ello el error de intensidad, por defecto. Con diseño del circuito magnético de forma que se entre en su saturación a partir de cierto valor de la sobrecorriente primaria, se logra que I_e aumente considerablemente, en detrimento de la I_s que circula por los aparatos ($I_s \approx \frac{I_p}{K_n} - I_e$), hasta alcanzar una zona tal que I_s prácticamente ya no crece aunque siga aumentando I_p . Es lo que se perseguía.

Por el contrario, tratándose de transformadores de corriente destinados a alimentar relés de protección, interesa que al surgir sobrecorrientes el secundario las refleje aceptablemente², aun con los mayores valores previsi-

¹ Supuestas cargas con impedancias constantes, lo que no siempre es así.

² Se pueden admitir ciertas cuantías de error pues los relés no suelen requerir tanta precisión como los aparatos de contaje.

bles, con el fin de provocar respuestas adecuadas¹. Contrariamente al caso precedente, interesa proyectar el transformador de corriente de forma que no alcance la saturación hasta valores elevados de la corriente primaria, o sea que el crecimiento de I_p no sea importante.

Lo expuesto hace aconsejable no reunir en un mismo secundario de un transformador de corriente aparatos de medida y de protección. Lo correcto es emplear dos transformadores o bien un *transformador de corriente de doble núcleo*, cada uno con las características constructivas adecuadas.

Lógicamente, un transformador de corriente trabajando con una carga o potencia secundaria excesivas (mayores que las nominales) puede proporcionar errores superiores a los que a su clase corresponden, incluso en el margen normal de corrientes ($0,1 \div 1,2 I_{pn}$). En consecuencia, es preciso conocer exacta, o aproximadamente, la potencia necesaria (VA) para un determinado circuito (consumo), con el fin de elegir el transformador adecuado.

En el apéndice XII-2, se dan los consumos (VA) más corrientes de aparatos, instrumentos y conductores (para intensidad secundaria nominal 5 A).

Los consumos de los aparatos (VA) suelen ser inductivos en distinta cuantía (factores de potencia 0,4 ... 1). Aún cuando teóricamente los consumos amperimétricos en serie deben sumarse vectorialmente (potencias complejas), es práctica corriente hacerlo aritméticamente.

§ VI-7. Definiciones y clases de precisión según normas.

Las diferentes finalidades de los transformadores de corriente que se han examinado han de reflejarse en las normas. Se hará referencia resumida a la *CEI 185* y a la *UNE 21-088-81 (I)* con comentarios y orientaciones intercalados².

§ VI-7.1. DEFINICIONES, SEGÚN NORMAS, REFERENTES A TRANSFORMADORES DE CORRIENTE PARA MEDIDA. CLASES DE PRECISIÓN.

Intensidad de seguridad (para los aparatos de medida) (I_{ps})

Es el valor de la intensidad indicado por el constructor como la intensidad primaria más baja (I_{ps}) para la que el valor eficaz de la intensidad secundaria (I_{ss}) multiplicado por la relación de transformación nominal (K_n), no exceda de 0,9 veces el valor de la intensidad del primario, estando conectada al secundario la carga nominal.

¹ Puede interesar que el retardo de respuesta sea una función inversa de la sobrecorriente o de su cuadrado.

² Para el uso industrial no se omite la lectura completa de la norma original correspondiente.

Esto puede expresarse con la fórmula:

$$K_n I_{sn} \leq 0,9 I_{pn}$$

Factor de seguridad (para los aparatos de medida) (F_s)

Es la relación entre la intensidad nominal de seguridad del aparato de medida (I_{ps}) y la intensidad primaria nominal (I_{pn}) expresada por la fórmula:

$$F_s = \frac{I_{ps}}{I_{pn}}$$

Lógicamente, en el caso de que circulen corrientes de defecto del sistema a través del arrollamiento primario de un transformador de intensidad, la seguridad del aparato de medida alimentado por el transformador es tanto mayor cuanto menor sea el valor del factor de seguridad (F_s).

Se suele especificar $F_s < \dots$

La clase de precisión de un transformador de intensidad se designa por un número (índice de clase) igual al límite superior del error de intensidad admisible, expresado en tanto por ciento, para la intensidad nominal primaria y la carga de precisión.

Clases de precisión normales

Las clases de precisión normales de los transformadores de intensidad para medida son:

$$0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3$$

En los transformadores de estas clases, los errores de intensidad y fase, a la frecuencia nominal, no deberán sobrepasar los valores de la tabla que sigue, cuando la carga secundaria esté comprendida entre el 25 y el 100 % de la carga de precisión.

Tabla de límites de errores

Clase de precisión	Error de la intensidad, en tanto por ciento, \pm , para los valores de la intensidad expresados en tanto por ciento de la intensidad nominal				Error de fase, \pm , para valores de intensidad expresados en tanto por ciento de la intensidad nominal minutos			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Para la clase 3 no se impone límite alguno de error de fase y el error de intensidad, en tanto por ciento, \pm , para valores de intensidad expresados en tanto por ciento de la nominal se prescribe:

50 %	120 %
3	3

Con el fin de valorizar los conceptos expuestos aportamos el siguiente ejemplo:

Errores introducidos por un transformador de corriente

Para valorar los errores introducidos por los transformadores de corriente en la medición de potencias (energías), y la influencia del factor de potencia, véanse los siguientes casos.

Un vatímetro (contador) tiene su bobina amperimétrica alimentada por un transformador de corriente de clase de precisión 1. La bobina voltimétrica es alimentada directamente por la tensión de la línea (baja tensión, no existe transformador de tensión que, a su vez, introduciría errores).

Por el momento, no se considera más que el error de ángulo que, en clase 1, puede ser de ± 60 minutos, con la carga nominal, y de ± 90 minutos con el 20 % de la carga nominal. Se calcula a base de los errores máximos positivos.

Supuestos:

Carga en el circuito principal, medido	(I)		(II)	
	I_{pn}		$0,2 I_{pn}$	
	(Ia)	(Ib)	(IIa)	(IIb)
Factor de potencia en el circuito principal, medido	0,2	0,8	0,2	0,8
Ángulo φ correcto	78° 27'	36° 52'	78° 27'	36° 52'
Error de fase δ_1	60'	60'	90'	90'
Ángulo $\varphi + \delta_1$	79° 27'	37° 52'	79° 57'	38° 22'
Factor de potencia para el vatímetro $\cos(\varphi + \delta_1)$	0,1831	0,7894	0,1745	0,7840
Error en la potencia	8,4 %	1,3 %	12,75 %	2,9 %

Lo que claramente pone de relieve la necesidad de transformadores de alta precisión, si hay que medir potencias con bajos factores de potencia.

También la conveniencia, a los efectos precisión, de no trabajar con intensidades pequeñas, en relación con la nominal del transformador.

En atención a los errores de intensidad (de relación) máximos previsibles en clase I resultarían:

Error de intensidad	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 1,5 \%$	$\pm 1,5 \%$
Factor (caso error negativo)	0,99	0,99	0,985	0,985
Error combinado en la potencia	9,4 %	2,3 %	14,9 %	3,5 %

§ VI-7.2. DEFINICIONES, SEGÚN NORMAS, REFERENTES A TRANSFORMADORES DE CORRIENTE PARA PROTECCIÓN. CLASES DE PRECISIÓN.

Error compuesto

En las condiciones de régimen permanente es el valor eficaz de la diferencia entre:

- a) Los valores instantáneos de la intensidad primaria, y
- b) El producto de la relación de transformación nominal por los valores instantáneos de la intensidad secundaria.

El error compuesto se expresa en tanto por ciento del valor eficaz de la intensidad primaria, según la fórmula:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt}$$

en la cual:

- K_n = relación de transformación nominal
 I_p = valor eficaz de la intensidad primaria
 i_p = valor instantáneo de la intensidad primaria
 i_s = valor instantáneo de la intensidad secundaria
 T = período de la intensidad.

Intensidad límite de precisión nominal (I_{pl})

Valor más elevado de la intensidad primaria para el cual el transformador deberá cumplir aún con las especificaciones relativas al error compuesto.

Factor límite de precisión

Relación entre la intensidad límite de precisión nominal y la intensidad primaria nominal, I_{pl}/I_{pn} .

Fuerza electromotriz límite secundaria

Producto del factor límite de precisión por la intensidad nominal del secundario y por la suma vectorial de la carga de precisión y de la impedancia del arrollamiento secundario.

Intensidad de excitación

Valor eficaz de la intensidad que circula por el arrollamiento secundario de un transformador de intensidad, cuando se aplica una tensión senoidal de frecuencia nominal entre los bornes del secundario, con el primario y todos los demás arrollamientos en circuito abierto.

Los factores límite de precisión normales son:

$$5 \text{ — } 10 \text{ — } 15 \text{ — } 20 \text{ — } 30$$

Designación de la clase de precisión (Índice de clase)

La clase de precisión de un transformador de intensidad para protección, se designa por un número (índice de clase) y la letra P (inicial de protección). El índice de clase indica el límite superior del error compuesto para la intensidad límite de precisión nominal y la carga de precisión.

Las clases de precisión normales de los transformadores de intensidad para protección son:

$$5 \text{ P y } 10 \text{ P}$$

Para la potencia de precisión y la frecuencia nominal, el error de intensidad, el de fase y el compuesto, no deberán exceder de los valores indicados en la tabla de límites de errores.

Para determinar el error de intensidad y el de fase, la carga debe ser inductiva e igual a la carga de precisión con un factor de potencia igual a 0,8, con la excepción de que, cuando la carga total sea inferior a 5 VA, puede ser resistiva (factor de potencia unidad).

Para determinar el error compuesto, la carga puede tener un factor de potencia comprendido entre 0,8 inductivo y la unidad, a elección del fabricante.

Tabla de límites de errores

Clase de precisión	Error de intensidad a la intensidad nominal en %	Error de fase a la intensidad nominal minutos	Error compuesto a la intensidad límite de precisión en %
5P	± 1	± 60	5
10P	± 3	—	10

Puede suceder que aparezcan armónicos en la corriente de excitación I_e y también en la corriente secundaria I_s , aun cuando la corriente primaria sea sinusoidal. Esto puede producirse cuando, debido a valores elevados de la corriente primaria I_p , el transformador trabaja, en parte, más allá de la inflexión de saturación. Por esta razón la norma define el error compuesto mediante una expresión válida para cualquier forma de onda de corriente.

§ VI-8. Influencia de los núcleos. Transformadores con varios núcleos.

No es propósito de esta obra entrar en detalles de proyecto. Mas para facilitar la comprensión de la correcta utilización de los transformadores de corriente, parece conveniente exponer algunos aspectos constructivos de los núcleos ferromagnéticos.

Se ha dicho que, para los núcleos de los transformadores de corriente, son aconsejables materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad (μ), con el fin de reducir $i_0(i_e)$. Uno de los materiales clásicos es la chapa siliciosa. En la figura VI-8,1a, se aprecia su característica curva $H-B$. Ofrece el inconveniente de poseer valores bajos de μ en los inicios de la curva. Esto ocasiona elevados errores porcentuales para pequeñas corrientes (valores de i_0 relativamente grandes). En la figura VI-8,1b se representa la curva $B-\mu$, en ella se ve el valor inicial bajo de μ así como su valor máximo previo a la saturación.

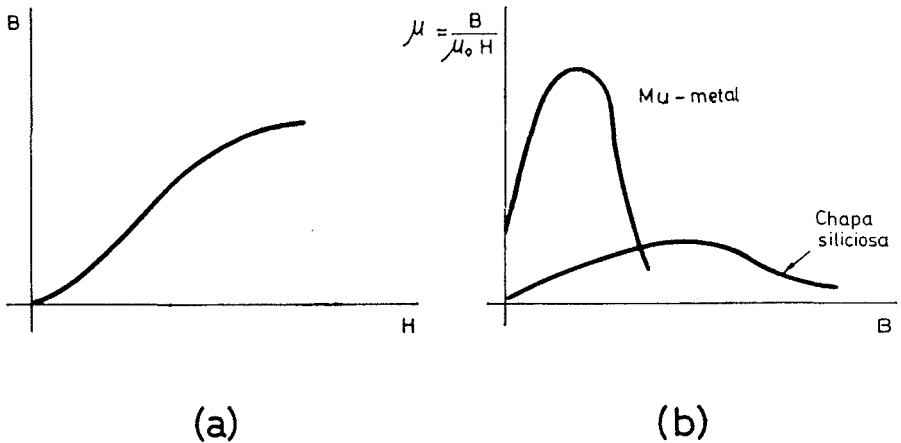


Fig. VI-8,1

También se utilizan otras aleaciones. Son características aleaciones ferromagnéticas a base de níquel (30... 70 % Ni), con diversos nombres comerciales (*Mu-metal*, *Permalloy*, etc.). En la figura VI-8,1b se ha representado una curva $B-\mu$ del Mu-metal. Nótese el valor inicial elevado de μ y, al propio tiempo, la saturación para valores reducidos de B (por ejemplo, 8 000 Gauss). Esta aleación será favorable para transformadores con bajos errores para corrientes I_p pequeñas.

En cuanto a factor límite de precisión es fácil deducir que, por saturarse fácilmente, el Mu-metal los ofrecerá más bajos que la chapa siliciosa.

Existen otras chapas, y también cabe construir núcleos con chapas mezcladas. Aun cuando existen otros factores constructivos de interés, con lo expuesto se ha adquirido idea suficiente sobre posibilidad de dar características adecuadas al empleo que se necesite atender.

No es raro que el transformador tenga que alimentar aparatos con diversas exigencias. Ejemplo:

<i>Aparatos</i>	<i>Conveniencias</i>
1.º Varios aparatos indicadores y registradores de medición	Potencia total de consumo (VA) elevada. Clase de precisión 1. $F_s = 5$
2.º «Contaje»	Clase de precisión 0,5 o 0,2 Potencia reducida. Índice $n = 5$
3.º Relés de intensidad dependientes	Clase 5 P o 10 P, factor límite de precisión 10 o 15, o sea 5 P 10 o 10 P 15

Lo conveniente según lo expuesto es, pues, un transformador con múltiples núcleos (en el ejemplo, tres).

Un transformador con varios núcleos, un devanado primario común, y devanados secundarios independientes para cada núcleo, trabaja, realmente, como varios transformadores independientes. No tienen, en común, más que los amperivoltios del primario. Ya se dijo que los flujos de dispersión primarios no ocasionan errores. De esta forma, cada núcleo puede aportar las convenientes características.

§ VI-9. Intensidades límites dinámica y térmica.

VI-9.1. GENERAL.

En caso de cortocircuito en el circuito principal, el transformador de corriente queda sujeto a efectos dinámicos y térmicos. En los transformadores de potencia, la corriente de cortocircuito, en último término, estaba limitada por su propia ϵ_{cc} . Los transformadores de corriente no representan, instalados en serie en una línea, más que una pequeña caída de tensión. Es frecuente que los transformadores de corriente formen parte de los dispositivos de protección. No hace falta encarecer su funcionamiento seguro. En cualquier caso, es preciso elegir los transformadores de corriente de forma que resistan los efectos indicados.

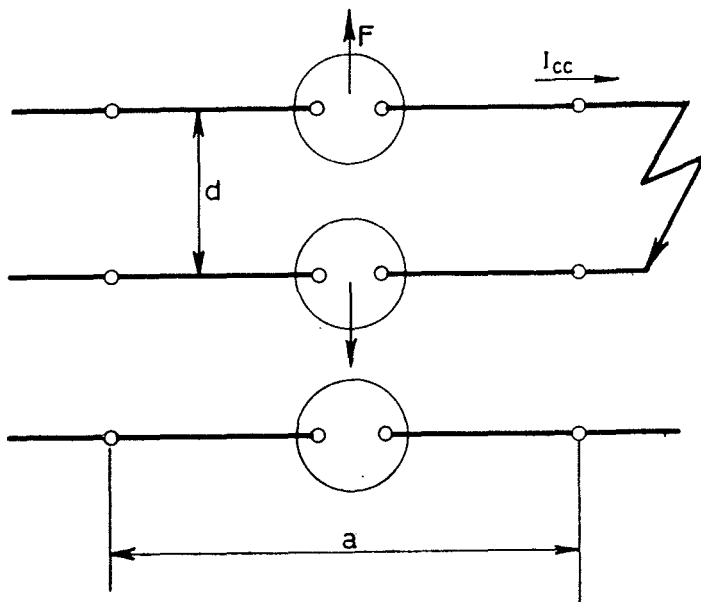


Fig. VI-9,1

Al pasar una corriente de cortocircuito, se producen esfuerzos internos. Al propio tiempo, y en dependencia con la forma de instalación del transformador, surgen esfuerzos externos. Los primeros dependen, exclusivamente, de la corriente i_{cc} . Los segundos, además, de d y a , figura VI-9,1, así como de que el cortocircuito sea entre dos fases, trifásico, o entre fase y tierra.

VI-9.2. ESFUERZOS DINÁMICOS INTERNOS. INTENSIDAD LÍMITE DINÁMICA NOMINAL.

Para determinar la capacidad de resistencia de un transformador a los *esfuerzos internos*, se define la *intensidad límite dinámica nominal*. Dada en kA, es la de cresta de la primera semionda (máxima) que puede soportar el transformador, estando el secundario en cortocircuito, I_{din} .

La corriente I_{din} ha de figurar en la placa de características¹.

En consecuencia, se elige I_{din} tal que, siendo la corriente de cortocircuito de choque i_{ch} (cresta de la primera semionda),

$$I_{din} \geq i_{ch} \approx 1,8 \sqrt{2} I_{cc} \approx 2,5 I_{cc} \quad [VI-9.1]$$

Se recuerda que, cuando el cortocircuito estudiado está relativamente cerca del generador, hay que calcular I_{cc} contando con la reactancia subtransitoria X'' (reactancia que, tratándose de generadores con arrollamientos amortiguadores, o con polos macizos, prevalece en los primeros períodos; si estos elementos no existen, se calculará con la transitoria X'). Finalmente, I_{cc} será el valor eficaz de la corriente permanente de cortocircuito en los restantes casos.

Por supuesto que, procediendo según [VI-9.1], se van acumulando márgenes de seguridad. Hay que contar con que el secundario no estará en cortocircuito, sino que tendrá una carga. Por el error de intensidad, que se acrecienta con intensidades elevadas, y cuanto mayor sea Z_c , la corriente secundaria será menor que la prevista en la definición de I_{din} . Esto comporta menores esfuerzos entre arrollamientos.

Aun sin entrar en detalles constructivos, conviene señalar que, con un núcleo determinado, decrece la potencia de precisión, o la clase de precisión (o ambos conceptos), al disminuir los números de espiras. Por el contrario, los esfuerzos internos están en relación inversa con el cuadrado del número de espiras. Existe, pues, cierta incompatibilidad, a menos que se construyan transformadores caros y con grandes dimensiones, incómodas para la instalación. De ahí se deduce la conveniencia de no emplear precisiones y potencias nominales innecesarias, que podrían implicar menor seguridad.

§ VI-9.3. ESFUERZOS DINÁMICOS EXTERNOS.

A los efectos de los esfuerzos dinámicos externos, se procederá al cálculo como si se tratara de un aislador de apoyo. Como es sabido, tales esfuerzos

¹ Cuando se omite, significa que se verifica $I_{din} \geq I_{ter}$. Esta se define en el § VI-9.4.

excesiva. Cabe recurrir a la doble relación. Se tendrá presente la capacidad de sobrecarga de los transformadores¹. Véanse los valores normalizados de las corrientes primarias nominales en *UNE 21-088-81 (1)*.

3.º Elección de la clase de precisión. Véase apéndice XII-3.

4.º Determinación de la potencia nominal necesaria. Véase apéndice XII-2.

En los transformadores para medida no es recomendable excederse en el valor adoptado como potencia nominal. Si un secundario tiene una carga insuficiente, puede intercalarse una resistencia.

Es útil consignar que, para una clase de precisión fijada, la potencia nominal es, aproximadamente, proporcional a la frecuencia. Un transformador de 30 VA en clase 1, a 50 Hz, puede proporcionar, a 60 Hz, 36 VA con igual precisión.

5.º Adopción del factor de seguridad en los transformadores para medida, respectivamente el factor límite de precisión en los de protección.

6.º Se elegirán transformadores con uno o varios núcleos, según se trate de alimentar aparatos con requerimientos semejantes o no.

7.º Resistencia a los esfuerzos dinámicos internos, por determinación de la I_{din} requerida (§ VI-9,2).

No se olvidará que lo anterior no exime de la necesidad de prever la resistencia a los esfuerzos dinámicos externos, por adecuado proyecto de la instalación (§ VI-9,3).

8.º Resistencia a los efectos térmicos de duración t (§ VI-9,4).

§ VI-11. Conexiones y formas de trabajo en transformadores de corriente.

Por brevedad, únicamente se hará referencia a algunas formas de instalación más características. Los transformadores de corriente, con uno o varios secundarios, suelen ser monofásicos.

En la figura VI-11,1a, se representa la conexión característica para la medición de cada una de las corrientes de fase. Puede agregarse la medición de la suma (vectorial) de tales corrientes, como se ve en la propia figura (T).

¹ Los transformadores normales son sobrecargables en un 20 % (carga 120 % I_{pn}), tanto térmicamente como en el aspecto precisión. Hay los *transformadores* para medición llamados *de gama extendida* (*UNE 21-088-81 (1)*, § 28, que permiten cargas de 150 % y 200 %).

Si no hay retorno de corriente por tierra, tanto en régimen equilibrado de cargas, como en régimen desequilibrado, la indicación será nula. En caso de retorno por tierra (en trazos en la figura), la indicación (puede ser un relé de protección) del elemento T es igual a tres veces la corriente homopolar del sistema trifásico de corrientes ¹.

La medición de la corriente de retorno por tierra puede lograrse, en ciertos casos, mediante único transformador, según se aprecia en la figura VI-11,1b. En (b) se ve la correcta puesta a tierra de la caja terminal del cable. La disposición (b') es incorrecta, a los efectos medición.

La medición de cada una de las corrientes de línea puede lograrse con dos transformadores (c), mientras no haya retorno por tierra, ya que la suma vectorial de las corrientes de dos fases es igual a la de la tercera.

Se pueden utilizar transformadores de corriente para realizar la *conexión* llamada *de comparación*. Puede verse en (d). Se trata de un generador y se desea determinar la posible existencia de contactos internos bipolares, tripolares o dobles contactos a tierra. En resumen, se desea comprobar si, en cada fase, la corriente, a la salida del generador, es igual a la de entrada procedente de la estrella. Se observa que, si tales corrientes son iguales, por el instrumento R (eventualmente elemento de desconexión de interruptores y de desexcitación del generador) no pasará corriente. Únicamente circulará la diferencial ΔI , en el caso contrario. En la figura se ven las conexiones de una sola de las fases. Constituye la llamada *protección diferencial* de un generador. En la figura (e) se representa, en esquema unifilar, la aplicación del método de comparación (protección diferencial) a un transformador. Los transformadores de corriente tendrán las relaciones convenientes, y los aislamientos necesarios. Puede suceder que, dada la diversidad entre transformadores, y sin defecto alguno en el tramo protegido, por el elemento R circule, indebidamente, corriente. En (e) se ve un divisor de tensión para ajuste en cero.

En la figura VI-11,1f, f', f'', se aprecia un sistema equipado mediante dos transformadores de corriente en *conexión cruzada* ². Por el elemento R circula, siempre, la diferencia $I_c - I_a$. Imagínese que se produce un cortocircuito trifásico, con una corriente, por fase, I_{cc} . Es fácil ver que $I_R = \sqrt{3} I_{cc}$ (f). En (f') se examina el cortocircuito a - b, resultando $I_R = I_{cc}$ (I_{cc} siempre designa la intensidad de cortocircuito por fase, y se supone despreciable, frente a ella, la intensidad de carga). En (f'') se ve el caso de cortocircuito a - c. Con adecuada sensibilidad del elemento R, puede realizar la protección (desconexión de interruptor) en los tres casos.

Con los ejemplos citados, se cree haber dado muestra suficiente de la diversidad de posibilidades en el uso de transformadores de corriente. En la

¹ Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § VI-5.

Por errores de transformación puede suceder que exista indicación (T), sin retorno por tierra.

² Ideada por el Profesor BIEMANN.

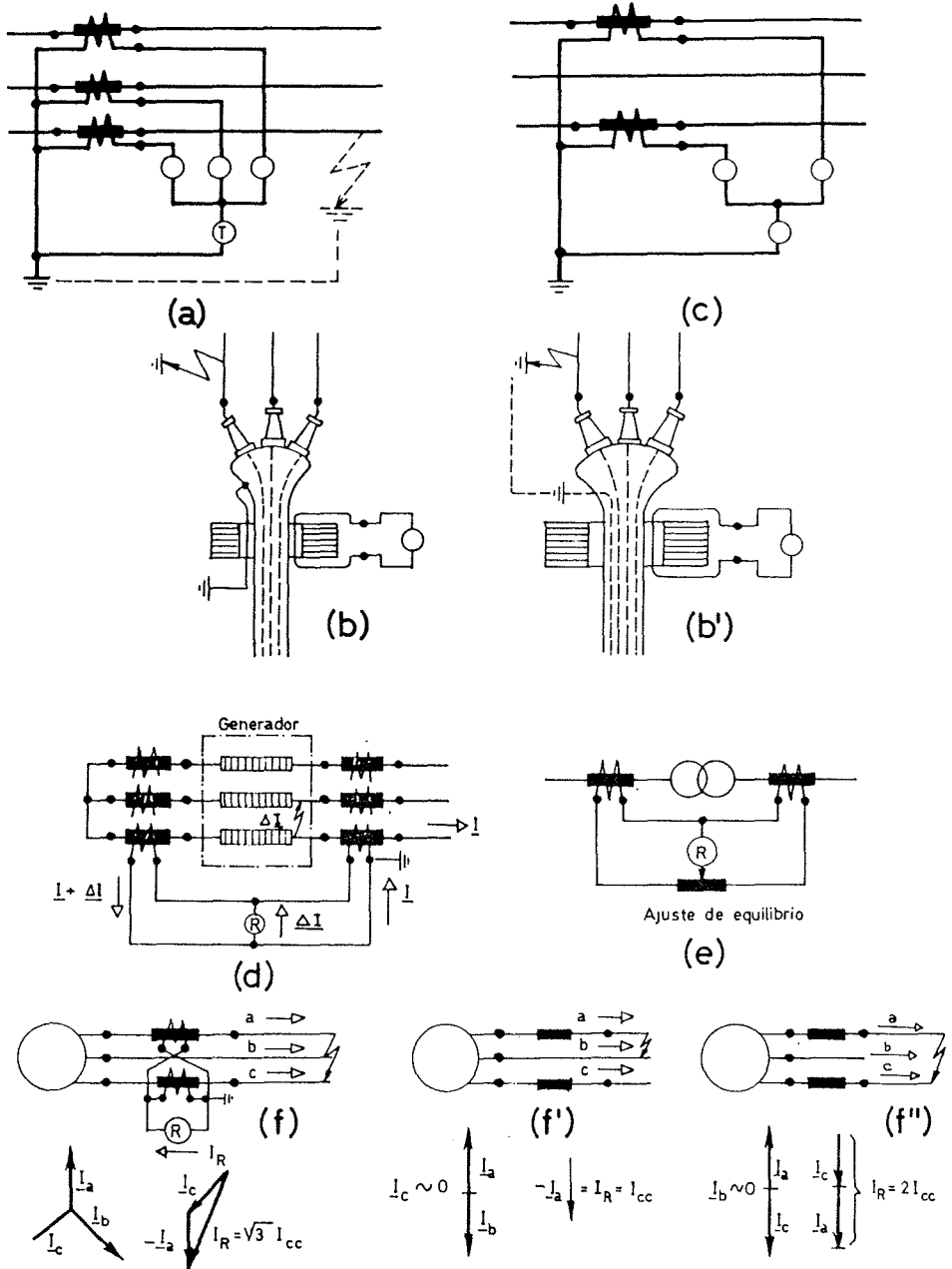


Fig. VI-11,1

práctica, hay gran variedad de conexiones, especialmente en el capítulo de las protecciones, que no corresponde a los fines de esta obra.

§ VI-12. Funcionamiento del transformador de tensión inductivo.

En el § VI-3 se vió que el transformador de tensión trabaja como él de potencia. Por tal razón, su comportamiento va a resultar más sencillo que él del de corriente. Hay que completar esta primera visión.

El transformador de tensión funciona con pequeña potencia secundaria, es decir, con régimen relativamente próximo al de vacío, si bien con una cierta corriente I_s . De esta forma, las caídas de tensión internas son pequeñas. Es esencial, ya que tales caídas motivan variaciones en la relación U_p/U_s . Por lo tanto, el diagrama vectorial del transformador de tensión en carga no ofrece novedad, es el que se aprecia en la figura II-3,6. Es conveniente razonar con el secundario reducido al primario, y haber girado los vectores secundarios 180° , así resulta el diagrama figura II-4,1b.

En tales diagramas, se han exagerado los módulos de los vectores corriente de vacío y caídas de tensión, a efectos didácticos.

La corriente de vacío, I_0 , recobra su significado. Es prácticamente constante, al mismo tiempo que el flujo, Φ , admitido que lo sea la tensión primaria U_p , sujeta, en servicio normal, a variaciones porcentuales moderadas. Solamente en casos excepcionales (por ejemplo, contactos a tierra, que no dejarán de considerarse) puede suceder que la tensión de alimentación, U_p , sea notablemente superior a la prevista. En tales condiciones, puede llegarse a la saturación del núcleo, a valores anormales I_0 , y a errores notables.

§ VI-13. Errores de tensión, o de relación, y de fase.

Error de tensión, ϵ_u , también llamado *de relación*, correspondiente a una tensión primaria U_p , y a determinada carga secundaria, es

$$\epsilon_u (\%) = \frac{U_s K_n - U_p}{U_p} 100 = \frac{U_s - \frac{U_p}{K_n}}{\frac{U_p}{K_n}} 100$$

(K_n = relación de transformación nominal)

Se considera positivo cuando el valor real de la tensión secundaria (U_s) supera al esperado U_p/K_n .

Como las cargas usuales de los transformadores de tensión son inductivas, las diferencias $U'_s - U_p$ suelen ser negativas. Con el fin de compensar los errores ε_u («centrarlos» alrededor del valor nulo) se actuará bien sea sobre el número de espiras N_p , bien sea sobre N_s . En tales condiciones, no ha de sorprender que los errores de tensión, en vacío, suelen ser positivos, mientras que con cargas inductivas cercanas a las nominales sean negativos.

Error de fase («desfase») o *error de ángulo*, δ , es el ángulo formado por los vectores \underline{U}_p y $-\underline{U}_s$. También depende de U_p y de Z_c . Se mide en minutos, y se considera positivo si $-\underline{U}_s$ avanza a \underline{U}_p ¹.

En el aspecto constructivo, los transformadores de tensión no ofrecen grandes dificultades. Se usa chapa siliciosa. El proyecto se basa en disminuir, en lo posible, la corriente de vacío y las caídas por resistencias y por reactancias primaria y secundaria, a fin de reducir errores. En estas condiciones, y en servicio normal, no existen problemas de índole térmica.

La *carga nominal*, o *de precisión*, es el valor (en ohmios, con indicación del factor de potencia) sobre el cual están basadas las condiciones de precisión.

De acuerdo con UNE 21-088-81 (2), se definen las siguientes *clases de precisión*: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 y además 3 P y 6 P (véase § Ap. XII-4).

La designación de clase (ejemplo: 0,5, llamado *índice de clase*) indica el error porcentual de tensión máximo permitido, trabajando con carga nominal y factor de potencia 0,8 inductivo (en el ejemplo, $\pm 0,5$).

Las denominaciones indicadas son cómodas, pero no constituyen, por sí solas, definiciones de clases de precisión, que han de prever condiciones de servicio más amplias. Además, hay que establecer los errores máximos de fase, así como los valores admitidos para la tensión primaria.

Las definiciones completas de las clases de precisión se dan en el apéndice XII-4.

En lugar de carga nominal, cabe dar la *potencia nominal* en VA, $S_n = U_{sn}^2/Z_c$, siendo Z_c la carga de precisión².

Las potencias requeridas en las ejecuciones más usuales de los principales aparatos, pueden verse en ap. XII-5. Sobre el uso de las clases de precisión véase ap. XII-6.

Si por una anomalía, falta, u otra causa, un transformador de tensión trabaja a una tensión bastante superior a la nominal, U_{pn} , los errores pueden ser considerables. El núcleo se satura, con el lógico aumento de i_0 . Además, puede suceder que, con el aumento de U_s , la carga acepte una corriente i_s anormalmente elevada (disminución de la impedancia de carga; por ejemplo, en un relé, por saturación de núcleo).

Hay que definir, convencionalmente, el llamado *factor de tensión* (P. UNE 21 088 § 13,3). Es el factor por el que hay que multiplicar U_{pn} para tener la tensión primaria máxima con

1 Esta sencilla definición no es rigurosa más que para tensiones senoidales.

2 Los límites de error según UNE se consideran para cargas de precisión con $\cos \varphi = 0,8$ inductivo.

la cual el transformador debe responder a determinadas prescripciones de calentamiento (durante el tiempo especificado) así como a las de precisión.

En la P. UNE 21 088 § 13,4, se indican factores de tensión apropiados en relación con formas de conexión y condiciones de puesta a tierra de la red.

§ VI-14. Conexiones y formas de trabajo en transformadores de tensión.

Por brevedad, se hace meramente referencia a las maneras de instalación más características (figura VI-14,1).

Se observa que, según la forma de instalación, los transformadores pueden tener dos o únicamente un polo aislados.

Algunas formas de instalación:

- 1.^a Transformador para tensión compuesta, con aislamiento bipolar (a).
- 2.^a Transformador para tensión fase-tierra, con aislamiento unipolar (b).
- 3.^a Conexión en V, para tensiones compuestas, aislamientos bipolares (c).
- 4.^a Conexión en estrella y puesta a tierra, aislamientos unipolares (d).

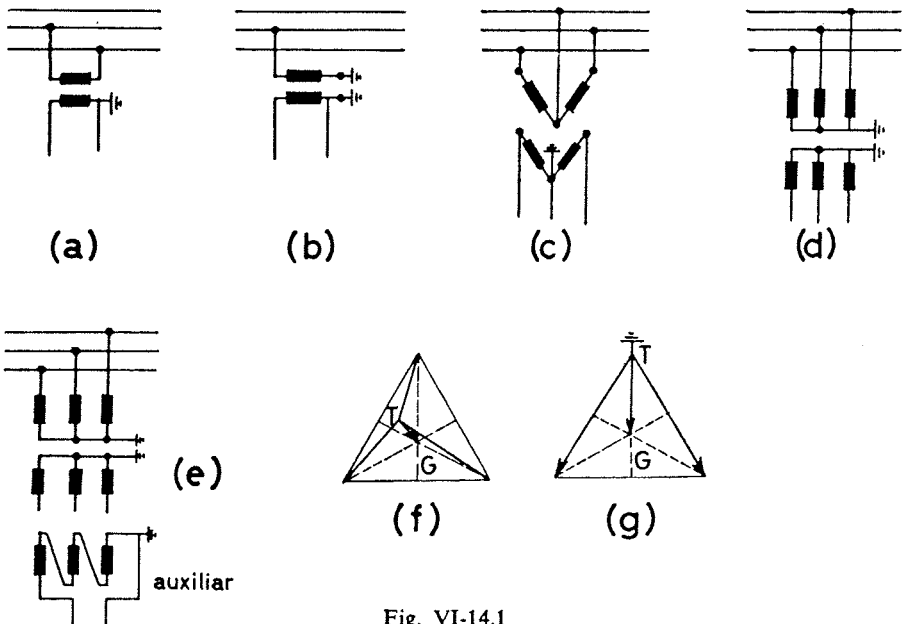


Fig. VI-14,1

5.^a Conexión de tres transformadores en estrella, con arrollamientos auxiliares para mediciones de tensión centro de gravedad (del triángulo de tensiones compuestas) a tierra, aislamientos unipolares (e).

Solamente la conexión 5.^a merece una aclaración. Se suponen tres transformadores monofásicos, cada uno con un tercer arrollamiento (auxiliar). Los devanados auxiliares se conectan en triángulo abierto. La tensión en el vértice abierto es igual a la suma vectorial de las tres tensiones simples. De acuerdo con la teoría de componentes simétricas¹, tal tensión es igual a tres veces la componente homopolar de las tensiones simples, o sea igual a tres veces la tensión del centro de gravedad (G) sobre el punto neutro (T). Por ello se acostumbra prever los terciarios con tensión 110:3 ó 100:3.

Supóngase que la tensión de tierra (T) no coincide con el centro de gravedad (G), sea porque los aislamientos de las tres fases no sean iguales, sea por no serlo las capacidades respecto a tierra, figura VI-14,1f. En tal caso, en bornes del triángulo abierto aparece, a cierta relación, tres veces la tensión U_{GT} . Dígase, pues, a cierta escala, la tensión U_{GT} .

Imágínese que una de las fases está a tierra (cortocircuito franco), figura VI-14,1g. Nuevamente es fácil ver que, a cierta escala, en bornes del triángulo, la tensión es U_{GT} .

En ocasiones, los arrollamientos auxiliares (terciarios), dispuestos en triángulo abierto, se utilizan para conectar una resistencia al objeto de amortiguar eventuales sobretensiones oscilatorias de ferrorresonancia.

¹ *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § IV-7.

APÉNDICE I

CARGAS PERMISIBLES SEGÚN CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO; TEMPERATURAS DE REFRIGERANTES, CICLOS DE CARGAS, ALTURAS DE INSTALACIÓN

§ Ap. I-1. Cargas admisibles en diversos casos de funcionamiento.

Raramente un transformador opera a plena carga nominal en régimen permanente. Menos aun hay que contar con un régimen de refrigeración constante (salvo, tal vez, con refrigeración a base de agua). En estas diversas condiciones de funcionamiento varían las cargas térmicamente admisibles. En ocasiones es útil poder sobrecargar el transformador aunque sólo sea pasajeramente. En otras, éste no puede admitir la carga nominal: temperaturas ambientes excesivas, instalación del transformador en altura superior a los 1 000 m (aire enrarecido).

Para una gama de temperaturas que se extiende hasta 140 °C, la velocidad de degradación térmica del aislamiento es una función exponencial tal que cada incremento de 6 °C la duplica (reducción de vida a la mitad). Las velocidades de degradación se refieren a la normal, que corresponde a una temperatura de punto caliente de 98 °C. El usuario puede admitir, más o menos transitoriamente, envejecimientos incrementados. Esto se traduce en asignaciones de cargas admisibles para los transformadores, que se pueden haber exigido al fabricante, de conformidad con la *Norma Española UNE 20-110-75. Guía de carga para transformadores en aceite.*

§ Ap. I-2. Disminuciones de cargas admisibles en los casos de refrigerantes con temperaturas superiores a las normales.

Vienen especificadas en:

UNE 20-101-75. Transformadores de potencia.

Si los fluidos de refrigeración sobrepasan las temperaturas máximas in-

dicadas en el apartado 3.1.2 de tal norma en un valor igual o inferior a 5 °C habrá que reducir el calentamiento del transformador en 5 °C. Se admite que tal reducción se logra al rebajar la potencia al 92,5 %. Análogamente, si las temperaturas máximas de refrigeración son superadas entre 5 °C y 10 °C, los calentamientos del transformador deberán reducirse en 10 °C, lo que se admite que se logra rebajando la potencia al 85 % del valor de la nominal.

§ Ap. I-3. Reducciones de potencias por instalaciones en altitudes elevadas.

En los casos de instalaciones en alturas superiores a 1 000 m, de transformadores ensayados en altitudes normales, los límites de calentamiento indicados en la Norma *UNE 20-101-75* (tablas V y VI) serán reducidos de conformidad con lo que tal norma prescribe en el apartado 5.4.3. Lógicamente tales reducciones no entrarán en consideración al tratarse de transformadores refrigerados por agua.

APÉNDICE II

ASPECTOS TÉRMICOS EN LOS TRANSFORMADORES

§ Ap. II-1. Temperaturas de los medios de refrigeración.

Salvo acuerdos especiales, las temperaturas límites normales ¹ para los medios de refrigeración (*UNE 20-101-75*, apartado 3.1) han de ser:

Transformadores refrigerados por aire

<u>T. del aire</u>	<u>°C</u>
Máxima	40
Mínima	— 25
Media diaria máxima	30
Media anual máxima	20

Transformadores refrigerados por agua

T. máxima del agua de entrada	25
-------------------------------	----

§ Ap. II-2. Límites de calentamientos en los elementos integrantes de los transformadores.

Supuestos transformadores instalados en altitudes no superiores a 1 000 m y que los fluidos de refrigeración no excedan las temperaturas indicadas en el § precedente, *UNE 20-101-75* (apartado 5.4.1) establece los siguientes límites de calentamientos.

¹ En relación con regímenes especiales de funcionamiento, véase el apéndice I.

Transformadores en baño de aceite

<u>Elemento</u>	<u>Calentamientos máximos, °C</u>
Arrollamientos con aislamiento clase A (UNE 21-305)	65 (Medición por resistencia)
Capa superior del aceite:	
t. con conservador de aceite	60
t. no estanco al aire y sin conservador de aceite	55
Circuito magnético	Temperaturas que no perjudiquen al circuito magnético ni a elementos próximos

Transformadores secos

<u>Elemento</u>	<u>Aislamiento ¹</u>	<u>Calentamientos máximos, °C</u>
Arrollamientos	A	60
	E	75
	B	80
	F	100
	H	125
Circuito magnético:		
a) Adyacente a arrollamientos		Los mismos valores que para los arrollamientos
b) No adyacentes		Valores que no puedan perjudicar

¹ UNE 21-305.

APÉNDICE III

PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES

§ Ap. III-1. Naturaleza de las pérdidas en los transformadores de potencia.

En el texto de la obra, se admite que existen dos grupos fundamentales de pérdidas, y se hace abstracción, por razones didácticas, de otras de menor importancia. Las consideradas son:

- a) pérdidas en el hierro, por histéresis y por corrientes parásitas, aproximadamente pérdidas del ensayo en vacío;
- b) pérdidas en el cobre, por efecto JOULE, incluidos efectos superficial y de proximidad, aproximadamente pérdidas del ensayo en cortocircuito.

No obstante, es útil proceder a un examen más detenido.

§ Ap. III-2. Nuevo estudio de la corriente de vacío. Ciclos de histéresis estático y dinámico.

En el § II-1.3, se analizó, aunque en forma incompleta, la corriente i_0 de vacío o de excitación. A tal fin, se partió del ciclo de histéresis propio de los materiales ferromagnéticos (pérdidas por histéresis), pero no se consideraron las corrientes de FOUCAULT, con sus correspondientes pérdidas.

Después del estudio del diagrama del transformador en carga, resulta fácil completar aquel análisis.

En la figura ap. III,1a, se aprecia el flujo cuya variación induce en el núcleo fuerzas electromotrices. Éstas originan las corrientes de FOUCAULT que pueden verse en (a') (sección maciza) y en (a'') (sección laminada). El circuito correspondiente a estas corrientes es fundamentalmente óhmico.

Razone el lector que dichas corrientes son más acusadamente óhmicas si el núcleo tiene estructura laminada.

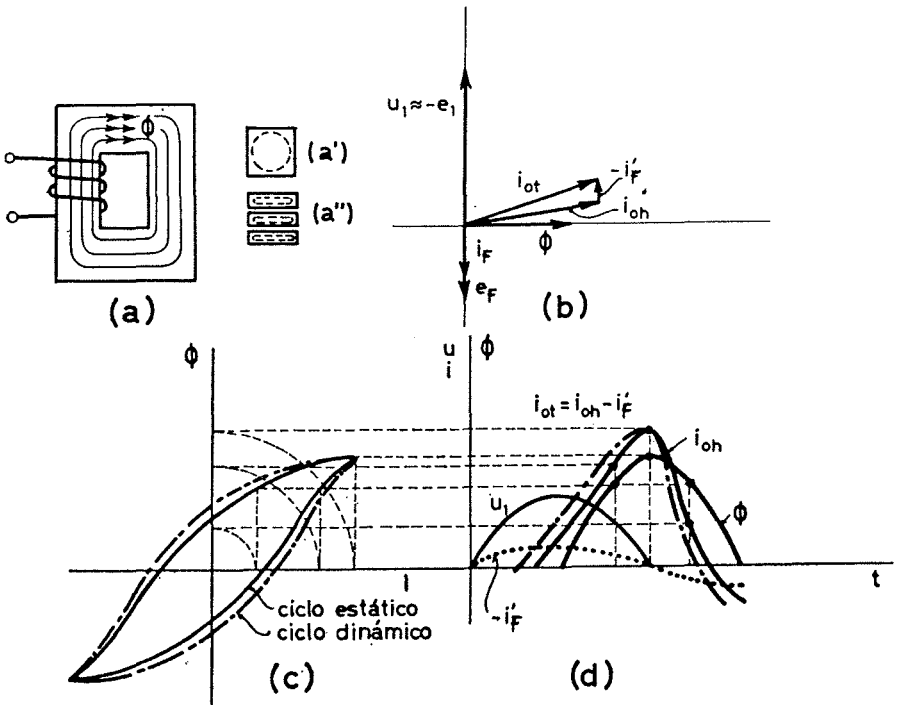


Fig. ap. III,1

El flujo Φ es senoidal, luego lo serán las fuerzas electromotrices y las corrientes de FOUCAULT. No hay inconveniente en considerarlas como corrientes de carga de un secundario. El hecho de que el asiento de las corrientes de FOUCAULT sea la propia masa ferromagnética, en lugar de un circuito de cobre (arrollamiento secundario) no establece diferencia conceptual básica en el proceso físico general. En el diagrama (b) se representan E_F (f.e.m. productora de las corrientes de FOUCAULT) e I_F (corrientes de FOUCAULT). E_F e I_F se consideran en fase. Aun cuando I_F atrase algo, en relación con E_F , no quedan, en lo fundamental, modificados los conceptos que siguen.

En el diagrama vectorial (b) se ha dibujado la corriente primaria (I_{ot}), suma de

I_{oh} = corriente de vacío por histéresis (§ II-1.3, figura II-1,4), y de $-I'_F$ = corriente primaria adicional, por corrientes de FOUCAULT.

$$I_{ot} = I_{oh} - I'_F$$

La corriente I_{ot} , que sustituye a I_{oh} , justifica las mayores pérdidas consideradas.

La figura (d) es, en su parte en trozos seguidos, reproducción de la II-1,4. Con trazado en puntos, se ha añadido la corriente $-i'_F$, en fase con u_1 . A base de puntos y trazos se ha dibujado

$$i_{ot} = i_{oh} - i'_F$$

En el § II-1.3, y a través del ciclo estático de histéresis, se estableció la correspondencia $i_0 - \Phi$. En la figura (d) se ven las curvas i_{ot} y Φ . Con ellas puede trazarse el nuevo ciclo de histéresis que las relaciona. El primero, cuya área únicamente justifica las pérdidas por histéresis, es el *ciclo estático*. El segundo, cuya área justifica las pérdidas por histéresis y por corriente de FOUCAULT, es el *ciclo dinámico*.

§ Ap. III-3. Pérdidas en el ensayo en vacío.

3-1. Por histéresis y por corrientes parásitas (FOUCAULT) en el núcleo, así como en otros elementos. También por imperfecciones constructivas (rebabas de corte en las chapas).

3-2. Por efecto JOULE debidas a la corriente de vacío. En el § II-2.3 se realiza un tanteo para comprobar que son, en general, despreciables, especialmente en los actuales transformadores con chapa de grano orientado (I_0 reducida).

3-3. Por histéresis dieléctrica y por conducción del aislamiento (por *perditancia*). Prácticamente despreciables, las primeras, a las frecuencias industriales. También lo son las segundas, en virtud de los valores limitados de las \mathcal{E} de trabajo que la seguridad requiere.

Se ve que, prácticamente, las pérdidas del ensayo en vacío son iguales a las pérdidas en el hierro. Son las llamadas *pérdidas fijas*.

§ Ap. III-4. Pérdidas en el ensayo en cortocircuito.

4-1. Por efecto JOULE, a base de la corriente de plena carga.

4-2. Adicionales por las corrientes parásitas (de FOUCAULT), originadas en los conductores por los flujos alternos que los atraviesan (efectos superficial y de proximidad). Véase § II-3.6 (figura II-3,7).

4-3. Por histéresis y por corrientes parásitas, en el núcleo, debidas al débil flujo alterno, característico de este ensayo (3 ÷ 15 % del de vacío). En el § II-7.2 se ha realizado un tanteo para demostrar su escasa importancia.

4-4. En diversos elementos constructivos ferromagnéticos, o simplemente conductores, pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas (debidas a flujos de dispersión, análogos a los de plena carga).

Los conceptos 4-1 y 4-2 son los principales. Pueden reunirse en uno solo, pérdidas por efecto JOULE en los conductores, teniendo presente los efectos superficial y de proximidad, característicos de la corriente alterna.

Con carácter aproximado, aunque con cierta impropiedad, se confunden las pérdidas del ensayo en cortocircuito con las debidas a la carga (*pérdidas variables*). No habrá dejado de observarse que las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, que en este apéndice (§ Ap. III-3) se han conceptualizado como pérdidas fijas, resultan ser, en definitiva, algo dependientes de la carga.

Se ha usado la designación *pérdidas adicionales* para indicar las relativas, principalmente, al concepto 4-2, y además (de menor cuantía) las 4-4. Se trata, pues, de la diferencia entre las pérdidas reales originadas en el ensayo de cortocircuito, por el paso de la corriente de plena carga, y las que produciría una corriente continua de valor igual al eficaz de la corriente alterna (nominal). Estas últimas se pueden medir por ensayo con corriente continua. También se pueden calcular,

$$R_{cc} I_{n1}^2 = (R_1 + r_t^2 R_2) I_{n1}^2.$$

Es evidente que no incluyen los conceptos 4-2 y 4-4.

Las pérdidas adicionales son de cierta consideración. Fácilmente tienen valores comprendidos entre el 3 % y el 20 % de las totales del transformador. Para aminorarlas, se emplean adecuados recursos constructivos, por ejemplo, se evitan secciones grandes en los conductores, a base de disponer ramas en paralelo y *transponerlas* (§ II-3.6).

§ Ap. III-5. Pérdidas que se considerarán.

Resumiendo, las pérdidas se considerarán, algo simplistamente, clasificadas en dos (tres) grupos, son :

Pérdidas al conectar en vacío el transformador = pérdidas del ensayo en vacío ≈ pérdidas en el hierro ≈ pérdidas fijas..... (15 % ÷ 40 %)

Incremento de pérdidas al dar carga al transformador \approx
 pérdidas del ensayo en cortocircuito \approx pérdidas en el
 cobre (incluidas las debidas a las corrientes de FOU-
 CAULT y las de histéresis ajenas al núcleo).....

}	Pérdidas en corriente continua
	(50 % ÷ 80 %)
	Pérdidas adicionales
	(3 % ÷ 20 %)

Los porcentajes se refieren a las pérdidas totales a plena carga (100 %).

§ Ap. III-6. Medición de las pérdidas en vacío. Variación con la temperatura.

Se aplica la tensión, indistintamente, en el primario o en el secundario. Ciertamente, lo teóricamente correcto es que la pérdida suplementaria debida a la corriente de excitación (efecto JOULE), se produzca en el primario. No obstante, ya se ha dicho que es de poca cuantía. Además, prácticamente tiene el mismo valor si se excita por el secundario, ya que los valores $R_1 I_{201}^2$ y $R_2 I_{202}^2$ suelen ser semejantes. Por facilidad, suele aplicarse la tensión en el lado de más baja tensión.

La práctica demuestra que las pérdidas en vacío se pueden considerar independientes de la temperatura. Realmente las pérdidas en el hierro disminuyen algo con la temperatura, y las debidas al efecto JOULE y las dieléctricas crecen rápidamente con la temperatura. Dada su proporción relativa, existe una cierta compensación, que suelen admitir las diversas normas o recomendaciones.

§ Ap. III-7. Medición de las pérdidas en cortocircuito. Variación con la temperatura.

Se aplica la tensión, indistintamente, al primario o al secundario. Por comodidad, suele aplicarse a los arrollamientos con tensiones medias, ($\epsilon_{cc} \approx 4 \div 10$ %). Puede medirse con una intensidad menor que la nominal¹, incluso se recomienda hacerlo con $0,7 I_n$, a fin de que, durante la medición, no varíen notablemente las resistencias de los arrollamientos, por calentamiento. Lógicamente, al trabajar con corriente reducida, hay que tener presente que las tensiones medidas varían linealmente con las intensidades usadas, y las pérdidas con el cuadrado.

¹ No inferior a $0,25 I_n$, según UNE 20-101-75, § 6.5.

Si se desea conocer las pérdidas adicionales, se medirán las resistencias (R_1 y R_2) con corriente continua, y se calcularán las pérdidas teóricas correspondientes (sin corrientes de FOUCAULT en los conductores ni en otros elementos). Dadas las constantes de tiempo, hay que dejar transcurrir algún tiempo antes de proceder a la lectura de la corriente.

Las pérdidas por efecto JOULE (en corriente continua) aumentan con la temperatura (coeficiente de temperatura positivo para la resistividad). Por el contrario, las pérdidas adicionales disminuyen con la temperatura (con la resistividad).

APÉNDICE IV

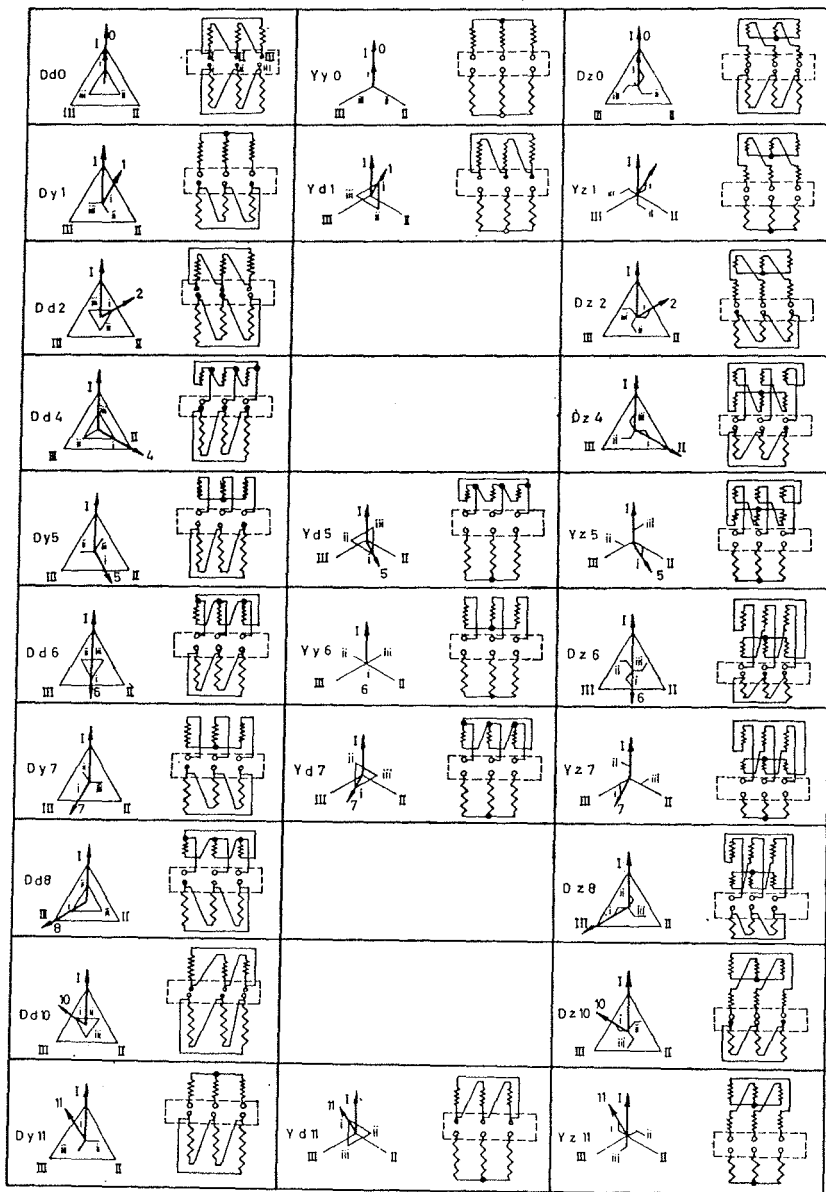
ACOPLAMIENTOS DE EMPLEO GENERAL SEGUN *CEI 76*¹

La recomendación *CEI 76 Transformadores de potencia (anexo D)* da libertad en cuanto a las designaciones de bornes, que pueden ser literales o numéricas. A título indicativo, usa I, II, III e i, ii, iii.

La Norma *UNE 20-101-75* (apartado 5.8.1) recomienda la utilización de los desfases 0 y 11 y, dentro de ellos, los acoplamientos (D y 11), (Y d 11), (Y z 11) y (Y y 0).

¹ Puede consultarse la Norma española *UNE 20-101-75*, concordante.

CONEXIONES DE EMPLEO GENERAL, SEGUN CEI 76 ⁽¹⁾



¹ Edición 1967, apéndice D.

APÉNDICE V

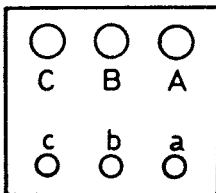
LOS DESFASES Y LA PUESTA EN PARALELO DE TRANSFORMADORES

§ Ap. V-1. Posibilidad de obtención de otros desfases (índices horarios).

Por corrimiento cíclico de las conexiones externas de un transformador (solamente alta, o bien baja), el desfase se modifica en 120° . Así resulta:

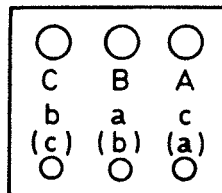
Índice horario	Desfase normal	Con una permutación cíclica	Con nueva permutación cíclica
0	0°	120°	240°
5	150°	270°	30°
6	180°	300°	60°
11	$330^\circ(-30^\circ)$	90°	210°

Por lo tanto, sin cambios internos de conexiones, simplemente prescindiendo del marcado del transformador (según las letras en paréntesis de la



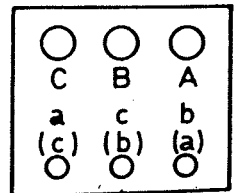
Grupo 0

0°



Grupo 4

120°



Grupo 8

240°

Fig. ap. V,1

figura ap. V,1) e imaginándolo marcado a base de corrimientos cíclicos, según se ha hecho en la figura, se logran otros desfases.

Existe otro recurso, que puede combinarse con el anterior. Se vió en los § III-7.5 y § III-7.6 como, en grupos mixtos de conexiones, sustituyendo la alimentación a base de un sistema directo, por otra a base de un sistema inverso, el desfase cambiaba de signo. Puede comprobarse que en los grupos horarios pares no se alteran los desfases al cambiar el sistema de alimentación. En los grupos impares, por el contrario, se cambian los signos de los desfases (o lo que es lo mismo, el 5 pasa a ser 7, el 11 pasa a ser 1). Ahora bien, no hace falta sustituir el sistema de alimentación por otro, basta permutar dos conexiones. En la figura ap. V,2, se han cambiado las B y C, con lo cual, según ya se había justificado, en este caso concreto en el § III-7.5, se pasa del grupo de conexión Dy 11 al Dy 1.

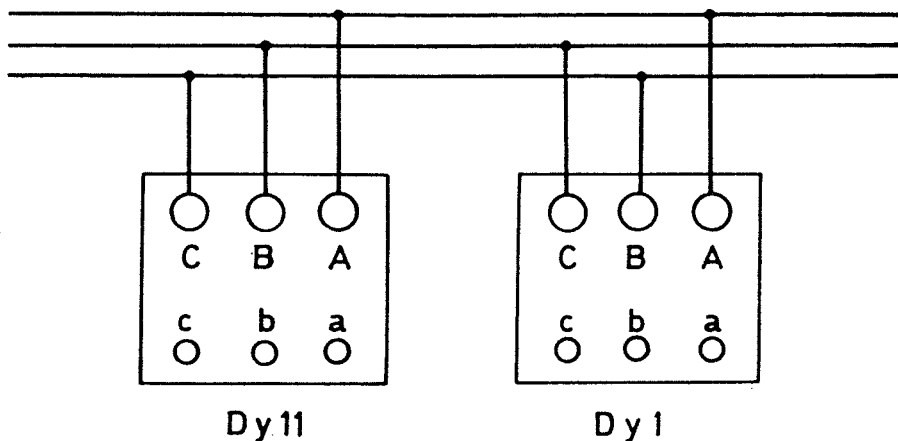


Fig. ap. V,2

Los métodos anteriores no exigen más que manipulaciones externas. Si se recurre a modificaciones de conexiones internas (formación de neutro a b c, en lugar de a' b' c', o viceversa, o alteración del triángulo, o del zigzag), se pueden conseguir otros cambios, por ejemplo, pasar del grupo horario 0 al grupo 6.

§ Ap. V-2. Posibilidades de puesta en paralelo de transformadores con distintos índices horarios.

Sin más análisis, que no aportaría nuevos conceptos básicos, se dirá que la combinación de los recursos anteriores conduce a lo siguiente, de interés

práctico, resumen de las indicaciones sobre el particular de *CEI 76 Transformadores de potencia, anexo E*. Se refiere a las conexiones recomendadas que figuran en el cuadro del apéndice IV.

Se distinguen cuatro grupos de conexiones:

Grupo I: índices horarios 0, 4 y 8

Grupo II: índices horarios 6, 10 y 2

Grupo III: índices horarios 1 y 5

Grupo V: índices horarios 7 y 11

La marcha en paralelo de dos transformadores con el mismo índice horario es siempre posible.

Si los índices horarios difieren en 4 u 8 (o sea 120° ó 240°), los transformadores pertenecerán al mismo grupo, según puede ver el lector. Esto significa que, aún siendo distintos los desfases, difieren lo mismo que dos fases en un sistema trifásico. Luego la forma de proceder es:

a) conectar unos bornes (por ejemplo, A, B y C) a base de idénticos símbolos literales;

b) en cuanto a los otros arrollamientos (a, b y c), se procederá a una permutación cíclica adecuada de unos en relación con los otros, compensándose, así, el desfase de 120° (240°).

Aun cuando los índices horarios no pertenezcan a un mismo grupo, un transformador del III puede funcionar en paralelo con otro del IV, a base de invertir el orden de sucesión de las fases de un transformador respecto al otro. Nótese, en efecto, que se trata de compensar desfases simétricos respecto al 0° .

Son imposibles, sin recurrir a cambios internos de conexión, otras puestas en paralelo de transformadores.

§ Ap. V-3. Proceso sistemático para la puesta en paralelo de transformadores con índices horarios ignorados.

Existe un método, para proceder sistemáticamente, tal que, incluso prescindiendo del conocimiento de los grupos horarios, y de cualquier marcado de bornes (eventualmente erróneo) permite establecer la correcta puesta en paralelo, si es posible. Consiste en lo siguiente, figura ap. V,3:

Se conectan a una línea, los arrollamientos de más elevada tensión de los transformadores, pero al azar uno en relación con el otro. Por el lado de baja tensión, se unirán un borne de cada transformador, también elegidos al azar (por ejemplo los de la izquierda, para proceder sistemáticamente en la figura). Se trata de lograr que entre otro par de bornes de baja tensión (uno de cada transformador) no exista diferencia de potencial, ni tampoco entre los restantes. En tal caso se habrá realizado el apareado correcto.

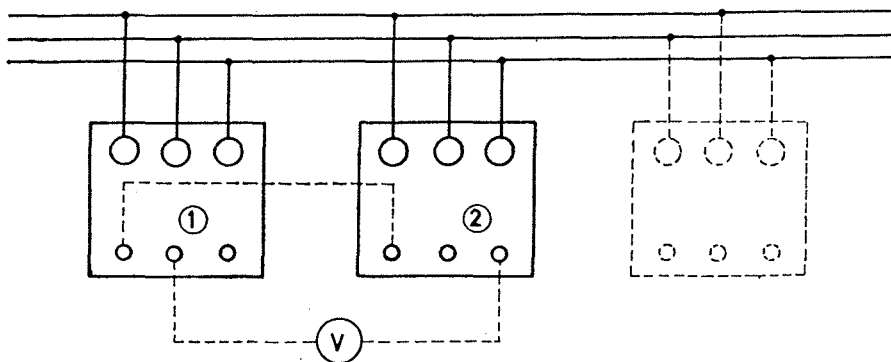


Fig. ap. V,3

Para estas comprobaciones, se dispondrá de un voltímetro de escala con alcance doble, en relación con la tensión compuesta nominal de los transformadores ¹.

Si no se logra el resultado perseguido, se realizará la conexión (en baja) del primer borne del primer transformador, con otro del segundo (baja), y se procederá como antes.

Agotadas todas las posibilidades en baja, sin éxito, se recurrirá a la permuta de dos conexiones en alta tensión (véase el segundo transformador dibujado en trazos). Seguidamente se procederá como antes.

El fracaso, tras este proceder sistemático, significará que los transformadores son inacoplables, a no ser, eventualmente, que se recurra al cambio interno de conexiones.

§ Ap. V-4. Determinación experimental de índices horarios.

Lo anterior no llega a poner de manifiesto los grupos horarios de los transformadores. Una forma de lograrlo puede ser la siguiente. En el transformador de la figura ap. V,4a, se vinculan, eléctricamente, los arrollamientos de alta

¹ Supuesto que en la más elevada tensión se utilice la nominal. Si hubiese neutro, la primera conexión, entre dos bornes arbitrarios de baja, se podría sustituir por la de neutros.

y baja, a base de unir dos bornes homólogos (§ III-7-2), tal como puede observarse. El transformador se alimentará mediante un triángulo, bien equilibrado (b), de tensiones reducidas. A base de mediciones de tensiones (módulos), entre todos los bornes, se trazan diagramas vectoriales topográficos, como los que se ven en (c). De éstos se deduce el grupo horario. Este método requiere

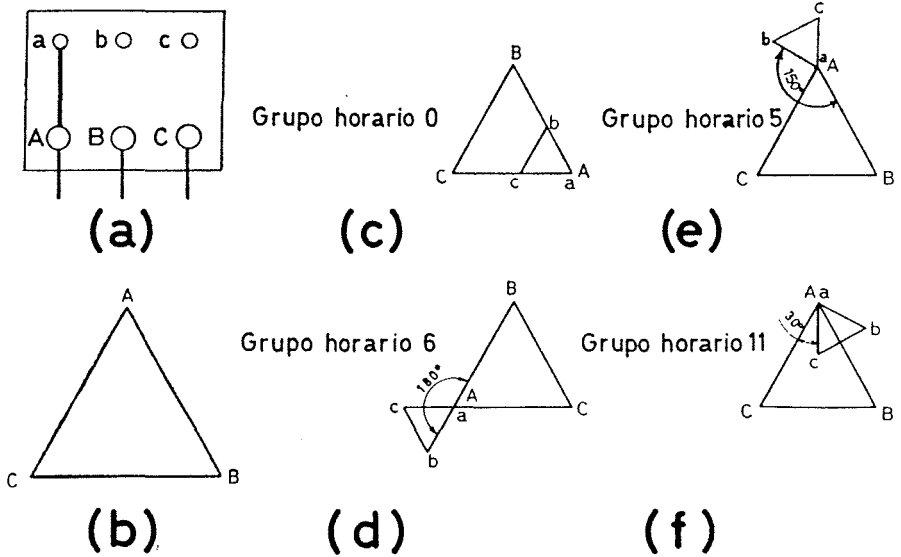


Fig. ap. V,4

una relativa precisión en las mediciones, por lo que cae en defecto cuando la relación de transformación es elevada.

APÉNDICE VI

ANÁLISIS DEL DESEQUILIBRIO FASE-FASE EN LOS TRANSFORMADORES CON CONEXIONES Dy

Se refiere al transformador trifásico representado en la figura ap. VI,1. Se va a emplear el método de las componentes simétricas, pues permite poner

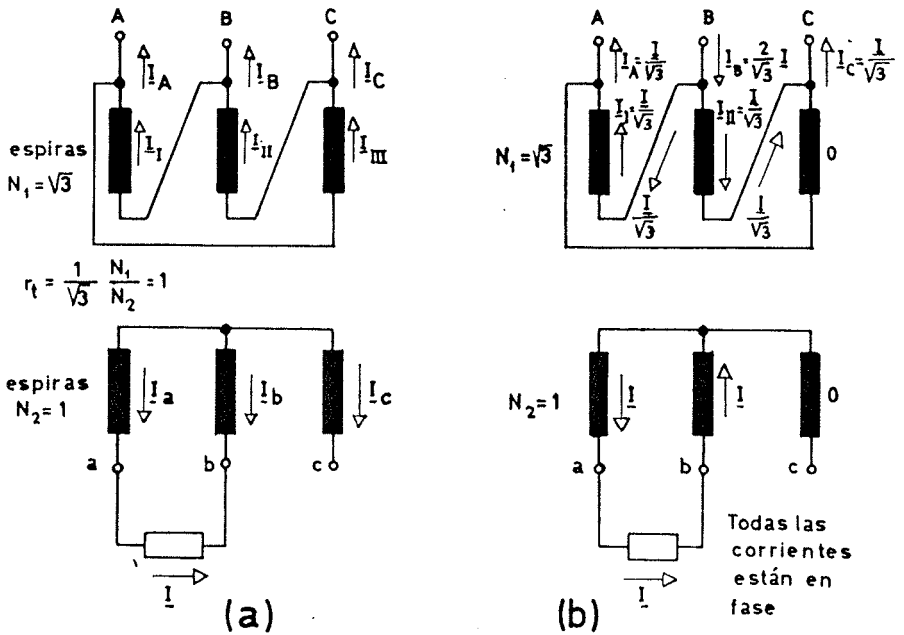


Fig. ap. VI,1

de relieve el distinto comportamiento del transformador, en cuanto a los desfases, según se trate de un sistema directo o inverso de tensiones. Con la misma facilidad se pueden analizar los restantes casos del § III-8.2.

La carga desequilibrada se descompondrá en sus componentes simétricas. Las ecuaciones correspondientes al régimen de carga, según figura ap. VI-1a (de acuerdo con las flechas de valoración de tal figura) son:

$$I_a = -I_b = I$$

$$I_c = 0$$

Salta a la vista que tal tipo de carga desequilibrada carece de sistema homopolar. De otra forma, debería existir retorno por un neutro, verificándose $I_{02} = I_n/3$.

Los vectores fundamentales de los sistemas directo e inverso son (d = directo, 2 = secundario):

$$I_{d2} = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) = \frac{1}{3} I (1 - a) = \frac{1}{3} I \sqrt{3} \angle -30^\circ = \frac{I}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ$$

$$I_{i2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) = \frac{1}{3} I (1 - a^2) = \frac{1}{3} I \sqrt{3} \angle +30^\circ = \frac{I}{\sqrt{3}} \angle +30^\circ$$

$$I_{02} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) = 0$$

Téngase presente que el transformador trifásico (con núcleo trifásico o no) tiene el mismo comportamiento, en la transformación de tensiones y corrientes, tanto ante el sistema directo como ante el inverso¹. No hay más diferencia que, si frente a los sistemas directos la transformación (tensiones y corrientes) se realiza con un desfase de 330° en atraso², ante los inversos tal desfase es de -330° (o sea 330° en avance)³.

Los sistemas homopolares de tensiones y corrientes se comportan de otra forma⁴. Al no existir tales sistemas, el problema se simplifica.

¹ Supóngase que es idéntica la contribución física de las tres fases. Incluso en el caso, ordinario, de núcleo trifásico, con las tres columnas en un plano (asimetría en los circuitos magnéticos), puede asimilarse al anterior, a base, como aquí se hace, de desprestigiar las pequeñas corrientes de vacío. En general, tratándose de elementos estáticos (cables, líneas aéreas, transformadores, etc.), las impedancias a los sistemas positivo y negativo son iguales.

² Se supone el transformador normalizado Dy 11.

³ Incluso en este aspecto, solamente en apariencia existe una diferencia de comportamiento. Téngase presente que los desfases, se vienen considerando (por ser tradicional este proceder) positivos cuando los vectores secundarios atrasan, atendiendo al sentido de las agujas del reloj. Si en lugar de esto, el atraso se contara relacionándolo con el sentido de giro de cada sistema, se podría decir que, en ambos casos (sistema directo y sistema inverso), el desfase es en atraso.

⁴ Tal comportamiento es distinto en cada tipo de grupo de conexión, según sean los circuitos magnéticos, existan neutros o no (para retornos de corrientes en el secundario, y, eventualmente, en el primario). El estudio detenido de cada caso es largo y engorroso (véase apéndice VIII).

Como en las transformaciones en sistemas directos las corrientes primarias de línea avanzan $330^\circ = -30^\circ$,

$$I_{d1} = I_{d2} \underline{| - 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \underline{| - 30^\circ - 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \underline{| - 60^\circ}$$

Como los sistemas inversos atrasan 330° , o sea que avanzan $-330^\circ = +30^\circ$.

$$I_{i1} = I_{i2} \underline{| + 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \underline{| + 30^\circ + 30^\circ} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \underline{| + 60^\circ}$$

Por lo tanto, las corrientes de entrada son:¹

$$\begin{aligned} I_A &= I_{d1} + I_{i1} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \\ I_B &= a^2 I_{d1} + a I_{i1} = -\frac{2}{\sqrt{3}} I \\ I_C &= a I_{d1} + a^2 I_{i1} = \frac{1}{\sqrt{3}} I \end{aligned}$$

En la figura ap. VI,1b, se han cambiado flechas de valoración de forma que los módulos de todos los vectores sean positivos.

Si se desean hallar I_I , I_{II} e I_{III} , bastará que, como en el § III-5, se establezcan primeras ecuaciones de KIRCHHOFF, en nudos, y ecuaciones de «ventana» magnéticas. Se deducirán los valores que se indican en la figura ap. VI,1b.

Obsérvese:

- 1.º, todos los vectores corrientes están en fase;
- 2.º, la carga, en sólo dos fases del secundario, se ha repartido entre las tres del primario, mas no equilibradamente;
- 3.º, e importante, en cada columna, los amperios-vuelta originados por la carga secundaria quedan exactamente compensados por los amperios-vuelta de reacción del primario. Evidentemente, la comprobación es $N_1 I_1 = N_2 I$, etc.;
- 4.º, en virtud de lo anterior, esta carga desequilibrada no produce flujos suplementarios ni, por lo tanto, traslado del neutro.

Conclusión:

Tal desequilibrio no es perjudicial.

¹ El lector notará que los desfases suelen contarse entre tensiones simples (o corrientes correspondientes), reales o ideales, de primario y secundario. En consecuencia, tales corrientes son I_A , I_B , I_C , no I_I , I_{II} , I_{III} .

APÉNDICE VII

TRANSFORMADORES CON TRES ARROLLAMIENTOS

§ Ap. VII-1. Esquemas equivalentes en transformadores monofásicos.

En lugar de desarrollar la teoría general de los transformadores múltiples, se concretará en el caso de existir tres arrollamientos (§ V-1). Siempre por resultar más intuitivo, se empieza por considerar el transformador monofásico (figura ap. VII-1,1a). El símbolo *círculo en cuadrado* representa, indistintamente, generador en alterna o carga.

Se supondrán reducidos al primario los elementos de los arrollamientos secundario (2) y terciario (3), así resultan $N_1 = r_{12} N_2 = r_{13} N_3$. De esta manera se ha dibujado la figura (a) ($N_1 = N'_2 = N'_3$). En (b) se reproduce el transformador disponiendo en forma de parámetros concentrados, y externamente, las $Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$, los arrollamientos que quedan constituyen un transformador ideal. En (c) se ven eléctricamente unidos unos extremos de igual polaridad (§ II-4,5) de los arrollamientos. En virtud de $N_1 = N'_2 = N'_3$, tampoco hay inconveniente en unir los otros extremos de los arrollamientos ideales (c). Se puede establecer un esquema (d) equivalente al (c) (como se hizo en el § II-4, figura II-5,1d'). Ciertamente la corriente de vacío I_0 , que suplente al conjunto de las reales, carece de existencia física. Tal corriente I_0 se simula en el esquema (f) por un elemento lineal en correspondencia con la senoide equivalente (§ II-1.4).

Frecuentemente las corrientes de vacío son despreciadas con lo que el esquema equivalente reducido es el (g). Este esquema pone de manifiesto que

$$I_1 + I'_2 + I'_3 = 0, \quad [\text{Ap-1.1}]$$

lo que es cierto por el hecho de considerar nulas las corrientes de vacío (también puede verse en la figura V-1,1b). En consecuencia, el esquema equivalente al transformador es un multipolo de cuatro terminales particular, ya que cumple la condición [Ap-1.1]. Los esquemas reducidos unifilares se reducen a la parte dibujada en trazo seguido.

Determinación de $Z_{cc12} = Z_1 + Z_2$. De acuerdo con la figura Ap. VII-3,1, el arrollamiento (2) se ha dispuesto en cortocircuito y el (3) abierto (en vacío). Si la tensión resultante del ensayo es U_{cc12} ,

$$Z_{cc12} = Z_1 + Z_2 = \frac{U_{cc12}}{I_{1n}} \quad 1$$

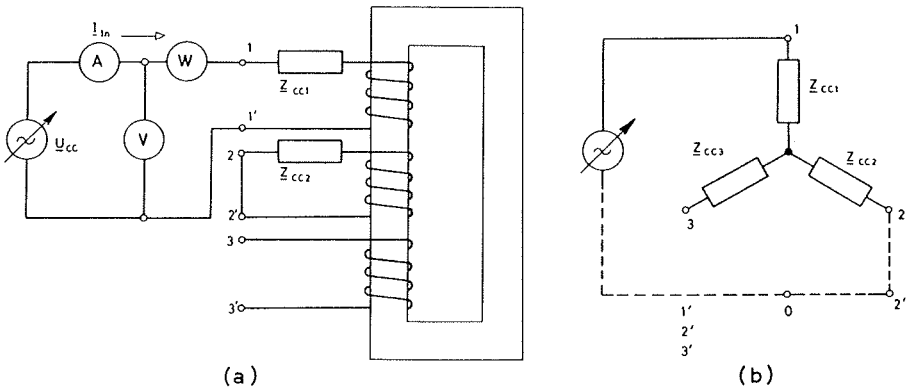


Fig. ap. VII-3,1

Con el ensayo se hallan:

$$Z_{cc12} = \frac{V}{A} \quad ; \quad R_{cc12} = \frac{W}{A^2} \quad ; \quad X_{cc12} = \sqrt{Z_{cc12}^2 - R_{cc12}^2}$$

(V, A, W , han de interpretarse lecturas de ...)

Análogamente tratándose de transformadores trifásicos (§ III-3.2).

A base de tres ensayos de esta naturaleza se deducen:

$$Z_{cc1} = \frac{1}{2} [Z_{cc12} + Z_{cc13} - Z_{cc23}]$$

$$Z_{cc2} = \frac{1}{2} [Z_{cc21} + Z_{cc23} - Z_{cc31}]$$

$$Z_{cc3} = \frac{1}{2} [Z_{cc31} + Z_{cc32} - Z_{cc12}]$$

¹ Evidentemente este valor no es la Z_{12} correspondiente al esquema en triángulo. Como ejercicio, el lector puede dibujar el esquema equivalente en triángulo en disposición de realización del ensayo que se ha definido.

Tratándose de cálculos de corrientes de cortocircuito, es práctica corriente, muy simplificada (véase § III-11), admitir $Z_{cc} = jX_{cc}$, es decir suponer $R_{cc} = 0$.

Esto es tanto más aceptable cuanto mayores son los transformadores. Y los de tres arrollamientos suelen ser de elevadas potencias. He aquí valores ¹ que ilustran lo indicado:

		$\epsilon_R \%$	$\epsilon_X \%$	$\epsilon_Z \%$
10 kV	50 kVA	2,3	3,28	4
30 kV	630 kVA	1,48	5,82	6
66 kV	10 000 kVA	0,65	7,98	8
130 kV	40 000 kVA	0,48	10,99	11

Normalmente las potencias nominales de los tres arrollamientos resultan ser desiguales (§ V-1.1). Lo más corriente es reducir los elementos a unas mismas tensión y potencia bases. No importa si se corresponden o no con una potencia de algún arrollamiento. Estos conceptos ya fueron aclarados, incluso con ejemplos prácticos, en los § II-7, § II-15, y especialmente en el § III-11.

Aun cuando parece innecesario, se resume con el siguiente cuadro:

Dependencia en relación con:

Magnitudes	tensión	potencia
Z_{cc} { R_{cc} X_{cc}	sí	no
	sí	no
ϵ_{cc} { ϵ_{Rcc} ϵ_{Xcc}	no	sí
	no	sí
I_n (reducida a una tensión)	sí	sí

Observación. Se tendrá presente que la reducción de secundario a primario (en general de una a otra tensión) consiste en $I'_2 = I_2/r_{t12}$ (en general, $I'_2 = I_2 U_{2n}/U_{1n}$), pero ya no hay que contar con que I'_2 sea igual a I_1 .

¹ Se refieren a transformadores con dos arrollamientos.

Ejemplo, figura ap. VII-3,2.

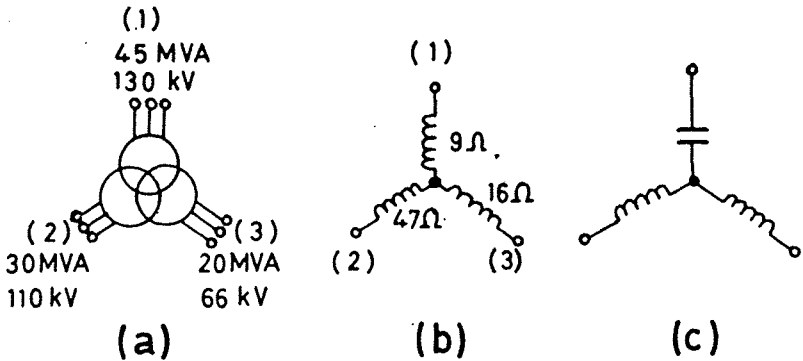


Fig. ap. VII-3,2

Los resultados de los ensayos en cortocircuito han sido:

$$\epsilon_{cc, 12} = 10\%, \text{ referido a } 30 \text{ MVA (6,66\% ref. a } 20 \text{ MVA)}$$

$$\epsilon_{cc, 23} = 10,5\%, \text{ referido a } 20 \text{ MVA}$$

$$\epsilon_{cc, 31} = 6\%, \text{ referido a } 20 \text{ MVA}$$

Se va a admitir $Z_{cc} \approx X_{cc}$.

Las intensidades nominales son:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 134 \text{ A, referida a } 30 \text{ MVA y } 130 \text{ kV} \\ \text{o bien} \\ I_1 &= \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 89 \text{ A, referida a } 20 \text{ MVA y } 130 \text{ kV} \\ I'_2 &= \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 89 \text{ A, referida a } 20 \text{ MVA y } 130 \text{ kV} \\ I'_3 &= \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 130 \cdot 10^3} = 89 \text{ A, referida a } 20 \text{ MVA y } 130 \text{ kV} \end{aligned} \right\}$$

Luego las reactancias $X_{cc} \approx Z_{cc}$, ya reducidas todas a 130 kV, son:

$$\left. \begin{aligned} X_{cc, 12} &= \frac{130 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \frac{10}{100} \frac{1}{134} = 56 \Omega \\ \text{o bien} \\ X_{cc, 12} &= \frac{130 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \frac{6,66}{100} \frac{1}{89} = 56 \Omega \end{aligned} \right\}$$

$$X_{cc, 23} = \frac{130 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \frac{10,5}{100} \frac{1}{89} = 88 \Omega$$

$$X_{cc, 31} = \frac{130 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \frac{6}{100} \frac{1}{89} = 50 \Omega$$

Luego los parámetros correspondientes al esquema en estrella son:

$$X_1 = \frac{56 + 50 - 88}{2} = 9 \Omega$$

$$X_2 = \frac{88 + 56 - 50}{2} = 47 \Omega$$

$$X_3 = \frac{50 + 88 - 56}{2} = 16 \Omega$$

Se ha representado en la figura ap. VII-3.2. No ha de sorprender si, en ciertas ocasiones, resulta una reactancia negativa. En tal caso, el esquema tomará la forma (c). Téngase presente que estas magnitudes son puramente calculísticas, ni siquiera se miden directamente.

§ Ap. VII-4. Caídas de tensión.

Si para la determinación de corrientes permanentes de cortocircuito, se considera suficiente el esquema a base de reactancias ($X_{cc} \approx Z_{cc}$), para el cálculo de caídas de tensiones internas es preciso el esquema en la forma de la figura ap. VII-1,1g. Disponiendo de tal esquema, el problema no ofrece dificultad.

El proceso de cálculo de la caída de tensión, figura ap. VII-4,1, es como sigue:

a) Se calculará $I_1 \approx I'_2 + I'_3$, así como φ_1 .

b) Se hallará la caída MN de la figura ap. VII-4,1 (§ II-11).

$$U_1 - U_N = R_{cc, 1} I_1 \cos \varphi_1 + X_{cc, 1} I_1 \sin \varphi_1$$

c) Se calculará la caída NT,

$$U_N - U'_2 = R_{cc, 2} I'_2 \cos \varphi_2 + X_{cc, 2} I'_2 \sin \varphi_2$$

d) Se sumarán, aritméticamente, las caídas

$$U_1 - U'_2 = R_{cc, 1} I_1 \cos \varphi_1 + X_{cc, 1} I_1 \sin \varphi_1 + R_{cc, 2} I'_2 \cos \varphi_2 + \\ + X_{cc, 2} I'_2 \sin \varphi_2$$

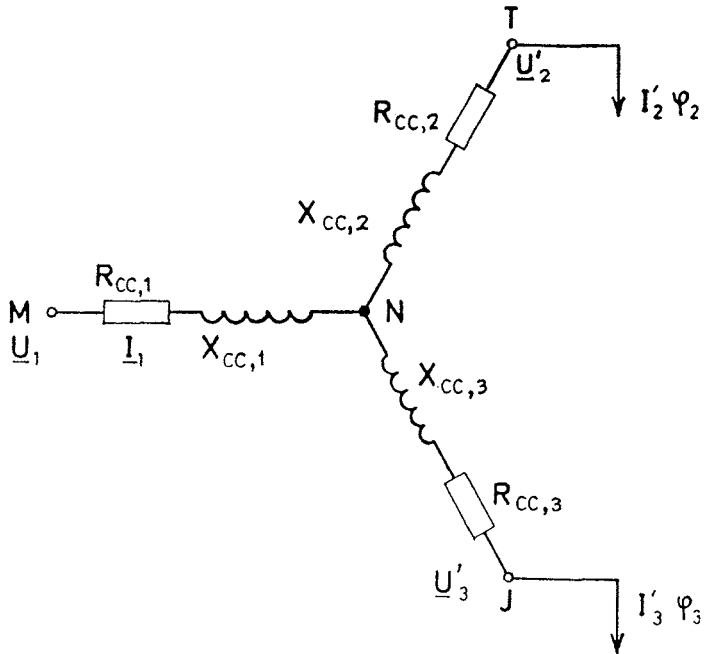


Fig. ap. VII-4,1

Si todas las $\epsilon_{z,cc}$ estuvieran referidas a la potencia mayor,

$$\epsilon \% = \frac{I_1}{I_{1n}} \epsilon_{R,cc} \cos \varphi_1 + \frac{I_1}{I_{1n}} \epsilon_{X,cc} \sin \varphi_1 + \frac{I'_2}{I_{1n}} \epsilon_{R,2cc} \cos \varphi_2 + \frac{I'_2}{I_{1n}} \epsilon_{X,2cc} \sin \varphi_2$$

Nótese que, incluso en vacío el arrollamiento (3), el punto J sufre variaciones de tensión, según las cargas en T.

§ Ap. VII-5. Determinación de pérdidas en transformadores con tres arrollamientos.

Véase UNE 20-101-75, § 9.

APÉNDICE VIII

IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR, EN LOS TRANSFORMADORES

§ Ap. VIII-1. Impedancias de cortocircuito inversas.

En diversos estudios de redes, relativos a estados de desequilibrio¹, es preciso conocer las impedancias de cortocircuito a las secuencias positiva, negativa y nula, de los elementos integrantes de las redes (líneas, generadores, transformadores y consumos). Esto justifica un examen, aunque sea breve, de la cuestión, referido a los transformadores.

Según ya se dijo en el apéndice VI, las impedancias de cortocircuito de un transformador a las secuencias positiva y negativa son iguales². Se designan, indistintamente, por *impedancia de cortocircuito* Z_{cc} ,

$$Z_1 = Z_2 = Z_{cc}$$

$$Z_d = Z_i = Z_{cc}$$

También ha sido llamada *impedancia trifásica*.

Se recuerda que la única diferencia de comportamiento de los transformadores, ante las secuencias directa e inversa, está en el ángulo de desfase³.

En consecuencia, no hemos de preocuparnos más que de la impedancia a la secuencia nula (homopolar).

¹ Véase, por ejemplo, *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, § IV-8, § IV-9 § IV-10.

² Ocurre así, en general, tratándose de elementos no rotatorios (cables, líneas aéreas, transformadores, consumos estáticos, etc.).

³ Incluso en este aspecto puede afirmarse que no hay diferencia de comportamiento.

Conviene recordar que las impedancias, en general, pueden darse en módulos $Z_{cc} (\Omega)$, o, para mayor precisión, por sus componentes $Z_{cc} = R_{cc} (\Omega) + j X_{cc} (\Omega)$, y que, frecuentemente, se desprecia R_{cc} , resultando $Z_{cc} (\Omega) \approx X_{cc} (\Omega)$.

Ahora bien, es usual dar tales magnitudes, indirectamente, en determinada forma porcentual (ϵ_{cc}). Aún cuando ya se ha venido empleando, es útil aclarar este concepto. En realidad se trata de la caída de tensión que, en tal impedancia, ocasiona el paso de la corriente nominal, referida, aquella caída, a la tensión simple nominal.

$$\epsilon_{cc} = \frac{Z_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100; \epsilon_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100; \epsilon_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{U_{1n}} 100$$

También puede definirse (ϵ_{cc}) como el valor, en tanto por ciento, de la impedancia Z_{cc} , referido a los «ohmios de la carga nominal». Se entenderá por "ohmios de la carga nominal", el cociente de dividir la tensión simple nominal, por la intensidad nominal de línea.

$$\epsilon_{cc} = \frac{Z_{cc}}{U_{1n}/I_{1n}}$$

§ Ap. VIII-2. Impedancias homopolares de cortocircuito.

De acuerdo con la figura ap. VIII,1, se define la impedancia homopolar, Z_0 , por fase, de un sistema trifásico de impedancias equilibradas:

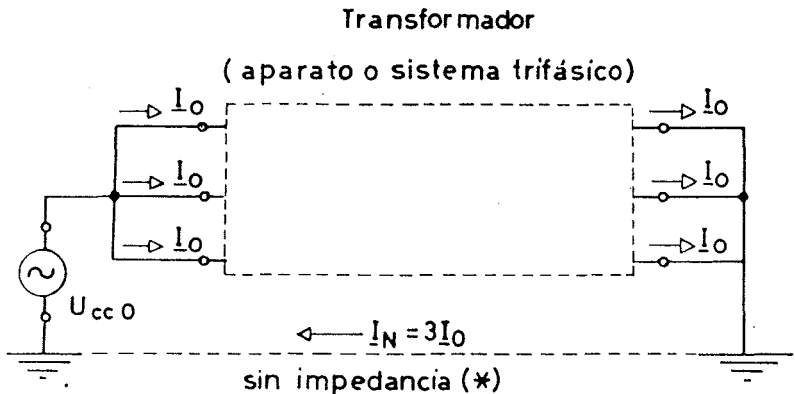


Fig. ap. VIII,1

$$Z_0 = \frac{U_{cc,0}}{I_0}; \text{ o bien } Z_0 = 3 \frac{U_{cc,0}}{I_N}$$

* No se olvide que una impedancia en el neutro (Z_n), provoca una caída de tensión $3 I_0 Z_n$. Por lo tanto, es la misma caída que provoca, en cada fase, una impedancia $3 Z_n$. Esta impedancia, que desde luego interviene en el paso de corrientes homopolares (solamente), es llamada impedancia de neutro, pero no forma parte de la impedancia homopolar del aparato.

En el caso concreto de los transformadores, las impedancias homopolares dependen:

- a) del grupo de conexión;
- b) de las puestas a tierra, o no, de los puntos neutros;
- c) de la naturaleza de los circuitos magnéticos (es decir: tres transformadores monofásicos, núcleo trifásico de tres columnas, núcleo trifásico con columna o columnas ferromagnéticas de retorno de flujos).

Esto ofrece variedad de comportamientos (de impedancias homopolares). En la práctica, se dispone de cuadros con esquemas equivalentes a los transformadores, referidos a las corrientes homopolares.

Un cuadro de esta índole, relativo a transformadores con dos y tres arrollamientos, así como a autotransformadores y a transformadores especiales, puede verse en *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, publicado por Westinghouse Electric Corporation.

Con el fin de familiarizar con este concepto, se van a examinar algunos casos, entre los varios posibles.

En esta clase de problemas (concretamente tratándose de cortocircuitos), es frecuente, y simplificador, considerar $Z_{cc} \approx X_{cc}$.

Por supuesto, si no existen neutros puestos a tierra (o a conductor neutro), con posibilidad de dar retorno a la corriente, la impedancia homopolar es infinita.

§ Ap. VIII-3. Banco trifásico Yd, a base de transformadores monofásicos, con neutro puesto a tierra.

En la figura ap. VIII,2, puede verse el transformador preparado para el ensayo (el conexionado en trazos del secundario es, prácticamente, inoperante). Es fácil ver que, en este ensayo de cortocircuito, las corrientes que se establecen en el secundario son las de la figura (a) (en cada columna $\Sigma f.m.m. = 0$). También está claro que el comportamiento de cada transformador monofásico (tensiones, corrientes y flujo) es el mismo que si cada fase secundaria estuviese en cortocircuito, según figura (b). Los tres transformadores monofásicos trabajan normalmente y en fase. Luego la impedancia homopolar es la misma que la Z_{cc} (impedancia trifásica).

$$Z_d = Z_i = Z_0 = Z_{cc}$$

cerrados (b'). Esto motiva que, a igualdad de corrientes de ensayo (las del ensayo de cortocircuito), los flujos de dispersión tienden a ser menores (mayores caminos por el aire), luego lo serán las reactancias de dispersión, y, por lo tanto, U_{cc} . En resumen, la Z_0 es menor que en el caso anterior, $Z_0 < Z_d = Z_i$.

§ Ap. VIII-5 Banco trifásico Yy, con los dos neutros puestos a tierra, a base de transformadores monofásicos.

Véase la figura ap. VIII,5a, con el esquema del ensayo, se trata, realmente, de tres transformadores monofásicos sometidos, simultáneamente, al mismo ensayo de cortocircuito. En estas condiciones, está claro $Z_d = Z_i = Z_0$. Hay que añadir que no se presentan desfases. Los tres esquemas equivalentes se reducen al indicado en (b).

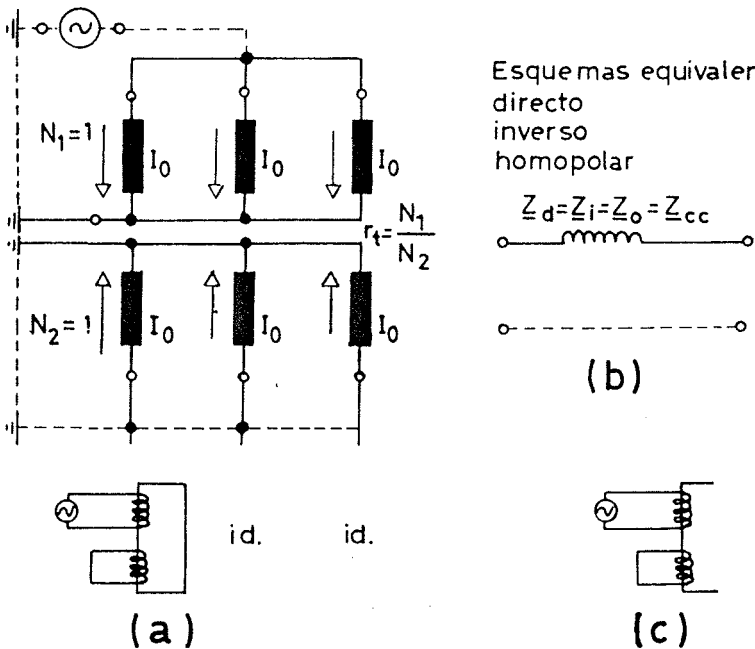


Fig. ap. VIII,5

§ Ap. VIII-6. Transformador Yy, con núcleo trifásico (sin columnas de retorno), y con los dos neutros puestos a tierra.

En el caso de núcleo trifásico (tres columnas), los razonamientos son idénticos pero, en lo cuantitativo, ocurre que Z_0 es algo menor que Z_d (Z_i). Ello puede explicarse por el hecho de que los ensayos simultáneos en cortocircuito comportan, en este caso, tres flujos homopolares, sin columna de retorno, el esquema (a) ha de sustituirse por el (c). Las mismas corrientes (las del ensayo de cortocircuito) motivan flujos de dispersión algo menores (mayores reluctancias). Esto significa menores reactancias de dispersión, luego menor U_{cc} . Y recordando $Z_0 = U_{cc}/I_n$, resulta Z_0 menor.

§ Ap. VIII-7. Banco trifásico Yy, a base de transformadores monofásicos, con sólo el neutro primario puesto a tierra (o solamente el secundario).

Véase figura ap. VIII,6. Realmente se trata del ensayo simultáneo de los tres transformadores monofásicos en vacío. Las corrientes I_0 serán muy pequeñas, las normales de excitación. Esto significa que la impedancia homopolar

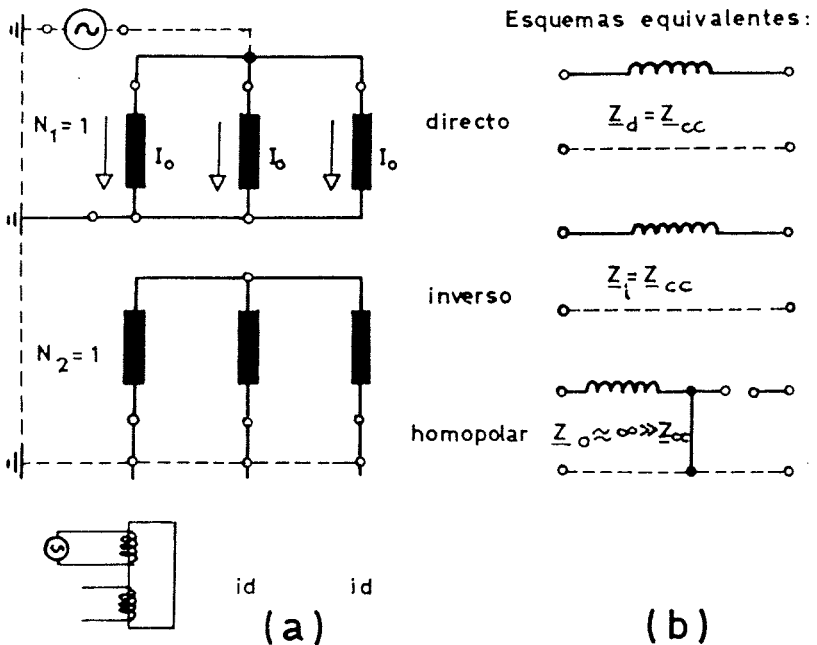


Fig. ap. VIII,6

es elevada: Se puede admitir infinita, ya que se vienen despreciando las corrientes de excitación¹.

Las corrientes homopolares no tienen paso al secundario. Los esquemas equivalentes se dan en la figura VIII,6b.

Si el único neutro puesto a tierra fuese el secundario, está claro $Z_0 = \infty$.

§ Ap. VIII-8. Transformador, con núcleo de tres columnas, Yy, con sólo el neutro primario puesto a tierra (o solamente el secundario).

Conceptualmente, es el mismo caso precedente, pero cuantitativamente se diferencia. Sigue siendo un ensayo en vacío en cada columna (figura ap. VIII,6), pero los tres flujos homopolares no disponen de columna de retorno figura ap. VIII,7a. Tales flujos tienen, aproximadamente, el mismo valor que

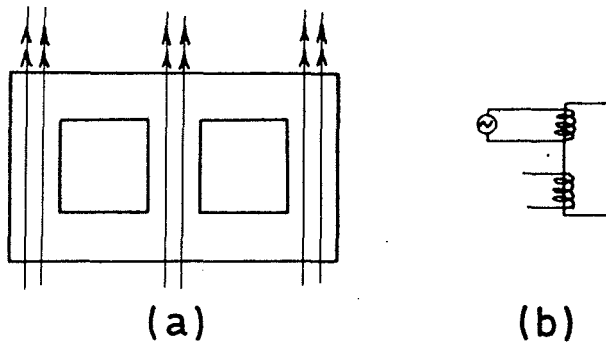


Fig. ap. VIII,7

en el caso precedente. Por lo tanto, al ser considerablemente mayor la reluctancia del camino, la corriente de excitación tendrá que ser notablemente más elevada. En resumen, la impedancia homopolar es moderada.

Los esquemas equivalentes son, también, los de la figura ap. VIII,6b, pero con Z_0 que ya no es prácticamente infinita. Continúa poseyendo un valor relativamente elevado, como orientación se dirá que suele tener valores porcentuales comprendidos entre 20 % y 100 %. Los más elevados corresponden a transformadores cuyo flujo homopolar encuentra un favorable camino de retorno por la caja.

Hay que llamar la atención sobre que el valor experimental de Z_0 puede variar sensiblemente, según que el ensayo se realice con el transformador

¹ En realidad, lo que se pone de manifiesto con la corriente de excitación es la admitancia de excitación del esquema no simplificado de un transformador.

dentro o fuera de su caja. De ahí que se recomiende que las determinaciones se realicen con los transformadores en disposición normal.

§ Ap. VIII-9. Otros casos.

Un estudio más amplio debería abarcar, además de otros casos relativos a transformadores, los referentes a autotransformadores y a transformadores con arrollamientos múltiples.

APÉNDICE IX

DESIGNACIONES DE TRANSFORMADORES SEGÚN LOS MEDIOS Y MÉTODOS DE REFRIGERACIÓN, DE ACUERDO CON LA RECOMENDACIÓN CEI 76, § 15 y § 16¹

§ Ap. IX-1. Símbolos que se utilizarán.

Los transformadores se designarán según el modo de refrigeración utilizado. Los símbolos literales correspondientes a cada modo de refrigeración son los del cuadro III de CEI 76 § 15.

Cuadro III.
Símbolos literales

Naturaleza del agente de refrigeración	Símbolo
Aceite mineral	O
«Askarel» («Pyraleno»)	L
Gas	G
Agua	W
Aire	A
Aislante sólido	S
Naturaleza de la circulación	
Natural	N
Forzada	F

¹ Con ella concuerda UNE 20-101-75.

§ Ap. IX-2. Disposición de símbolos.

De conformidad con *CEI 76*, § 16.

Exceptuando los transformadores del tipo seco, con envolvente protectora, cuyo símbolo apropiado es AN o AF, los transformadores se designarán mediante cuatro símbolos, para cada uno de los modos de refrigeración para los cuales el constructor ha previsto un régimen nominal. Se empleará una barra de fracción, oblicua, para separar cada grupo de símbolos.

El orden de empleo de los símbolos se da en el cuadro IV.

Cuadro IV.

Orden de los símbolos

1.ª letra	2.ª letra	3.ª letra	4.ª letra
Concierne al agente refrigerante que está en contacto con los arrollamientos.		Concierne al agente refrigerante que está en contacto con el sistema de refrigeración exterior.	
Naturaleza del agente refrigerante	Naturaleza de la circulación.	Naturaleza del agente refrigerante.	Naturaleza de la circulación.

Por ejemplo, un transformador en baño de aceite, con circulación forzada de éste, que, a su vez, es refrigerado por aire, por ventilación forzada, se designará OFAF. Un transformador tipo seco con ventilación forzada se designa, según dicho, simplemente AF.

En el caso de un transformador en el cual pueden elegirse las circulaciones natural o forzada (con las potencias correspondientes a cada caso), las designaciones son del tipo

ONAN/ONAF, ONAN/OFAN, ONAN/OFAF.

APÉNDICE X

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE POLARIDADES

§ Ap. X-1. Método por corriente continua.

Véase la figura ap. X,1. Se empieza por marcar las polaridades correspondientes a una batería y en un galvanómetro o en un voltímetro de cuadro móvil. Para ello puede emplearse una resistencia R (a) de protección. Seguidamente, estos elementos se conectarán a los devanados del transformador, según (b). Si se ha acertado a unir con polaridades correspondientes de los arrollamientos, la desviación del voltímetro, al conectar, tenderá a presentarse en igual sentido que antes.

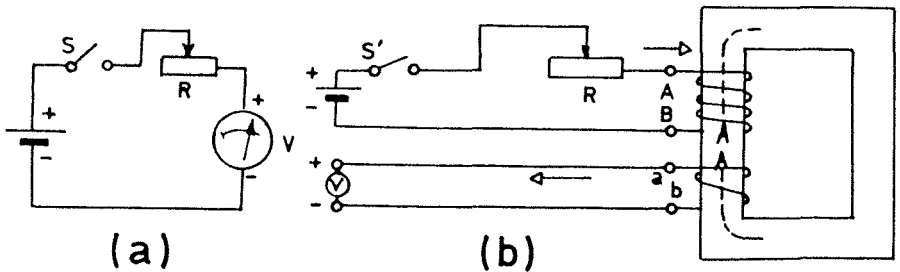


Fig. ap. X,1

§ Ap. X-2. Método por corriente alterna.

Véase la figura ap. X,2. Se unirán, al azar, un borne de un arrollamiento X , con otro del otro, Y . Se aplicará una tensión alterna. Se realizarán mediciones voltimétricas:

si X - Y de igual polaridad, $V_1 = V_2 - V_3$

si X - Y de polaridad contraria, $V_1 = V_2 + V_3$

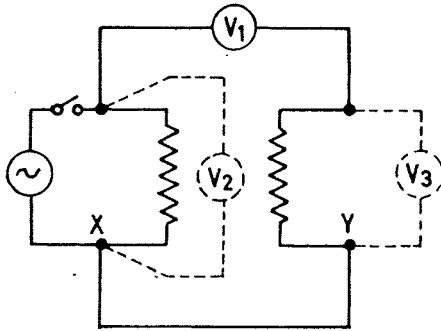


Fig. ap. X,2

APÉNDICE XI

TOLERANCIAS EN LOS VALORES NOMINALES Y EN LOS DE GARANTÍA DE LOS TRANSFORMADORES

Se resumen las principales tolerancias vigentes según la recomendación *CEI 76*, § 34 con la que concuerda *UNE 20-101-75*, § 5.10.

Cuadro XIV.

Tolerancias (extracto)

Concepto	Tolerancia
1. a) Pérdidas totales. b) Pérdidas parciales.	+ 1/10 de las pérdidas totales. + 1/7 de cada una de las pérdidas parciales, a condición de no sobrepasar la tolerancia sobre el total de las pérdidas.
2. Relación de transformación en vacío, para la toma principal (relación de transformación nominal).	El menor de los siguientes valores: $\pm 1/200$ del valor especificado, o un porcentaje, del valor especificado, igual a 1/10 de la tensión de cortocircuito real, a la intensidad nominal, expresada en tanto por ciento.
3. Tensión de cortocircuito. a) Para la toma principal (tensión de cortocircuito a intensidad nominal). i) Transformador con dos arrollamientos. ii) Transformador con más de dos arrollamientos. b) Para las restantes tomas.	$\pm 1/10$ de la tensión de cortocircuito especificada para tal toma. (Véase original). (Véase original).
4. Corriente de vacío.	+ 3/10 de la corriente de vacío especificada.

APÉNDICE XII

CLASES DE PRECISIÓN EN TRANSFORMADORES DE MEDIDA. CONSUMOS DE LOS APARATOS ALIMENTADOS. USOS SEGÚN CLASES DE PRECISIÓN.

§ Ap. XII-1. Gráficos de errores límite de los transformadores de corriente para medida.

A partir de los valores de la tabla del § VI-7.1, con los límites de error admisibles, para cada clase de precisión puede trazarse una gráfica de líneas quebradas de errores límites. Las curvas de errores reales de un transformador deberán quedar comprendidas entre las dos líneas quebradas.

En la figura ap. XII,1 se representa el caso correspondiente a la clase de precisión 0,5.

§ Ap. XII-2. Consumos de las bobinas amperimétricas de los aparatos alimentados.

La potencia aparente (VA) necesaria (consumo) para alimentar un aparato a la intensidad nominal (5 A), depende del tipo y de la forma constructiva. Los valores que seguidamente se proporcionan son a título de orientación. Pueden utilizarse, con buen sentido, cuando no se posean otros más precisos. Se refieren a aparatos convencionales basados en dispositivos magnéticos o electromagnéticos (p. ej., relés de inducción). Los aparatos de medida y relés de tipo electrónico suelen tener consumos considerablemente más reducidos.

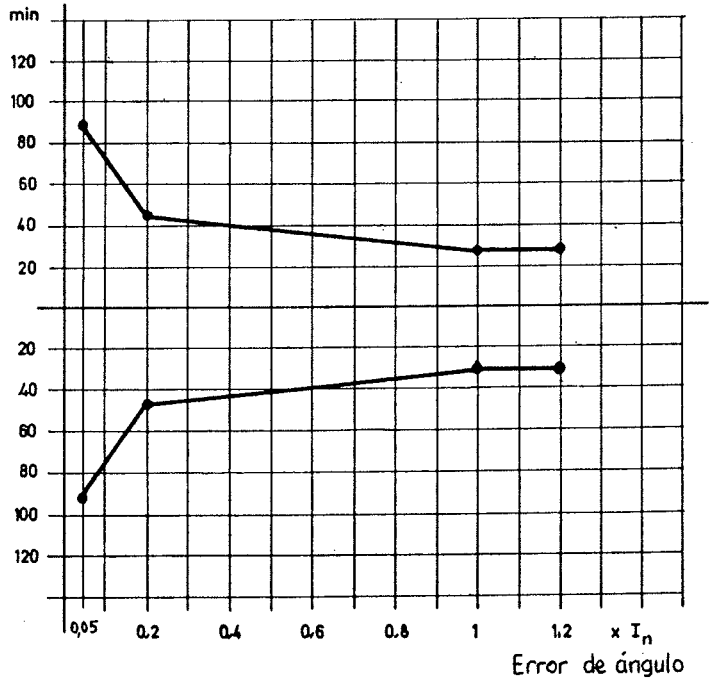
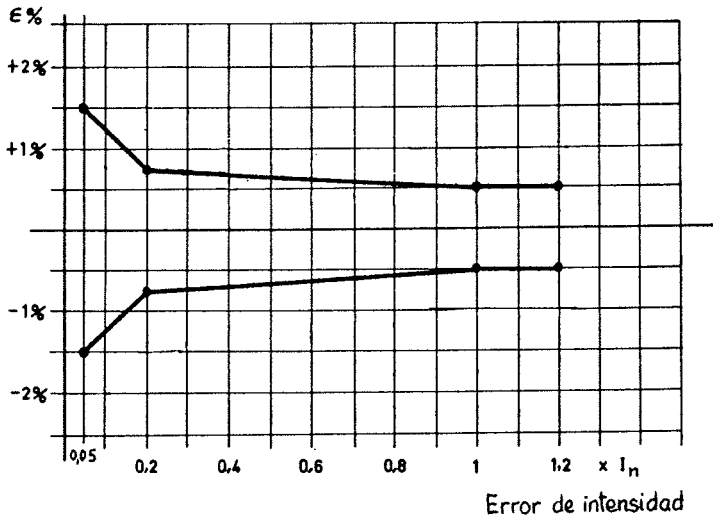


Fig. ap. XII,1

Consumos, en VA, de bobinas amperimétricas más usuales

Aparato o instrumento	Consumos
Amperímetros indicadores	1...2
Amperímetros registradores	2...5
Amperímetros de precisión	0,2..0,5
Vatímetros indicadores	2...4
Vatímetros registradores	2...8
Vatímetros de precisión	1...2
Contadores de potencias activa o reactiva	1...1,5
Fasímetros indicadores	5...15
Fasímetros registradores	8...20
Relés de máxima intensidad, instantáneos	2...10
Relés de máxima intensidad, retardo independiente	3...20
Relés de máxima intensidad térmicos	3...7
Relés temporizables	2...5
Relés diferenciales	2...10
Relés de distancia	5...20
Otros reguladores100

Al existir varias bobinas amperimétricas en serie, es práctica corriente sumar aritméticamente los consumos correspondientes (véase § VI-6.2).

No debe olvidarse que los conductores, de unión entre bornes secundarios del transformador y aparatos alimentados, tienen su propio consumo en VA, que habrá que agregar a los anteriores. Aun cuando el cálculo es elemental (RI_{sn}^2 , se supone nula la inductancia), para mayor comodidad se dan los correspondientes a conductores de cobre.

*Consumos, en VA, por metro de conductor de cobre
(longitud a considerar ida más retorno)*

Sección (mm ²)	Consumo en VA por m de conductor	
	$I_{sn} = 5 \text{ A}$	$I_{sn} = 1 \text{ A}$
2,5	0,18	0,007
4	0,11	0,0044
6	0,07	0,0029
10	0,044	0,00175

Cuando la longitud total de los conductores es grande, es recomendable emplear $I_{sn} = 1 \text{ A}$ (véase el primer ejemplo del § VI-2).

§ Ap. XII-3. Usos de los transformadores de corriente, según clases de precisión.

Transformadores para medida

Aun cuando las circunstancias de cada caso han de determinar, cabe facilitar la siguiente orientación práctica:

<i>Clase de precisión</i>	<i>Usos más generalizados</i>
0,1	Mediciones de precisión (laboratorio). (En ocasiones, se exigen precisiones mayores).
0,2	Contadores de precisión. En especial contadores para grandes potencias (elevadas tensiones). Casos en que son de prever factores de potencia bajos (necesidad de reducir errores de ángulo, véase el ejemplo en § VI-6.2). Mediciones de laboratorio. Patrones portátiles.
0,5	Contadores normales. Aparatos de medida, y reguladores, sensibles.
1	Amperímetros, vatímetros y fasímetros. Contadores industriales.

Transformadores para protección

A título orientativo:

<u><i>Clase de precisión</i></u>	<u><i>Usos más generalizados</i></u>
5 P	Relés diferenciales, de distancia, direccionales, de contacto a tierra y otros de cierta precisión. En general todos aquéllos a los que afecte el error de ángulo.
10 P	Relés ordinarios de protección y otros. En general aquéllos a los que no afecte el error de ángulo.

§ Ap. XII-4. Clases de precisión para transformadores de tensión para medida y para los de protección.

Análogamente a los transformadores de corriente (§ VI-6.2), las normas *UNE 21-088-81 (2)* y *CEI 186*, distinguen entre transformadores de tensión para medida y transformadores de tensión para protección.

En los *transformadores de tensión para medida*, las clases de precisión normales son:

$$0,1 — 0,2 — 0,5 — 1,0 — 3,0$$

El error de tensión y el error de fase a la frecuencia nominal no deben sobrepasar los valores de la tabla que sigue, a cualquier tensión comprendida entre el 80 % y el 120 % de la tensión nominal y para cualquier carga comprendida entre el 25 % y el 100 % de la carga de precisión, con un factor de potencia de 0,8 inductivo.

Los errores deben determinarse en los bornes del transformador, comprendiendo los efectos de los elementos de protección que formen parte del mismo (por ejemplo fusibles secundarios o interruptores magnetotérmicos de protección).

Límites del error de tensión y del error de fase

Clase de precisión	Error de tensión en % ±	Error de fase ± minutos
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1,0	1,0	40
3,0	3,0	—

Obsérvese que, a efectos de límites de error, en transformadores de tensión para medida no se consideran factores de tensión nominal (que seguidamente se definen) superiores a 1,2. En cambio, para transformadores de tensión para protecciones este factor juega un papel más amplio.

Hay que precisar que según *UNE 21-088-81 (2)* y *CEI 186* el *factor de tensión nominal* se define como aquél por el que hay que multiplicar la tensión primaria nominal para obtener la tensión máxima para la cual el transformador ha de cumplir aún con las prescripciones de calentamiento y de precisión correspondientes.

Los valores normales del *factor de tensión nominal* son

$$1,2 — 1,5 — 1,9$$

Este factor de tensión está determinado por la tensión máxima de funcionamiento, la cual depende a su vez de la red y de las condiciones de puesta a tierra del arrollamiento primario del transformador.

Los valores normales del factor de tensión nominal apropiado en las diferentes condiciones de puesta a tierra de la red se indican a continuación,

simultáneamente con la duración admisible de la tensión máxima de funcionamiento (es decir, duración nominal).

Valores normales del factor de tensión nominal

Factor de tensión nominal	Duración nominal	Modo de conexión del arrollamiento primario y condiciones de puesta a tierra de la red
1,2	Continua	Entre fases de una red cualquiera. Entre el punto neutro de los transformadores en estrella y tierra, en una red cualquiera.
1,2	Continua	Entre fase y tierra, en una red con neutro efectivamente puesto a tierra.
1,5	30 s	
1,2	Continua	Entre fase y tierra, en una red con neutro no efectivamente puesto a tierra, con eliminación automática del defecto a tierra.
1,9	30 s	
1,2	Continua	Entre fase y tierra en una red con neutro aislado sin eliminación automática del defecto a tierra, o en una red con neutro puesto a tierra a través de bobina de extinción sin eliminación automática del defecto a tierra.
1,9	8 h	

NOTA. — Son admisibles duraciones nominales inferiores previo acuerdo entre el constructor y el usuario.

Clases de precisión y límites de error en los transformadores de tensión para protección

La clase de precisión de un transformador de tensión para protección se caracteriza por un número *índice de clase* igual al límite admisible del error de tensión, expresado en tanto por ciento, entre el 5 % de la tensión nominal y el valor de la tensión correspondiente al factor de tensión nominal y con la carga de precisión. Esta expresión viene seguida de la letra *P*.

Las clases de precisión normales de los transformadores de tensión para protección son *3P* y *6P* y se aplican usualmente los mismos límites de error de tensión y de error de fase, tanto al 5 % de la tensión nominal como a la tensión correspondiente al factor de tensión nominal.

Al 2 % de la tensión nominal, los límites de los errores admisibles son el doble de los especificados para el 5 % de la tensión nominal.

El error de tensión y el error de fase a la frecuencia nominal no deben sobrepasar los valores de la tabla que sigue al 5 % del valor nominal de la tensión y al producto del valor nominal por el factor de tensión nominal (1,2; 1,5 ó 1,9) y para cualquier carga comprendida entre el 25 % y el 100 % de la carga de precisión con un factor de potencia de 0,8 inductivo.

Al 2 % de la tensión nominal, los límites del error de tensión y del error de fase, para cualquier carga comprendida entre el 25 % y el 100 % de la carga de precisión con un factor de potencia de 0,8 inductivo, serán el doble de los indicados en la tabla.

Límites del error de tensión y del error de fase

Clase de precisión	Error de tensión en % ±	Error de fase ± minutos
3P	3,0	120
6P	6,0	240

Además, los transformadores de tensión para protección, en el margen entre 80 % y 120 % de la tensión nominal y para cargas entre el 25 % y el 100 % de la carga de precisión (con el factor de potencia 0,8 ind.), también deben cumplir con los límites de error establecidos para los transformadores de tensión para medida según la tabla correspondiente (primera de este §). Por lo tanto, en este margen de tensiones, los transformadores de tensión para protección han de responder como para medida, luego deben tener asignada una clase de precisión de entre las normales para transformadores de tensión para medida (0,1-0,2-0,5-1,0-3,0).

Valores normales de las potencias de precisión en transformadores de tensión, en VA y para $\cos \varphi = 0,8$ inductivo, son

10, (15), 25, (30), 50, (75), 100, (150), 200, (300), (400) y 500

Son preferentes los valores que no están entre paréntesis.

§ Ap. XII-5. Consumo de las bobinas voltimétricas de los aparatos alimentados.

Se trata de valores de orientación, para aparatos convencionales de los tipos magnético o electromagnético (por ejemplo de inducción). Los relés y aparatos de medida electrónicos suelen tener consumos considerablemente menores.

Consumos, en VA, de las bobinas voltimétricas más usuales

Aparatos o instrumentos	Consumos (por fase)
Voltímetros indicadores	3...10
Voltímetros registradores	0,3...20
Vatímetros indicadores	0,3...10
Vatímetros registradores	1...15
Contadores de energía activa y reactiva	2,5...5
Fasímetros	1...15
Frecuencímetros	1...10
Sincronoscopios	5...20
Voltímetros de nulo	5...30
Relés de mínima tensión	5...15
Relés de máxima tensión	5...15
Relés direccionales	5...30
Relés de contacto a tierra	10...30
Relés de distancia	10...30
Reguladores	30...70

Al existir varias bobinas voltimétricas, alimentadas por el mismo secundario, los consumos en VA se acostumbran a sumar aritméticamente, aun cuando la adición debería efectuarse vectorialmente (potencias complejas).

§ Ap. XII-6. Usos de las clases de precisión.

Solamente las circunstancias concretas de cada caso son determinantes. No obstante, puede facilitarse una orientación:

Clase de precisión

Usos más generalizados

- | | |
|-----|---|
| 0,1 | Mediciones de precisión (laboratorio). (En ocasiones, se exigen mayores precisiones). |
| 0,2 | Contadores de precisión, especialmente cuando se trata de grandes potencias (elevadas tensiones) y pueden presentarse factores de potencia bajos. Mediciones de laboratorio. Patrones portátiles. |

- 0,5 Contadores normales. Aparatos de medida y reguladores sensibles.
- 1 Voltímetros, vatímetros y fasímetros de cuadro. Contadores industriales. Reguladores ordinarios.
- 3 Aparatos con gran consumo, sin grandes requerimientos. Aparatos de poca precisión, o a los que no afecte el valor concreto de la tensión. Casos en los que no importan los errores de ángulo.
- 3P Relés que exigen cierta precisión y no excesivo error de ángulo (direccionales y de distancia).
- 6P Relés de sobretensión o de mínima tensión, sin requerimientos especiales en cuanto a error de ángulo.

Tensión de perforación¹ valor medio mínimo 60 kV
(rigidez dieléctrica \approx 240 kV/cm)

Factor de pérdidas (a 90 °C) $\text{tg } \delta$, valor máximo 4.10^{-3}

§ Ap. XIII-5. Características del aceite en servicio. Control.

El aceite debe controlarse normalmente, y especialmente después de anomalías o tras períodos de fuera de servicio del transformador.

La práctica demuestra que un control simplificado suele ser suficiente, a base de la *tensión de perforación* y del *índice de neutralización*², puede agregarse, si se dispone de equipo adecuado, el *factor de pérdidas*.

Se llama la atención sobre el hecho de que la extracción de muestra del aceite es una operación delicada. Si no se realiza cuidadosamente, los resultados son, frecuentemente, inexactos.

Según las recomendaciones *VDE 0370/10.66*, los

Valores mínimos admisibles para aceites en servicio son:

Tensiones de perforación

Transformadores de las series:

hasta 110 kV 30 kV *VDE* (rig. die. \approx 120 kV/cm)

110 hasta 220 kV 40 kV *VDE* (rig. die. \approx 160 kV/cm)

220 hasta 440 kV 45 kV *VDE* (rig. die. \approx 180 kV/cm)

Índice de neutralización

No superior a 0,6 mg KOH/g aceite

Parece oportuno añadir el siguiente cuadro³

¹ La tensión de perforación se entiende realizada según prescripciones *VDE 0370/10.66 § 13*, con distancia entre electrodos de 2,5 mm. Aun cuando no rigurosa, se puede aceptar una correspondencia lineal, con factor 4, entre estas tensiones de perforación (*VDE*) y las rigideces dieléctricas.

Anteriormente, las prescripciones *VDE* empleaban una separación de 1 mm, con el inconveniente de no ser lineal la correspondencia indicada.

² mg de KOH precisos para neutralizar un gramo de aceite.

³ *Ölbuch*, publicación de la *VDEW*.

Períodos recomendados para el control de aceites

6 meses	12 meses	2 años	3-5 años
En transformadores cuya revisión anterior hubiese dado valores cercaos a los límites	En traf. ≥ 110 kV > 1 MVA	En traf. 20-110 kV < 1 MVA	En traf. < 20 kV < 1 MVA

APÉNDICE XIV

VENTILACIÓN DE CELDAS PARA TRANSFORMADORES

§ Ap. XIV-1. Importancia de la previsión. Datos básicos.

Hay que dejar establecido que, en la instalación de transformadores en interiores, las celdas han de tener aberturas suficientes para la entrada y salida del aire. No parece ocioso insistir en que, entre los no especialistas, es error frecuente admitir que contando, de entrada, con una temperatura conveniente del medio ambiente de refrigeración (aire) se cumplen las condiciones para el correcto funcionamiento del transformador en su aspecto térmico. Cuando el libre movimiento del aire está algo obstaculizado (transformadores instalados en celdas) puede temerse que la afluencia sea inferior a la necesaria. Si la ventilación de las celdas es natural, ha de preverse adecuado dimensionamiento del trayecto de aire, en particular de las aberturas. Resumiendo: se necesita determinada cantidad de aire a una temperatura no superior a la prevista.

La inobservancia frecuente de lo expuesto explica, en bastantes casos, la aparición de temperaturas anormales en el transformador. Conviene recordar la regla según la cual cada 8° C de sobrecalentamiento de larga duración reduce a su mitad la vida normal de un transformador.

Queda de manifiesto el interés del tema, es especialmente importante la previsión al tratarse de celdas subterráneas, en cuyo caso para la aportación del caudal de aire calculado puede resultar indispensable un extractor.

Se recuerda (véase el cuadro III del Ap. II-1) que en los transformadores refrigerados por aire la máxima temperatura de este ha de ser 40° C, contando con una media diaria de 30° C (y una anual de 20° C). En las condiciones ordinarias que suelen ofrecerse en amplias zonas de España, parece oportuno contar con una temperatura media diaria $t_1 = 25^\circ \text{C}$, y aun algo menor si se toman las debidas precauciones¹. Cuando no puedan observarse

¹ En Alemania es frecuente adoptar $t_1 = 20^\circ \text{C}$, valor tampoco inadecuado en muchas zonas de España. Esto pone de relieve el interés en la elección de la toma de aire. La abertura del canal de entrada (véase figura Ap. XIV,1) se proyectará, con preferencia, orientada al norte. Se evitarán tomas de aire en patios estancados que pueden caldearse anormalmente con las insolaciones de verano.

tales precauciones, o en circunstancias adversas, puede adoptarse $t_1 = 28^\circ \text{C} \div \div 30^\circ \text{C}$.

Para la refrigeración normalmente se dispondrá de un salto de temperatura $t_2 - t_1 = 15^\circ \text{C}$ (en condiciones adversas 12°C , favorables 20°C).

§ Ap. XIV-2. Cálculo de la ventilación necesaria.

La previsión de la ventilación comporta dos problemas:

- determinación del caudal de aire necesario;
- establecimiento del medio adecuado de aportación del caudal.

El primer problema es de planteo elemental, y su solución por métodos aproximados suficiente:

potencia máxima que hay que disipar $= P_{cc} + P_{vacío}$ (kW);
 energía que absorbe 1 m^3 de aire por grado de aumento de temperatura (a 35°C y 760 milímetros Hg) $= 1,16$ (kJ/m³/°C);
 caudal de aire necesario con calentamiento $t_2 - t_1$,

$$V = \frac{P_v + P_{cc}}{1,16 (t_2 - t_1)} \text{ (m}^3/\text{s)} = \frac{P_v + P_{cc}}{69,6 (t_2 - t_1)} \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Si se admite un calentamiento $t_2 - t_1 = 15^\circ \text{C}$, el caudal de aire necesario para disipar 1 kW en pérdidas es

$$\frac{1}{1,16 \cdot 15} = 0,0575 \text{ m}^3/\text{s} \approx 3,5 \text{ m}^3/\text{min}/\text{kW}$$

Con circunstancias adversas, $t_2 - t_1 = 12^\circ \text{C}$, resultan $\approx 4,4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{kW}$.

El segundo problema se plantea a base de establecer un tiro natural. Se trata de un clásico problema de la fluidodinámica. Si la velocidad de salida (en chimenea, véase figura) es v_2 , la sección necesaria ha de ser

$$s_2 \text{ (sección libre)} = \frac{V}{v_2} \text{ m}^2$$

En virtud de que el aire fresco de entrada ocupa menor volumen, se puede proyectar

$$s_1 = 0,92 s_2$$

Dada la relativa similitud en los diseños de las celdas para transformadores, que se suponen del modelo de la figura 1, se puede proceder, simplemente, determinando la velocidad de salida v_2 , en función de la altura h , definida en la figura Ap. I, 1, utilizando la tabla I, referida a $t_2 - t_1 = 20^\circ \text{C}$.

TABLA I

 $(t_2 - t_1 = 20^\circ \text{C})$

Altura de tiro h (m)	Velocidad de salida v_2 (m/s)	Altura de tiro h (m)	Velocidad de salida v_2 (m/s)
3	0,81	12	1,66
4	0,94	14	1,79
5	1,07	16	1,90
6	1,18	18	2,—
7	1,28	20	2,15
8	1,35	22	2,25
9	1,44	24	2,34
10	1,51	26	2,44

El método expuesto proporciona un caudal sobrado ya que no tiene presente la disipación de calor que proporcionan las paredes de la celda. Esta disipación es particularmente importante tratándose de celdas metálicas, lo que permite reducir algo la ventilación. La evaluación de las pérdidas eliminadas por tal medio se consigue por

$$P_p = kS(t_i - t_1)$$

P_p = pérdidas eliminadas por las paredes (kW)

S = superficie de refrigeración (m^2)

t_i = temperatura interna = $(t_2 - t_1)/2$ ($^\circ \text{C}$)

t_1 = temperatura ambiente externa ($^\circ \text{C}$)

k = conductividad térmica ($\text{kW}/\text{m}^2/^\circ \text{C}$):

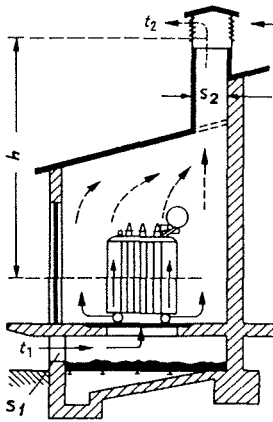
muros de obra y techos, $k = 0,002$

paredes metálicas, $k = 0,005$

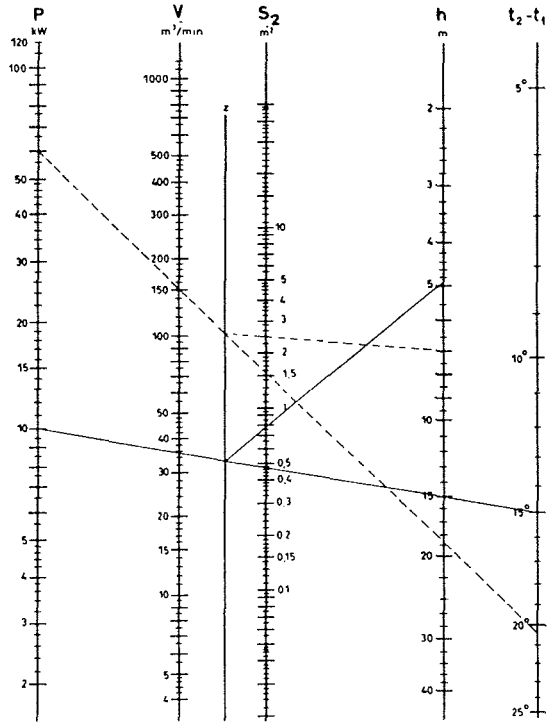
Si se trata de una estación intemperie, es aconsejable prescindir de la superficie de una de las paredes (medio día) y del techo.

¹ Si hubiese que prever largos conductos con codos o cambios de dirección y obstáculos anormales, habría que recurrir a un cálculo usual en fluidodinámica.

NOMOGRAMA PARA EL PROYECTO DE LA VENTILACIÓN



(a)



(b)

→ Aire entrante (fresco)

----> Aire de salida (caliente)

s_1 , Sección de abertura de entrada (m^2)

s_2 , sección de chimenea (m^2)

t_1 , temperatura de aire de entrada ($^{\circ}C$)

t_2 , temperatura de aire de salida ($^{\circ}C$)

h , altura calculística de tiro (altura media del transformador a altura media de abertura de salida de aire) (m)

P , pérdidas totales a disipar (kW)

V , caudal de aire (m^3/min)

z , línea auxiliar

Fig. Ap. XIV,1

Con tal corrección, el caudal de aire necesario es

$$V = \frac{P_v + P_{cc} - P_p}{1,16 (t_2 - t_1)} \text{ (m}^3/\text{s)} = \frac{P}{69,6 (t_2 - t_1)} \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Más cómodo y preciso resulta el cálculo empleando el nomograma de la figura Ap. XIV,1b, debido a la gentileza de AEG — Telefunken.

Algunos ejemplos aclararán su empleo¹.

Ejemplo 1.

Las pérdidas, a plena carga, menos las disipadas por las paredes son $P = 10$ kW;

$$h = 5 \text{ m};$$

$$t_2 - t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Interesan V y s_2 .

Solución.

Únase $P = 10$ con $t_2 - t_1 = 15$, la intersección con V proporciona $V = 35$ (m³/min).

Únase la intersección en z con $h = 5$, la correspondiente intersección da $s_2 = 0,78$ m², $s_1 = 0,92$ m².

Ejemplo 2.

Un transformador $S_a = 2,5$ MVA, $P_{cc} + P_v = 37$ kW resulta insuficiente. Se sustituye por otro $S_a = 5$ MVA, $P = 60$ kW, que puede situarse en la celda.

Datos: $P = 60$ kW, $h = 7$ m, $s_2 = 2,4$ m².

Interesa $t_2 - t_1$.

Solución.

Únase $h = 7$ con $s_2 = 2,4$ y prolonguese hasta z . Únase el punto de corte en z con $P = 60$, prolongando se tiene $t_2 - t_1 = 21$ °C.

Ap. XIV-3. Complementos útiles en el proyecto de ventilaciones.

1.º Si la presión barométrica (p_b , bar) es inferior a 1013 bar (760 mm Hg), el volumen de aire se tendrá que aumentar

$$V' = V \frac{P_b}{1013}$$

¹ AEG - Hilfbuch 2.

Deberá tomarse especialmente en consideración tratándose de celdas o E. T. instaladas a cierta altura sobre el nivel del mar. En tal caso tampoco debe olvidarse prever mayores caminos de fuga (mayores tensiones de prueba en fábrica).

2.º Las secciones s_2 y s_1 se entenderán superficies libres. Si se disponen persianas o rejas habrá que añadir los suplementos correspondientes en superficie.

3.º La abertura debajo del transformador (véase figura Ap. XIV, 1a) no ha de ser mayor que la proyección sobre ella de la planta del transformador, a fin de que el aire se deslice directamente por la superficie de las ondas, tubos o radiadores.

4.º Cuando las secciones resultantes o la altura de la chimenea parezcan excesivas, se proyectará a base de forzar la ventilación mediante un extractor previsto para el caudal calculado, y la presión manométrica resultante de la circulación del aire a las velocidades que correspondan.

5.º Si fuese preciso contar con funcionamiento continuado del transformador a plena carga, es oportuno prever un 20 % más de caudal que el calculado. Se han supuesto temperaturas $t_1 = 20 \div 30$ °C, pero cabe la persistencia, en unas horas, de otras superiores (§ VDE 0532 § 40 acepta hasta un máximo de 40 °C, no permanentes).

APÉNDICE XV

CAÍDAS DE TENSIÓN EN LOS TRANSFORMADORES

Ap. XV-1. General.

El cálculo de la caída de tensión* en un transformador está desarrollado en el § II-11.1. El valor relativo obtenido parte del supuesto teórico de que el transformador se alimente precisamente con su tensión nominal. En la práctica, frecuentemente no es así. Además, los transformadores suelen disponer de varias tomas (§ IV-4), o sea que pueden adoptar diversas relaciones de transformación, precisamente para disponer de flexibilidad con el fin de proporcionar al usuario (o en un punto del sistema) la tensión más conveniente. Al final del § IV-4.2 hay un ejemplo que ilustra sobre los tanteos que hay que practicar para determinar las tomas más convenientes, partiendo de los condicionamientos que la explotación del sistema imponga. En tal ejemplo, y con el fin de que la problemática y la resolución resulten más claras, se procede en términos meramente aproximados.

Ap. XV-2. Diversidad de impedancias de cortocircuito según las tomas.

Hay otra circunstancia. Las resistencias y reactancias R_{cc} y X_{cc} ($\epsilon_{R_{cc}}$ y $\epsilon_{X_{cc}}$) de un transformador lógicamente no son iguales para las diversas tomas (ya que implican diversos números de espiras), lo que hay que tener presente en los tanteos a que se aludió, si se requiere cierta precisión.

Un ejemplo real lo constituye un transformador trifásico de 40 MVA, 151,8 — 138 — 124,2/6,6 kV.

* Definición en el caso general,

$$\Delta U_2 = U_{2 \text{ vacío}} - U_{2 \text{ carga}}$$

Resistencias por fase a 27° C, en corriente continua:

	kV	Ω
AT	151,8	1,47
	138	1,4
	124,2	1,27
BT	6,6	0,0075

Tensiones relativas de cortocircuito por fase (ϵ_{cc}):

kV	$\epsilon_{cc} \%$	Z_{cc1} (ref. a primario) Ω
151,8	8,12	46,8
138	7	33,3
124,2	7,58	29,2

Como puede verse, las discrepancias son sensibles.

Ap. XV-3. Expresión de la caída de tensión unitaria.

Lo que precede invita a establecer una expresión práctica de la caída, partiendo del supuesto de que el transformador no trabaje alimentado con la tensión nominal.

La terminología que se emplea es la siguiente:

U_{1n} = tensión nominal primaria; U_1 = tensión real p.

U_{2n} = tensión nominal secundaria; U_2 = tensión real s.

$$\begin{array}{l}
 u_1 = \text{tensión relativa o unitaria p.} = \frac{U_1}{U_{1n}} \\
 u_2 = \text{tensión relativa o unitaria s.} = \frac{U_2}{U_{2n}}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \text{complejas} \\
 \text{relativas}
 \end{array} \right\}
 \begin{array}{l}
 \underline{u}_1 = \frac{U_1}{U_{1n}} \\
 \underline{u}_2 = \frac{U_2}{U_{2n}}
 \end{array}$$

$$\underline{c} = \text{índice complejo de carga} = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}}; \quad \underline{c} = C(\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2)$$

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{cc1} &= \text{impedancia de cortocircuito reducida al primario} = \\
 &= (R_1 + R_2 r_t^2) + j(X_{d11} + X_{d12} r_t^2)
 \end{aligned}$$

(se entenderá $r_t = U_{1n}/U_{2n}$, aunque fuera $U_{1n} < U_{2n}$)

En la práctica, para estos cálculos se prescinde de la corriente de excitación o de vacío (I_0), dado su reducido valor (§ II-1.3) en comparación con las corrientes puestas en juego en el transformador en carga. Su consideración

implicaría conocer las componentes X_{d1} , X_{d2} , R_1 y R_2 , lo que no es corriente. Además, habría que calcular a base del diagrama de la figura II-4,1b, lo que no sería práctico.

Se razona sobre el esquema equivalente de relación de transformación r_t (§ II-6). Se representa en la figura Ap. XV,1a con validez para transformadores monofásicos o para una columna de un transformador trifásico.

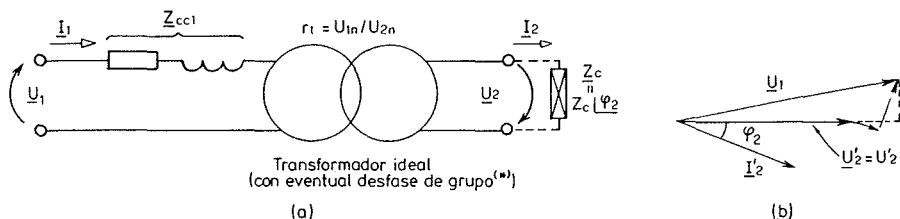


Fig. ap. XV,1

La relación entre tensiones e intensidades es

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \frac{U_{1n}}{U_{2n}} + Z_{cc1} I_1^{**}$$

$$\frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{U_2}{U_{2n}} + \frac{Z_{cc1} I_{1n}}{U_{1n}} \frac{I_1}{I_{1n}}$$

Empleando valores relativos unitarios,

$$\underline{u}_1 = \underline{u}_2 + \underline{\varepsilon}_{cc} \underline{c} \quad (\underline{\varepsilon}_{cc} = \varepsilon_{Rcc} + j \varepsilon_{Xcc})$$

Adóptese como referencia de fases la tensión secundaria $\underline{U}_2 = U_2 + j0$ (figura Ap XV,1b), luego $u_2 = u_2 + j0$. El índice de carga complejo es $c = C (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2)^{***}$. Resultan:

* Véase la nota que sigue.

** Tratándose de transformadores trifásicos, este desfase entre \underline{U}_1 y \underline{U}_2 es correcto, en el supuesto de que se trate de un transformador del grupo 0 (cuadro en el § III-7.8, o bien del apéndice IV). En los restantes casos, el razonamiento que sigue continua siendo válido pero agregando al desfase que proporcionan las expresiones el propio del grupo de que se trate.

*** $C = I_2/I_{2n}$. El signo negativo, en la expresión, procede de que el ángulo φ_2 indica atraso, es decir, valores positivos de φ_2 corresponden a cargas inductivas, corrientes en atraso.

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \frac{u_1 = u_2 + (\epsilon_{Rcc} + j \epsilon_{Xcc}) C (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2)}{|u_1|} = \\
 &= \sqrt{[u_2 + C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2)]^2 + C^2 (\epsilon_{Xcc} \cos \varphi_2 - \epsilon_{Rcc} \sin \varphi_2)^2}
 \end{aligned}$$

Expresión exacta, salvo el hecho de haberse despreciado la corriente de excitación.

Si se admite confundir U_1 con la proyección de \underline{U}_1 sobre \underline{U}_2 (figura Ap. XV,1b), resulta la expresión simplificada

$$u_1 \approx \text{Re} [u_1] = u_2 + C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2)$$

Pasando a valores absolutos:

Expresión exacta ($I_0 \approx 0$)

$$U_1 = \sqrt{[(U_2 r_t + U_{1n} C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2)]^2 + U_{1n}^2 C^2 (\epsilon_{Xcc} \cos \varphi_2 - \epsilon_{Rcc} \sin \varphi_2)^2}$$

Expresión aproximada

$$U_1 = U_2 r_t + U_{1n} C (\epsilon_{Rcc} \cos \varphi_2 + \epsilon_{Xcc} \sin \varphi_2)$$

Si, como en el ejemplo del § IV-4.2, se realizan diversos cálculos, correspondientes a distintas cargas empleando diversas tomas, a los efectos de aplicación de las fórmulas halladas en cada caso se considerarán como tensiones nominales las de las tomas.

APÉNDICE XVI

ESQUEMA EQUIVALENTE: CÁLCULO DE VALORES

Ap. XVI. Valores característicos en el esquema equivalente al transformador.

Interesa calcular los valores característicos del esquema equivalente al transformador, según la figura II-5,1.

Se partirá de los datos procedentes de los ensayos en vacío y en cortocircuito, que se representan como sigue.

	Valores	
	absolutos	relativos
Ensayo en vacío:		
pérdidas en el hierro	$P_{Fe} = P_0$	$p_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{S_n} 100$
corriente de excitación	I_0	$i_0 = \frac{I_0}{I_n} 100$
Ensayo en cortocircuito:		
pérdidas en el cobre	$P_{Cu} = P_{cc}$	$p_{Cu} = \frac{P_{Cu}}{S_n} 100$
tensión de cortocircuito	U_{cc}	$\varepsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_n} 100$

A los efectos prácticos suele admitirse: $R_1 \approx R_2$ y $X_{di1} \approx X'_{di2}$. Razonando a base del transformador monofásico, resultan:

$$R_{cc} = 2R_1 = 2 \frac{R_2}{r_1^2} \approx \frac{P_{Cu}}{I_{Fe}^2} = \frac{p_{Cu} U_{21n}^2}{100 S_n}$$

$$X_{cc} = 2 X_{di1} = 2 \frac{X_{di2}}{r_t^2} \approx \frac{U_{cc}}{I_{1n}} = \frac{\epsilon_{cc} U_{21n}^2}{100 S_n}$$

Elementos en derivación.

$$R_{Fe} \approx \frac{P_{Fe}}{I_{Fe}^2} = \frac{100 U_{21n}^2}{P_{Fe} S_n}$$

$$X_{\mu} \approx \frac{U_{1n}}{I_{\mu}} = \frac{U_{1n}}{I_0 \sin \varphi_{cc}} = \frac{100}{i_0} \frac{U_{21n}^2}{S_n} \frac{1}{\sin \varphi_{cc}} \approx \frac{100}{i_0} \frac{U_{21n}^2}{S_n}$$

Empleando U_{1n} , los valores resultantes están referidos al primario, con U_{2n} resultan valores reducidos al secundario.

Las expresiones finales, en valores porcentuales, son válidas tanto para transformadores monofásicos como trifásicos, expresando U_{1n} en tensiones compuestas.

APÉNDICE XVII

TRANSFORMADORES DE FRECUENCIA VARIABLE. TRANSFORMADORES DE ADAPTACIÓN

§ Ap. XVII-1. Transformadores de frecuencia variable.

§ Ap. XVII-1.1. GENERALIDADES.

Hasta aquí se han considerado transformadores funcionando con frecuencias y tensiones primarias relativamente constantes. Es el caso de los transformadores de potencia y de los transformadores de tensión (§ VI-12). En la técnica de las comunicaciones se utilizan transformadores previstos para funcionar con diversas tensiones y frecuencias, dentro de ciertos márgenes, que pueden ser amplios.

Más aun, el transformador ha de trabajar, a menudo, simultáneamente, a base de varias (infinitas) frecuencias. Imagínese el transformador intermediario entre la tensión primaria, proporcionada por un micrófono, y una carga de un sistema de comunicación. La tensión primaria no es ni siquiera periódica. Es sabido que una función física puede considerarse resultado de la superposición de ondas senoidales de diversa frecuencia¹.

Como sea que las características internas de un transformador dependen de la frecuencia (considérense, provisionalmente, los esquemas equivalentes de la figura II-6,3), su comportamiento no será idéntico para las distintas ondas senoidales del espectro. En definitiva, en la transformación originarán distorsiones de mayor o menor consideración.

¹ Véase *Análisis de Fourier y Cálculo operacional aplicados a la Electrotecnia*, del mismo autor. Si la función (onda) es periódica, se puede descomponer en un número finito, o infinito de armónicas con frecuencias múltiples enteros de la onda fundamental (§ I-2). Si la función no es periódica, puede descomponerse en infinitas ondas senoidales de frecuencias arbitrarias, y amplitudes infinitamente pequeñas (§ II-2). En el primer caso se dice que la función posee un espectro discreto, en el segundo un espectro continuo.

Interesa conocer el comportamiento del transformador a las diversas frecuencias.

Ante todo, hay que reconsiderar el esquema equivalente al transformador. No se olvide, en efecto, que los estudiados (§ II-5 y § II-6) lo fueron contando con frecuencias del orden de los 50-60 Hz. En la técnica de las comunicaciones se emplean desde frecuencias bajas hasta otras muy elevadas.

§ Ap. XVII-1.2. ESQUEMAS EQUIVALENTES A LOS TRANSFORMADORES.

Recuérdese que una bobina real puede representarse, aproximadamente, de acuerdo con el esquema de la figura Ap. XVII-1,1. En efecto, entre espiras se ofrecen capacidades que, en forma simplificada, se han representado

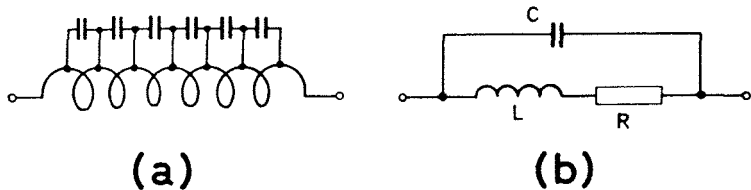


Fig. Ap. XVII-1,1

en (a). Además, el conductor necesario para crear una L tiene resistencia R . En (b) se da un esquema, a base de características localizadas, meramente aproximado¹.

Con estos antecedentes, se dibujará un esquema equivalente al transformador (figura Ap. XVII-1,2a), más utilizable, tratándose de frecuencias elevadas, que los ya conocidos. No obstante sigue siendo el resultado de simplificaciones conceptuales.

Aun cuando no necesita aclaraciones, parece oportuno indicar:

R_1, R_2 resistencias primaria y secundaria.

L_1, L_2 inductancias de p. y s.

¹ A poco que se analice, se advierten imperfecciones. La bobina puede tener núcleo ferromagnético que será asiento de pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas. Incluso sin materiales ferromagnéticos, la presencia de masas conductoras origina pérdidas por corrientes parásitas. La existencia de materiales ferromagnéticos puede ser motivo de que L no sea lineal. Con frecuencias elevadas se acusa el efecto "skin" (variabilidad de R).

No obstante lo dicho, se usará el esquema (b), por su simplicidad, y se supondrá que sus elementos constituyentes son constantes, dentro del campo de utilización (frecuencias e intensidades).

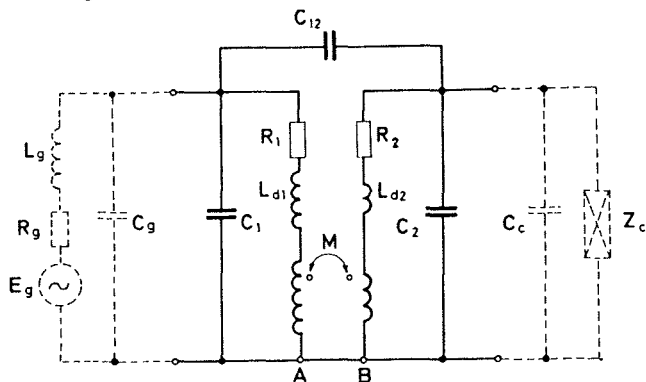
M inductancia mutua entre p. y s.

C_1 y C_2 capacidades paralelo p. y s.

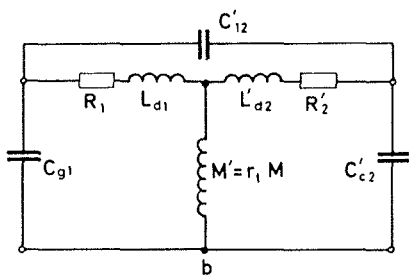
C_{12} capacidad entre p. y s.

Se admitirá que todas las características son lineales. De no ser así, el transformador, en su conversión u_1/u_2 , distorsionaría.

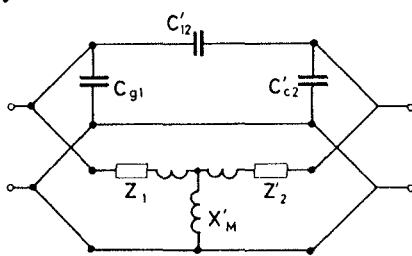
Los elementos indicados en el esquema en trazo seguido constituyen el transformador. Primario y secundario pueden estar eléctricamente aislados, o unidos (en la figura A-B).



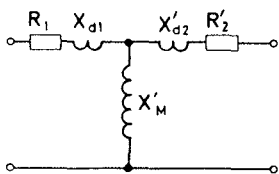
(a)



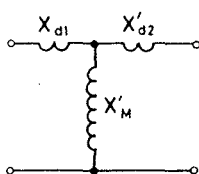
(b)



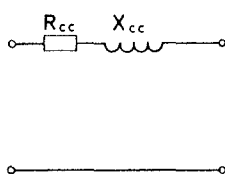
(c)



(c')



(c'')



(c''')

Fig. Ap. XVII-1,2

Además, en (a) se han representado, en trazos, un generador y una carga ¹. Una primera simplificación del esquema consiste en sustituir los dos condensadores en paralelo del primario por uno, y análogamente proceder en el secundario, así:

$$C_{\kappa 1} = C_g + C_1 \qquad C_{\kappa 2} = C_c + C_2$$

Conviene observar que el esquema aún sería algo más complicado si se quisieran representar las pérdidas del transformador en el núcleo. Se prescindirá, en atención a lo reducidas que suelen ser tratándose de frecuencias algo elevadas (véase el quinto ejercicio del § II-1.5).

En el esquema (b) se ha efectuado la reducción al primario de los elementos del secundario ², pero además, en lugar de las inductancias primaria y secundaria L_1 y L_2 , se utilizan las conocidas inductancias de dispersión L_{d1} y L_{d2} ³. El mismo esquema se ha representado en (c), a base de dos cuadripolos en paralelo. Si se refiere a frecuencias menos elevadas, puede ser suficientemente aproximado el esquema (c'). Tratándose de frecuencias medias ⁴, las X y X'_M pueden ser elevadas, frente a las R , en cuyo caso el esquema podría simplificarse quedando según (c''), e incluso según (c''').

He aquí un nuevo concepto, el esquema equivalente al transformador varía según la gama de frecuencias.

§ Ap. XVII-1.3. CARACTERÍSTICAS AMPLITUD-FRECUENCIA Y FASE-FRECUENCIA.

En gran cantidad de aplicaciones de los transformadores a la técnica de las comunicaciones, es fundamental que en el paso de u_1 a u_2 (tensión de entrada o de señal a tensión de salida) no exista gran distorsión, es decir, que tales funciones sean lo más semejantes posible. Se vio en § Ap. XVII-1.1 que u_1 puede suponerse constituida por la superposición de ondas senoidales. En la transformación de una onda senoidal (de tensión) se ofrecen:

¹ En ocasiones, el transformador no tiene más objeto que proporcionar una tensión, es decir $Z_c = \infty$, no pudiéndose despreciar, tratándose de elevadas frecuencias, C_c . En tal caso, la carga se limita a esta capacidad.

² Tal operación se definió y estudió en los § II-4.1 y 2. Allí no se consideraban las capacidades, y se soslayaba el uso de la inductancia mutua M . Se omiten las demostraciones, pero puede probarse que las reducciones al primario (magnitudes con tilde) vienen dadas por:

$$\tilde{C}'_{12} = C_{12} r_t^{-1}; \quad \tilde{C}'_{\kappa 1} = C_{\kappa 1} + C_{12} (1 - r_t^{-1}); \quad \tilde{C}'_{\kappa 2} = C_{\kappa 2} r_t^2 + C_{12} (r_t^{-2} - r_t^{-1}); \quad \tilde{M}' = M r_t$$

³ Se puede demostrar que:

$$L_{d1} = L_1 - M'; \quad L'_{d2} = L'_2 - M'$$

⁴ Se comprende que este concepto depende de los valores concretos, en cada caso, de las R , L y C .

- a) una relación entre amplitudes U_1/U_2 ;
- b) un desfase entre vectores \underline{U}_1 y \underline{U}_2 , φ_{12}

Es evidente que tanto el cociente U_1/U_2 como el ángulo φ_{12} son funciones de la frecuencia f . Tanto es ello así que incluso, si la gama de frecuencias es suficientemente ancha, puede suponerse que la transformación ($\underline{U}_1 - \underline{U}'_2$) se realiza a través de circuitos diferenciados.

A la característica U_1/U_2 función de f , se la denomina *de amplitud-frecuencia*, también *respuesta a la frecuencia* y, más impropriamente, *característica de frecuencia*. En el orden de ideas presentado al principio de este §, lo ideal es que tal característica sea plana o muy aplanada.

Pero lo anterior no basta para evitar la distorsión. Al ser φ_{12} función de la frecuencia, significa que unas senoides sufrirán corrimiento respecto a otras. La función φ_{12} constituye la *característica desfase-frecuencia* o, brevemente, *característica de fase*.

§ Ap. XVII-1.4. CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS AMPLITUD-FRECUENCIA Y FASE-FRECUENCIA.

A título de ejercicio, se va a proceder a la determinación analítica de las características correspondientes al esquema (c''') de la figura Ap. XVII-1,2. Se ha representado en la figura Ap. XVII-1,3, a base de una f.e.m. con resistencia interna R_G y una carga óhmica pura R'_c . Al aludir a las características, se entenderá razón de amplitudes y desfases de los vectores \underline{U}_c y \underline{E}_G . Obsérvese que este último representa la tensión en vacío en bornes de fuente de f.e.m.

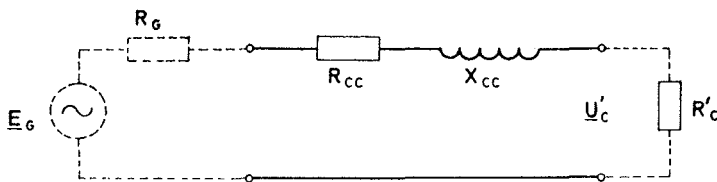


Fig. Ap. XVII-1.3

El problema no ofrece dificultades:

$$\underline{U}'_c = \underline{E}_G - (R_G + R_{cc} + j X_{cc}) I$$

$$\frac{\underline{U}'_c}{\underline{E}_G} = 1 - \frac{R_G + R_{cc} + j X_{cc}}{R_G + R_{cc} + R'_c + j X_{cc}} = \frac{R'_c}{R_G + R_{cc} + R'_c + j X_{cc}}$$

Y escribiendo, para abreviar, $R_G + R_{cc} + R'_c = R_T$, resulta

$$\frac{U'_c}{E_G} = \frac{R'_c R_T}{R_T^2 - X_{cc}^2} - j \frac{R'_c X_{cc}}{R_T^2 - X_{cc}^2} = \frac{R'_c}{\sqrt{R_T^2 - X_{cc}^2}} \left[\text{arc tg } \frac{X_{cc}}{R_T} \right]$$

Luego la característica amplitud-frecuencia es

$$\frac{U_c}{E_G} = \frac{r_t R_c}{\sqrt{R_T^2 - \omega^2 (L_{d1} + r_t^2 L_{d2})^2}}$$

Y la característica desfase-frecuencia

$$\varphi_{12} = \text{arc tg } \frac{\omega (L_{d1} + r_t^2 L_{d2})}{R_T}$$

El esquema (c), más complejo, puede tratarse, ventajosamente, por la teoría de los cuadripolos ¹.

§ Ap. XVII-2. Transformadores de adaptación o de máxima potencia.

En los circuitos de comunicación es frecuente que se ofrezcan fuentes de tensión que han de alimentar cargas determinadas, $Z_c = R_c + jX_c$, interesando que se transmita la máxima potencia de la fuente a la carga. Véase la figura Ap. XVII-2a, a la fuente de tensión va asociada una impedancia $Z_G = R_G + jX_G$.

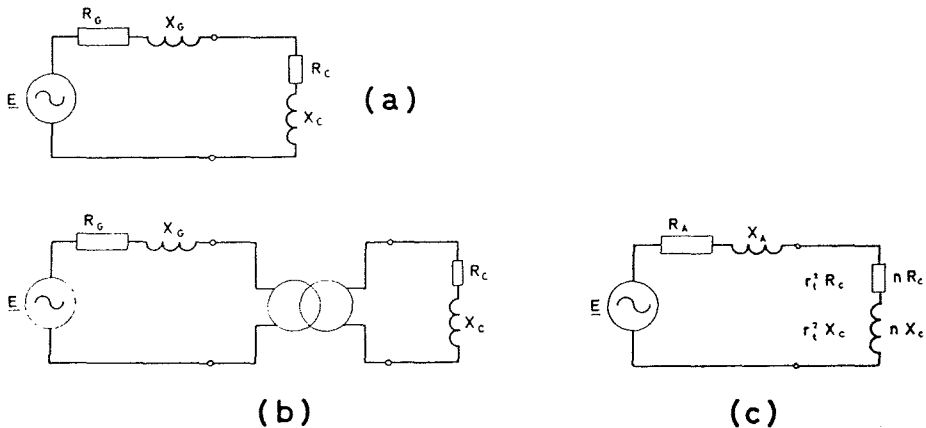


Fig. Ap. XVII-2

¹ Véase *Introducción al análisis de redes eléctricas y a la teoría de los cuadripolos*, del mismo autor.

Se recuerda ¹ que si R_c y X_c son susceptibles de variación, se obtiene la máxima potencia activa para el receptor (R_c) cuando la impedancia Z_c es compleja conjugada de Z_G . Mas aquí no cabe modificar Z_c , por tratarse de un receptor concreto. Existe el recurso de interponer un transformador, figura Ap. XVII-2b, con relación de transformación r_t . En tal caso, la impedancia de la carga, referida al primario (vista desde el lado primario del transformador), pasa a ser:

$$\underline{Z}'_c = r_t^2 \underline{Z}_c = r_t^2 R_c + j r_t^2 X_c = n R_c + j n X_c$$

Por simplicidad se escribe $r_t^2 = n$

En la figura Ap. XVII-2c se representa el esquema equivalente al nuevo circuito. La interposición del transformador significa introducir su Z_{cc} . Se entenderá:

$$R_A = R_G + R_{cc} \quad X_A = X_G + X_{cc}$$

Con tal recurso no es factible variar conveniente e independientemente $n R_c$ y $n X_c$, sino proporcionalmente. El problema que se ofrece es la determinación de la $n (r_t^2)$ necesaria para que la potencia activa transmitida sea máxima ²

La potencia activa del consumo vale

$$P = n R_c I^2 = \frac{n R_c E^2}{(R_A + n R_c)^2 + (X_A + n X_c)^2}$$

Para determinar el valor de n que corresponde a la máxima potencia se procederá según es usual,

$$\frac{dP}{dn} = 0$$

Igualando a cero el numerador, y por simplificaciones, resulta:

$$\begin{aligned} R_c E^2 (R_A + n R_c)^2 + R_c E^2 (X_A + n X_c)^2 - 2 (R_A + n R_c) n R_c^2 E^2 - \\ - 2 (X_A + n X_c) n R_c X_c E^2 = 0 \\ (R_A + n R_c)^2 + (X_A + n X_c)^2 - 2 n R_c (R_A + n R_c) - 2 n X_c (X_A + n X_c) = 0 \\ n^2 (R_c^2 + X_c^2) = R_A^2 + X_A^2 \end{aligned}$$

¹ Véase *Teoría de Circuitos, fundamentos*, del mismo autor, E.II-33,1.

² El lector podrá demostrar, si lo desea, que al mismo tiempo son máximas las potencias aparente y reactiva.

$$n = \frac{Z_A}{Z_c} = r_i^2$$

Luego la máxima potencia transmitida se logra cuando el módulo de la impedancia de carga, referida al primario (vista desde el primario) es igual al módulo de la impedancia del resto del circuito.

Al transformador que realiza tal función se le denomina *de máxima potencia* o *de adaptación*.

Ejemplo

Supóngase un consumo, constituido por una resistencia pura de 9Ω , que ha de alimentarse mediante una \underline{E} con una impedancia interna de $3\,600 \Omega$. Se transferirá la máxima potencia intercalando un transformador.

$$\frac{3\,600}{9} = 400 = n = r_i^2; r_i = 20$$

En la práctica, puede suceder que circuitos de esta naturaleza tengan que trabajar a base de diversas frecuencias. En tal caso, y no tratándose de resistencias puras, no es posible la adaptación para todas. Cabe producir la adaptación para una frecuencia media entre las que se van a utilizar. Si en el ejemplo anterior la impedancia de la fuente fuese básicamente óhmica, una cierta adaptación subsistiría, prácticamente, para una amplia gama de frecuencias.

APÉNDICE XVIII

DIELÉCTRICOS MÁS RESISTENTES AL CALOR PARA TRANSFORMADORES

§ Ap. XVIII-1. Dieléctricos líquidos más resistentes al calor

Aunque desde los años treinta prácticamente todos los fabricantes han suministrado transformadores con dieléctricos Askarel, en los últimos tiempos aparecen publicaciones que advierten sobre los riesgos que impone el empleo de tales transformadores (Pyraleno, Clophen). Principalmente se refieren a la posible formación de policlorados de dibenzofuranos (PCDF) y de policlorados de dibenzodioxinas (PCDD).

El medio de disipación y aislamiento llamado Askarel es una mezcla de difenil policlorado y tri o tetraclorobenzol. En un informe, publicado en Estados Unidos, con referencia a determinado incendio que afectó a un transformador con Askarel, se llamó la atención sobre la aparición PCDD y PCDF. Algunos representantes de estos compuestos figuran entre los más activos venenos conocidos (veneno del caso Seveso).

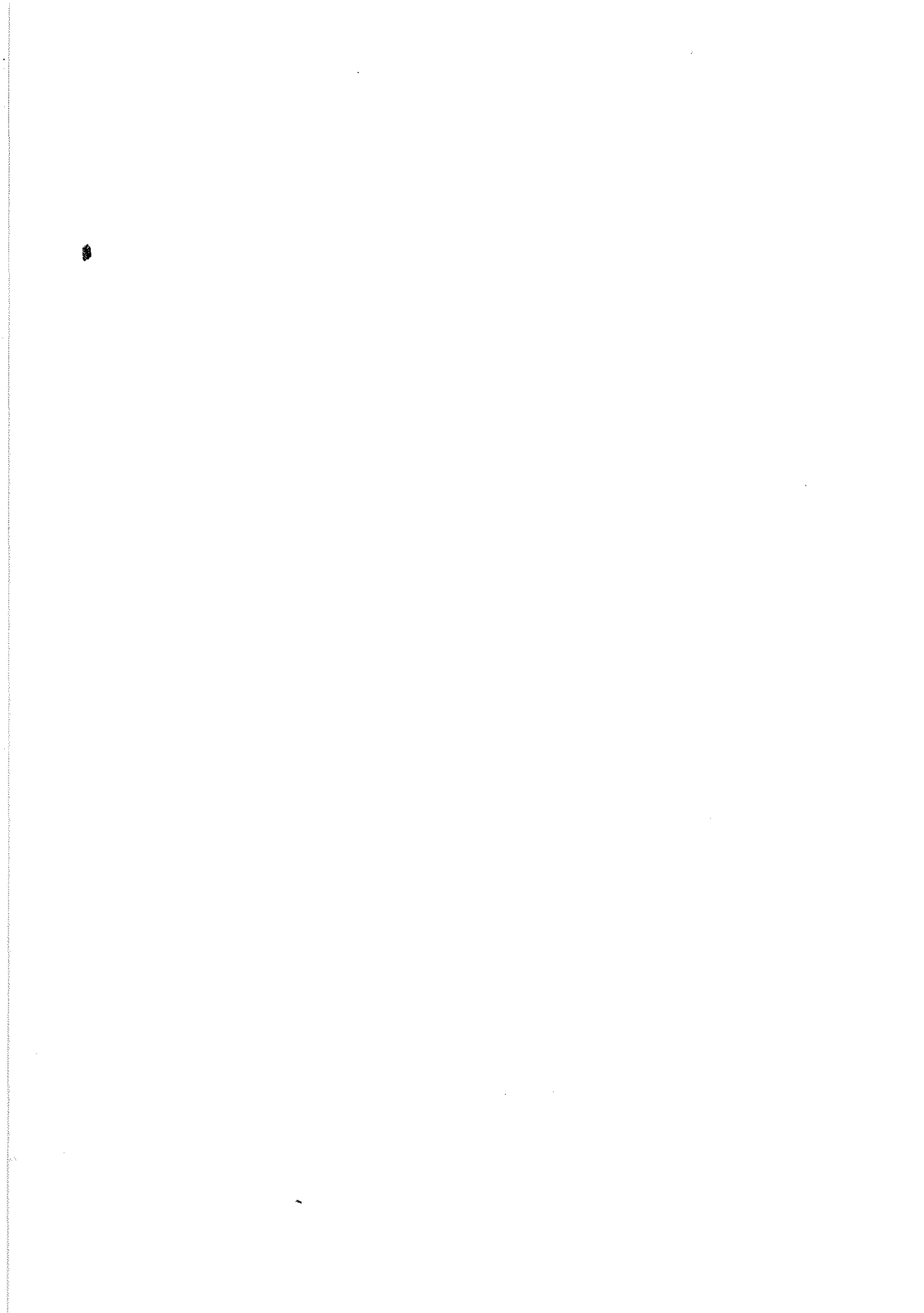
Los transformadores con Askarel deben estar apartados de las zonas afectadas de posibles incendios.

Con miras a nuevas fabricaciones se propone el empleo de otros líquidos sustitutivos entre los cuales podemos citar el aceite silicona y el éster sintético LDP 138.

"C	Aceite mineral	Askarel	Aceite silicona	LDP 138
Temperatura de inflamación	150-175	ninguna	343-360	310
Autoinflamación	330	660	430	435

§ Ap. XVIII-2. Dieléctricos sólidos

Con el fin de soslayar inconvenientes subsistentes, se ha propuesto y construido transformadores con dieléctricos sólidos inalterables por el calor y por envejecimientos. Ciertamente, en tal caso hay que renunciar al proceso de convección, limitando la disipación del calor a la conductividad, de ahí la elección del cuarzo que la ofrece relativamente buena.



OTRAS PUBLICACIONES DEL AUTOR

Teoría de circuitos, fundamentos (4.^a edición), Marcombo Boixareu Editores. Barcelona, 1988.

Análisis de Fourier y cálculo operacional aplicados a la electrotecnia, Marcombo Boixareu Editores. Barcelona, 1979.

Redes eléctricas y multipolos, Marcombo Boixareu Editores. Barcelona, 1980.

Teoría de líneas eléctricas, volumen I (2.^a edición). Universidad Politécnica de Cataluña y Boixareu Editores, Barcelona, 1986.

Teoría de líneas eléctricas, volumen II. Universidad Politécnica de Cataluña y Boixareu Editores, Barcelona, 1975.

Diccionario Conceptual de la Electrotécnia Alemán/Catalán/Castellano. Col·legi d'Enginyers Industrials de Catalunya y Marcombo, Barcelona, 1990.