2.5 Conexiones entre bobinados y cambiadores de tomas

Las conexiones entre bobinas determinan el grupo de conexión normalizado requerido por cada modelo concreto. El fundamento teórico se explicó en la seccción 1.5 Conexiones entre devanados, p. 21 ss. Aquí veremos cómo dotar a las máquinas de un número de tomas variable desde el exterior.

CAMBIO DE TOMAS

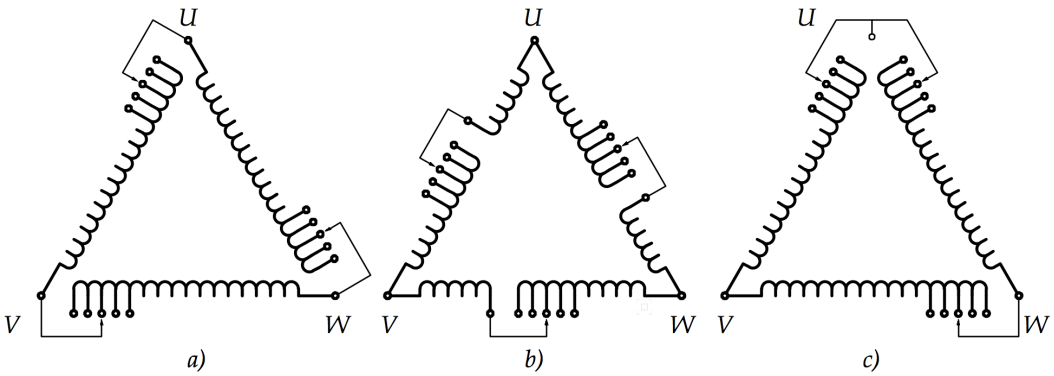
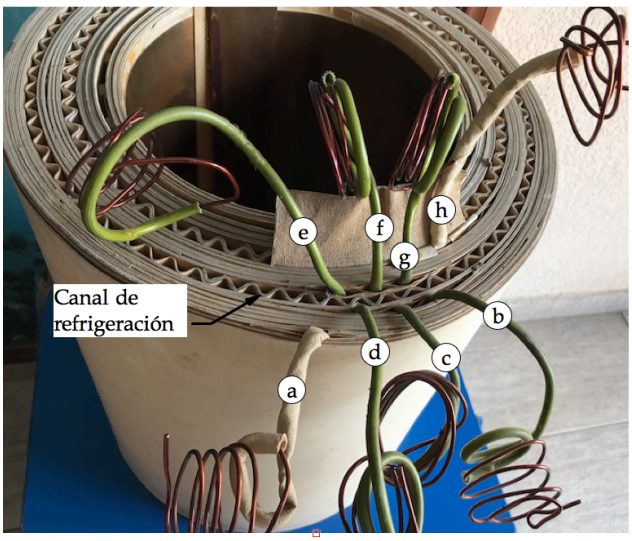


Fig. 67 Diferentes formas de organizar un cambio de tomas en un devanado en Δ.

Los cambiadores de tomas conmutan las conexiones que se sacan fuera de las bobinas para poder alimentar diferente número de espiras cada vez. La Fig. 67 representa varias posibilidades para hacerlo en un devanado trifásico conectado en triángulo. Generalmente la opción *b*) es la preferida y es la que se muestra en la Fig. 68. La Fig. 69 *a*) se explica cómo se conectaría ese cambiador de tomas: en la posición 1 del cambiador, que puentea los dos contactos rojos de la izquierda, la corriente recorre las 10 espiras representadas en ese bobinado idealizado en *color negro*. Pero en la posición 3 el puente entre el *hilo verde y naranja* incorpora todas las espiras al circuito.

En la Fig. 69 *b*) se aprecia un arrollamiento con 4 extremos más (hilos *azul* y *gris*) que permite instalar un cambiador de 5 tomas:

En la posición central 3 el puente del cambiador permite que la corriente circule por los hilos de colores *negro, verde y gris* (12 espiras), y en la posción 4 se añade el *naranja* (13 espiras). El *azul* entra en la posición 5 (14 espiras).



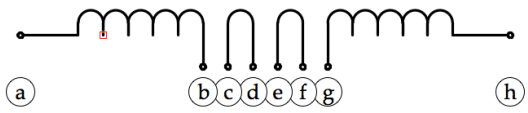


Fig. 68 Bobina con los extremos de las tomas del arrollamiento AT. [GED]

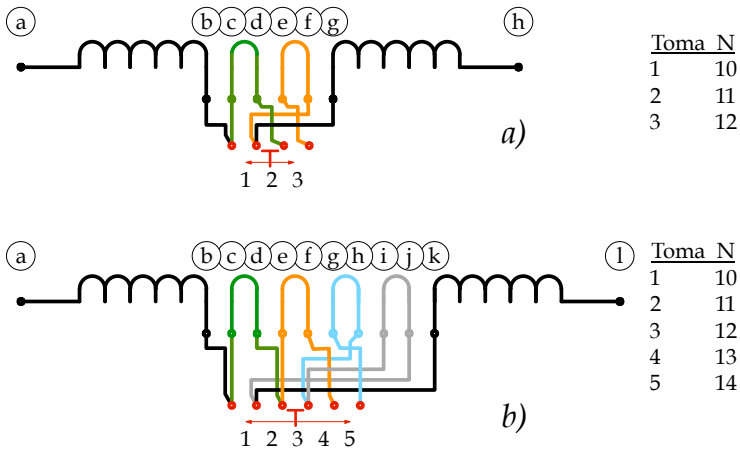


Fig. 69 El cambiador de tomas para la bobina de la Fig. 68 está representado en color rojo en la parte *a*) y es de 3 tomas. En *b*) se aprecia un cambiador para 5 tomas.

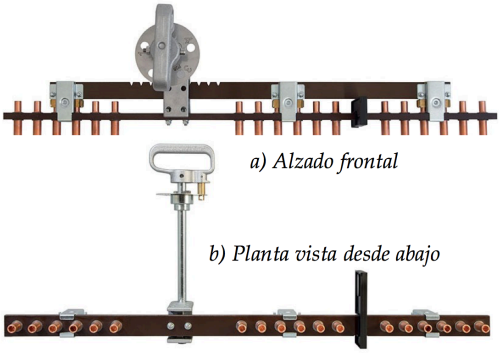


Fig. 70 Dos modelos de cambiadores de tomas sin carga, que difieren en la posición del conmutador externo.

El conmutador se instala normalmente bajo la tapa del transformador, encima de la culata, es decir, de los refuerzos del yugo superior (Fig. 72).

Fig. 71 Detalle de salida de cables hacia el cambiador. [GED]

Fig. 72 Detalle de espaciadores entre yugo y bobinas, refuerzos del yugo y salida de cables al cambiador de tomas. [GED]

Para seleccionar las diferentes tomas se accionará el conmutador que sobresale a través de la tapa del transformador (Fig. 73).

Esta operación nunca debe hacerse con el transformador en tensión, pues la posición del conmutador no es segura: al acceder a él el operario se acerca inaceptablemente a las bornas de alta tensión, poniendo innecesariamente en riesgo su vida. Es obligatorio desconectar la máquina de ambas redes (AT y BT) antes.

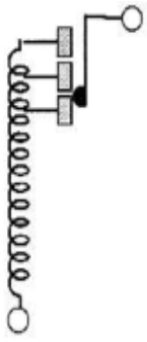
Por otra parte, la hipotética manipulación de este tipo de cambiadores con el transformador en tensión conllevaría necesariamente un apagado de la máquina, pues se pierde la continuidad del circuito al paso del mecanismo de una toma a otra.

Fig. 73 El cilindro negro central es el conmutador del cambiador de tomas. [GED]

Por eso este sistema de conmutación se denomina cambiador de tomas sin carga: no es apto para mantener durante la conmutación la tensión en la máquina.

La Fig. 74 muestra en primer plano un cambiador de tomas en carga (OLTC, *On Line Tape Changer*) instalado bajo la tapa, junto a la parte activa, y que quedará dentro de la cuba de un transformador de potencia.

Este complejo mecanismo está internamente motorizado, dispone de un accionamiento remoto totalmente seguro, y es capaz de conmutar entre dos tomas contiguas sin perder en ningún momento la tensión en los devanados de la máquina.



Esta operación es compleja porque solo deslizar el conmutador entre tomas no basta: ¡en la posición intermedia se cortocircuitan espiras!

Fig. 74 Cambiador de tomas en carga (OLTC). [GED]

© NRM 2021-2022

Si por ejemplo la tensión entre espiras consecutivas es de 10 V y cada toma implica un salto de 10 espiras, cortocircuitar dos tomas cuando el cursor pasa de una a otra sin interrumpir la corriente (es decir, manteniendo alimentada la carga) equivale a cortocircuitar una fuente de 100 V. Por eso hay que proceder como se indica a continuación:

SECUENCIA DE MANIOBRAS PARA LA CONMUTACIÓN EN CARGA

1) Cambiador en toma 1, interruptor puente cerrado, selector en A+B
2) Selector solo en A
3) Abre el interruptor puente
4) Cambiador en toma 1 y 2
5) Cierra el interruptor puente
6) Selector solo en B
7) Abre el interruptor puente
8) Cambiador en toma 2
9) Cierra el interruptor puente
10) Selector en A+B

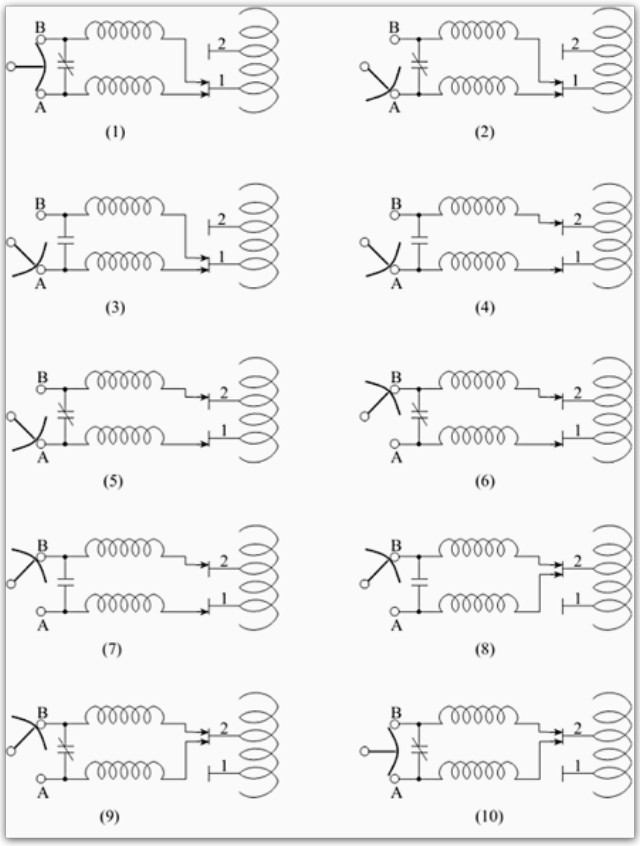


Fig. 75 Secuencia de un cambio de tomas en carga.
[*https://electrical-engineering-portal.com*]

El cambiador de tomas en carga es, como puede suponerse, un mecanismo de relojería complejo y caro, que puede suponer 1/3 del precio total de la máquina. Sólo se instalan en entornos industriales donde resulte crítico mantener la tensión estable entre márgenes muy pequeños, y en subestaciones de la red pública de distribución de energía eléctrica.

Fig. 76 Pequeña subestación eléctrica en una mina al aire libre.
El armario grande del transformador controla localmente el cambiador de tomas en carga.

© NRM 2021-2022

2.6 Pérdidas

PÉRDIDAS EN VACÍO

Las pérdidas en vacío se deben al calentamiento del núcleo a causa de las pérdidas por histéresis magnética y por circulación de corrientes parásitas o de Foucault.

> El calentamiento de los conductores del devanado primario con la intensidad de vacío es despreciable, puesto que esta intensidad es apenas del 0,3% de la intensidad nominal o de plena carga del primario.

Las pérdidas por calentamiento del núcleo dependen del material empleado, de la inducción máxima que se le aplique y del tamaño de este:

> En cuanto al material, se tratará de chapa magnética de grano orientado en láminas finísimas, cuyas características de eficiencia energética se proporcionan habitualmente en forma de gráfica como la de la Fig. 77, que relaciona los vatios por kilogramo de chapa para cada nivel de inducción B_m (T) aplicado.
>
> Aunque leer los datos de la gráfica es muy rápido, para automatizar el diseño es conveniente sustituirla por una ecuación que proporcione los mismos valores o los más similares posible. Es lo que se ha hecho en la Fig. 78: en la tabla que la acompaña figuran los puntos discretos obtenidos de la gráfica para determinados valores de B_m. Mediante técnicas de regresión sencillas (método de los mínimos cuadrados por ejemplo) se puede obtener la ecuación de una curva muy parecida a la de la gráfica, que se utilizará para obtener cualesquiera valores durante el cálculo.
>
> En este caso se ha obtenido gracias a la opción ofrecida por *Excel*™ de MICROSOFT. El ajuste logrado es tanto mejor cuanto más se acerque R a uno.

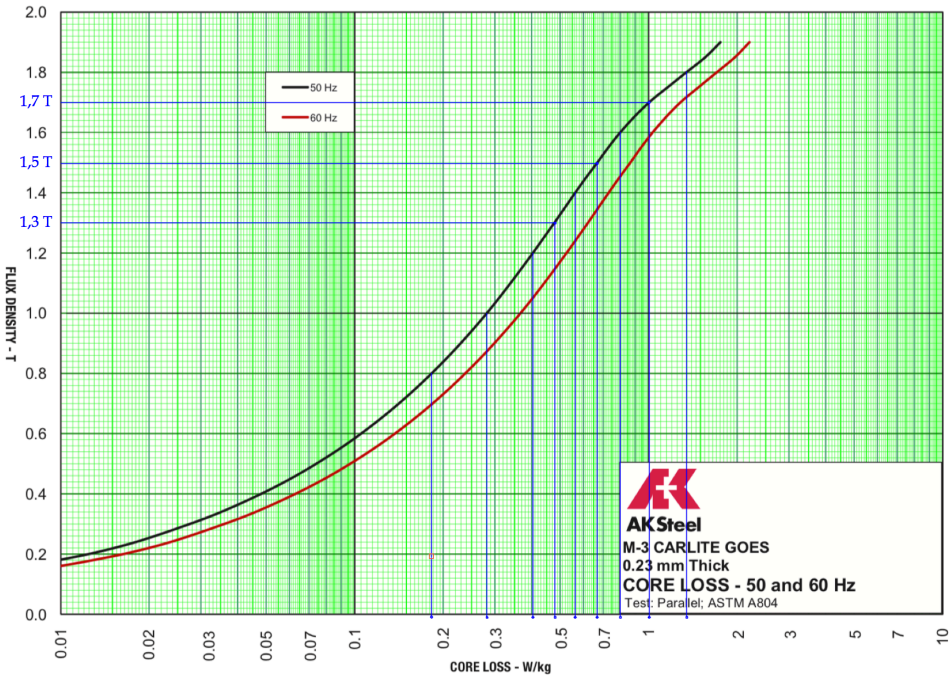


Fig. 77 Relación entre pérdidas de energía por calentamiento y densidad de flujo B_m para la chapa Carlite M-3.

B_m (T)	P_0 (W/kg)
0,2	0,015
0,4	0,048
0,6	0,110
0,8	0,185
1,0	0,280
1,2	0,405
1,3	0,480
1,4	0,560
1,45	0,615
1,5	0,670
1,6	0,800
1,7	1,000
1,8	1,350

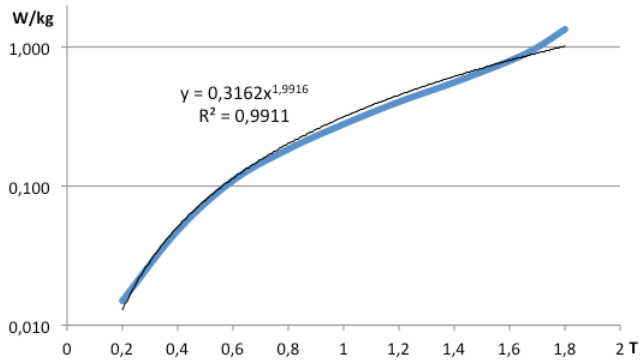


Fig. 78 La tabla está extraída de la Fig. 77.
La curva de regresión puede usarse en su lugar con las debidas precauciones.

EJEMPLO

Transformador de distribución. Ø158 mm de núcleo compuesto de chapa Carlite M-3, con inducción B_m = 1,4 T.

L bobina L_b	600 mm
Ø exterior bobinas	536 mm
Holgura entre bobinas adyacentes	10 mm
Ancho de ventana	546 mm
Distancia yugo-bobinas H_{YB}	10 mm
Longitud libre columna L_{Cint}	620 mm
Anchura total núcleo B_N	1566 mm
Altura total núcleo H_N (mm)	936 mm
Longitud media yugo L_{Ym}	1408 mm
Longitud media columna L_{Cm}	778 mm
Volumen neto núcleo V_{Fe} (dm³)	85,74
Chapa ferromagnética	Carlite
Espesor chapa ferromagnét. (mm)	0,23
Coeficiente de apilamiento k_0	1,05
Densidad (kg/m³)	7650
Pérdidas (W/kg)	0,560
Pérdidas en vacío P_0	
Máximo garantizado P_{0max} (W)	387
Pérdidas calculadas P_0 (W)	367
Relación P_0/P_{0max} (%)	95% CUMPLE

PÉRDIDAS DEBIDAS A LA CARGA

Estas pérdidas se generan por calentamiento de los conductores del primario y del secundario. Hay que calcularlas para la intensidad nominal o de plena carga de la máquina y a la temperatura de máximo calentamiento de los devanados admisible.

En la sección 1.2 Pérdidas de los transformadores, p. 11, vimos que la resistencia se calculaba a partir de la resistividad del conductor corregida en función de la temperatura según UNE 21096 para el aluminio y UNE 20003 para el cobre.

La temperatura máxima de los devanados puede ser un requisito del cliente o se puede considerar limitada por la norma de fabricación aplicable.

EJEMPLO

Transformador de distribución. Devanados de aluminio. Temperatura máxima de los devanados 75ºC.

	AT	BT
Longitud conductor (m)	4663,27	27,10
Resistencia conductor (Ω/m)	0,0034	0,000041
Resistencia bobina (Ω)	15,9643	0,001106
Pérdidas debidas a la carga P_k		
Máximo garantizado P_{kmax} (W)	3250	
Devanado primario (W)	2129	
Devanado secundario (W)	1106	
Pérdidas calculadas P_k (W)	3234	
Relación P_k/P_{kmax} (%)	99,51%	CUMPLE

Se ha tenido en cuenta que $R = \rho\frac{L}{S}$ con $\rho_{Al}\left(\frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}\right) = 0{,}028\left[1 + 0{,}00407\left(\theta_c - 20\right)\right]$

RENDIMIENTO NOMINAL

El rendimiento nominal de la máquina se obtiene a partir de la potencia que puede perder cuando está trabajando en condiciones nominales o de plena carga, y su potencia nominal. Por las características del transformador no será su rendimiento máximo, que se obtiene a cargas ligeramente menores, pero estará próximo a él.

$$\eta_N(\%) = \left(1 - \frac{P_P}{P_N}\right) \times 100$$

La potencia perdida P_P (W) es la suma de las pérdidas en vacío P_0 y las debidas a la carga P_k, medidas en laboratorio sobre el transformador terminado. Pero en fase de cálculo serán los valores obtenidos en las secciones anteriores.

La potencia nominal P_N (W) es la potencia aparente nominal S_N en vatios, pues si la carga alimentada desde el transformador fuera puramente resistiva, podría llegarle a suministrar hasta ese valor de potencia en vatios.

EJEMPLO

Transformador de los dos ejemplos anteriores.
S_N = 400 kVA $P_P = P_0 + P_k = 367 + 3234 = 3601$ W

$$\eta_N(\%) = \left(1 - \frac{P_P}{P_N}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{P_0 + P_k}{P_N}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{367 + 3234}{400 \times 10^3}\right) \times 100 = 99{,}10\%$$

2.7 Diseño de la cuba

Hay muchos tipos de cubas pero en lo esencial, todas ellas deben contener el aceite refrigerante y dar solidez al conjunto del transformador. En algunas ocasiones, además, deben resistir la presión atmosférica absoluta, pues en los transformadores medianos y grandes se les hace el vacío completo durante la fase de secado

final de las bobinas.

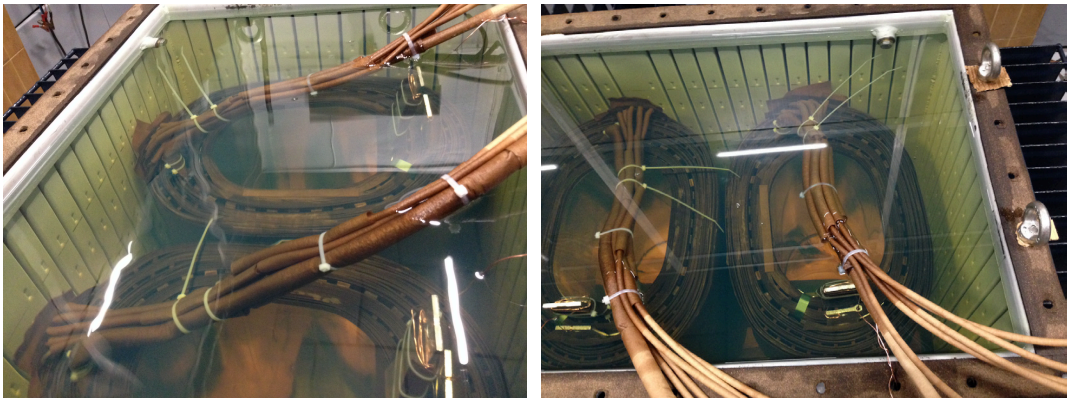


Fig. 79 Bobinas sin núcleo sumergidas en aceite dentro de su cuba de aletas elásticas durante una prueba de calentamiento. [GED]

Los transformadores de distribución generalmente llevan cubas de aletas elásticas para llenado integral de aceite (Fig. 79). Esto quiere decir que cuando el aceite se dilata o contrae por efecto de la temperatura son las aletas las que se hinchan y deshinchan proporcionalmente para absorber esos cambios de volumen, ya que dentro de la cuba no puede quedar gas alguno (ni aire ni humedad-vapor de agua).

Evidentemente la cuba debe poder alojar toda la parte activa con la holgura suficiente para permitir que el aceite circule por convección entre los bobinados y las aletas refrigeradoras, y para garantizar el nivel de aislamiento de diseño requerido (que es el impuesto por las sobretensiones atmosféricas según el Reglamento de alta tensión).

Al fondo de la cuba se le sueldan las vigas soporte de las ruedas, y sobre ese fondo se sueldan también las paredes de aletas ya plegadas. Por último se suelda el marco de la tapa y se comprueba que el conjunto ha quedado suficientemente estanco y libre de poros.

2.8 Diseño de la refrigeración

La refrigeración del transformador evacúa el calor generado en el núcleo y en los devanados para limitar el calentamiento de la máquina a un valor máximo garantizado por encima de la temperatura ambiente.

Dado que la parte activa está inmersa en aceite, es este fluido el que lleva el calor desde el núcleo y los devanados hasta las paredes de la cuba, donde se produce el intercambio con el aire que circunda el transformador, aunque hay algunos diseños de transformadores grandes donde el papel del aire lo juega un circuito refrigerante de agua.

Los flujos de aceite y de aire (y de agua) pueden ser por convección natural, o tratarse de flujos forzados mediante electrobombas o ventiladores, y hay una designación normalizada para las distintas combinaciones (Fig. 80).

Es normal que un mismo transformador pueda tener una potencia nominal distin-

ta según el sistema de refrigeración adoptado.

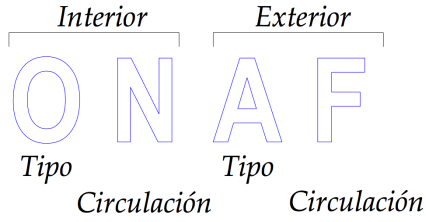
EJEMPLO

Un transformador 6,5 MVA ONAF - 5,5 MVA ONAN (Fig. 81) es capaz de proporcionar 1 MVA más de potencia aparente cuando se activan los ventiladores que refrigeran por fuera su cuba (normalmente estará dotada de radiadores), que cuando estos permanecen apagados.

Fig. 80 Designación normalizada de los sistemas de refrigeración de un transformador:

Tipo de fluido caloportador:
- *O* *Oil* = aceite
- *A* *Air* = aire
- *W* *Water* = agua

Recirculación del fluido:
- *N* *Natural* = convección
- *F* *Forced* = forzada (motor)



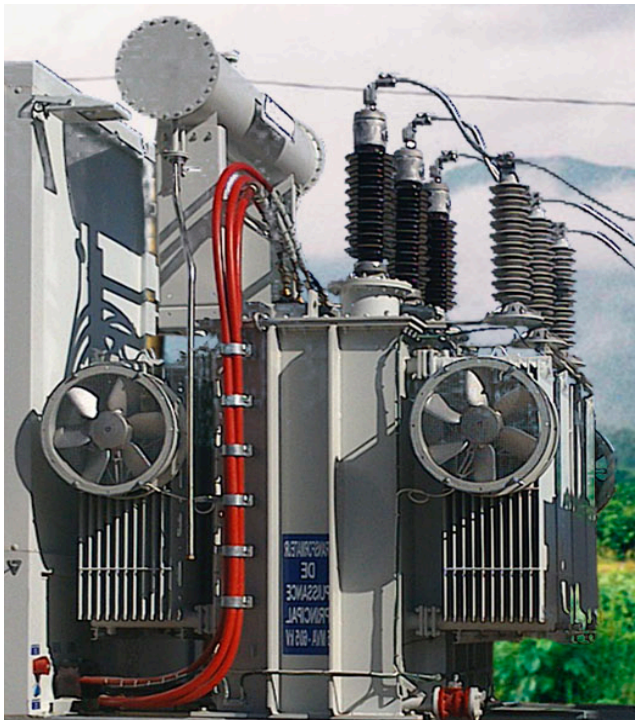


Fig. 81 Transformador del ejemplo:
6,5 MVA ONAF - 5,5 MVA ONAN. [GED]

Las aletas de las cubas elásticas para llenado integral aumentan la superficie de intercambio de calor con el aire que circunda el transformador. Normalmente solo se emplean en refrigeraciones tipo ONAN (el aceite y el aire circularán por convección natural, no forzada), que son las habituales en transformadores de distribución de energía eléctrica.

El fabricante aprovechará de una a cuatro caras de la cuba del transformador para instalar en ella aletas refrigerantes, que al llenarse de aceite incrementarán muchísimo la superficie de intercambio de calor con el aire exterior (Fig. 82).

© NRM 2021-2022

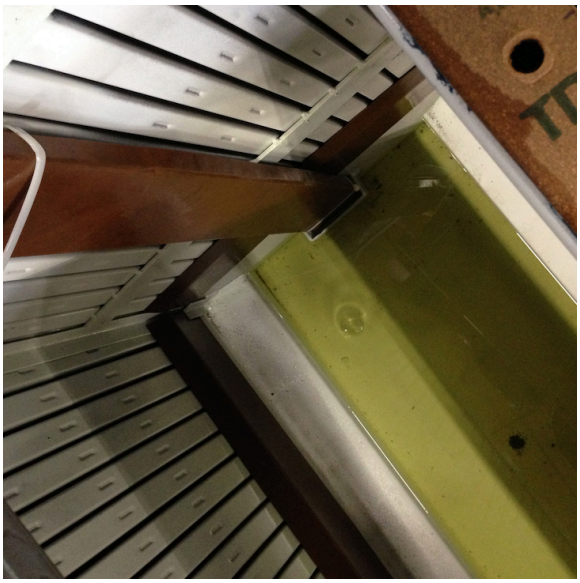
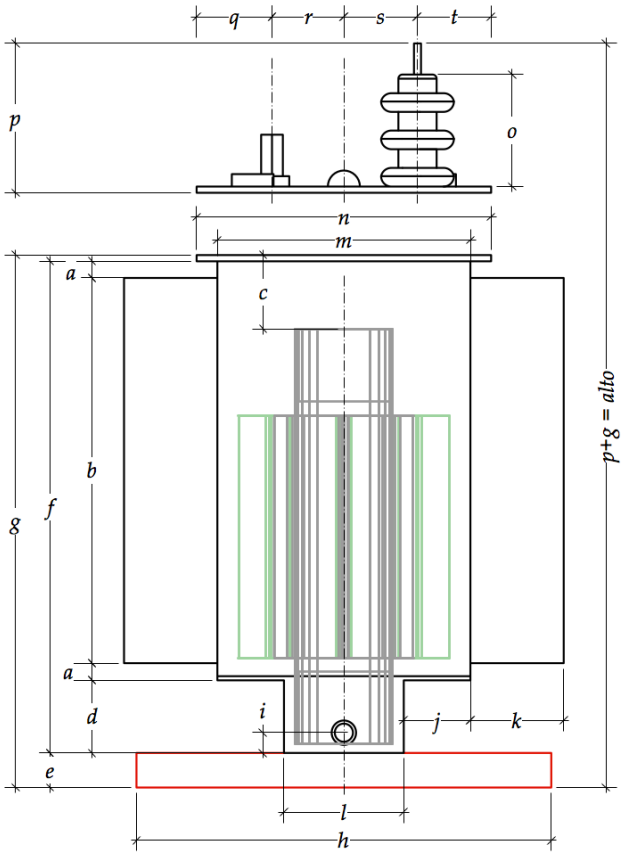


Fig. 82 Detalle del interior de una cuba de llenado integral con algo de aceite dieléctrico en su fondo. [GED]

Para calentamientos por encima de la temperatura ambiente de unos 60ºC las aletas refrigeradoras pueden llegar a disipar de 6 a 8 W/(m² ºC). Calcular cuántas aletas y de qué tamaño es necesario instalar resulta sencillo. Tan solo hay que conseguir que la potencia disipable sea superior a las pérdidas totales de la máquina a plena carga.



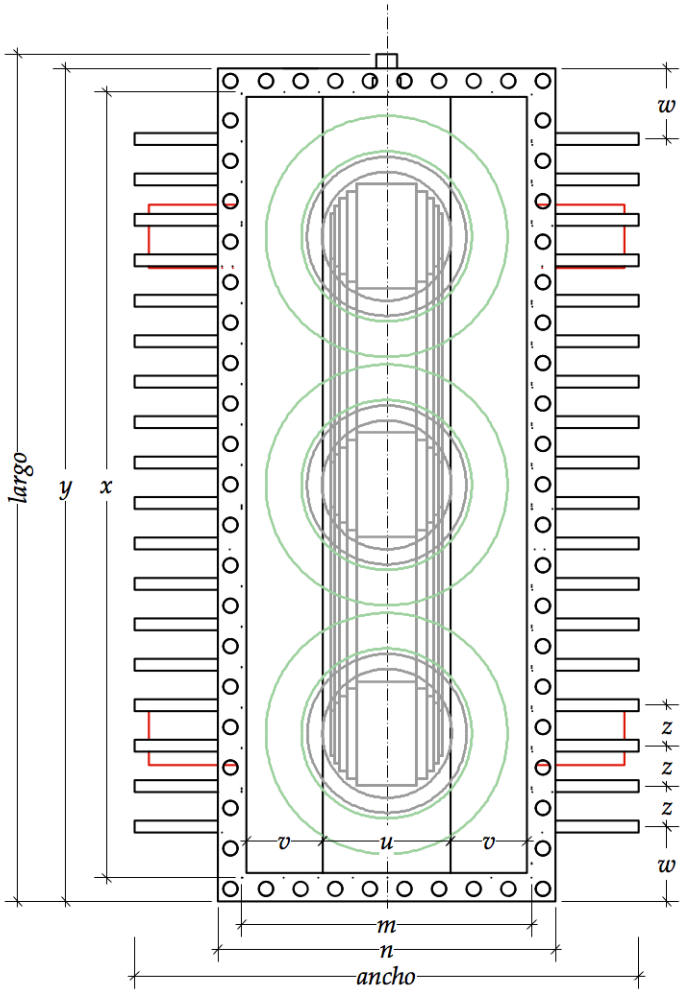


Fig. 83 Algunas medidas esenciales para definir la envolvente y la refrigeración del transformador.

EJEMPLO

CUBA ELÁSTICA LLENADO INTEGRAL

Holgura entre bobinas adyacentes	10 mm
Largo mínimo cuba interior (mm)	1638
Ancho mínimo cuba interior (mm)	556
Altura total núcleo (mm)	936
Distancia yugo superior- tapa (mm)	180
Altura mínima cuba interior (mm)	1116
Longitud aletas refrigeradoras (mm)	950
Equidistancia aletas aprox. (mm)	50
Número aletas lado largo	31
Número aletas lado corto	10
Anchura de las aletas (mm)	120
Núm. lados largos con aletas	2
Núm. lados cortos con aletas	0
Núm. total aletas	62
Superficie radiante aletas (m^2)	14,14
Potencia disipante máxima ($W/(m^2\,^oC)$)	6,00
Calentamiento s/ ambiente (^oC)	50
Potencia disipable (W/m^2)	300

Potencia disipable total (W)	4241
Pérdidas totales (W)	3601
Canto (altura) vigas soporte (mm)	80
Largo cuba (mm)	1675
Ancho cuba (mm)	825
Alto cuba (mm)	1255

VOLUMEN DE ACEITE

Densidad aceite a 25ºC (kg/dm^3)	0,91
Anchura canal interior aleta (mm)	5,00
Volumen aceite por aleta (dm^3)	0,57
Volumen aceite en aletas (dm^3)	35
Volumen interior cuba (dm^3)	1016
Volumen núcleo V_{Fe} (dm^3)	86
Volumen aprox. bobinas (dm^3)	406,2
Volumen aproximado aceite (dm^3)	559,8
Peso aproximado aceite (kg)	509,4

2.9 Diseño de la tapa

La tapa va solidaria con la parte activa y de sus cáncamos de elevación es de donde se suspende el conjunto para encubar y desencubar, por lo que tendrá una rigidez mecánica elevada.

Resulta esencial mantener las distancias requeridas por la instrucción técnica 12 del Reglamento de Alta Tensión (tabla 1 ITC-RAT 12) según el nivel de aislamiento solicitado por el cliente.

Para transformadores de distribución donde la tensión nominal primaria no suele superar los 20 kV, las distancias a mantener entre las bornas y la tapa (medida "*o*" Fig. 83), y entre borna y borna, es de 220 ó 270 mm, según el nivel de aislamiento asignado.

EJEMPLO

DISEÑO DE LA TAPA

Tabla 1	ITC-RAT 12
Tensión nominal más elevada U_N (kV)	20
Tensión más elevada para el material U_m (kV)	24
Tensión de cresta impulsos tipo rayo (kV)	125 ó 145
Separación fase-fase / fase-tierra (mm)	220 ó 270

2.10 Características finales aproximadas

Las indicaciones dadas en las secciones precedentes conducen a predimensionar aproximadamente un transformador, y los resultados obtenidos suelen ser válidos para que los departamentos de ofertas estimen rápidamente el coste y los parámetros fundamentales de cada máquina que se solicite al fabricante.

Los departamentos de diseño mecánico y eléctrico afinarán los cálculos muchísimo más, pues hay aún multitud de detalles que precisar hasta conseguir un diseño auténticamente viable. Pero el precálculo mostrado hasta aquí es valioso por cuan-