

CALCULO DE TRANSFORMADORES DE ALIMENTACION

a) Estimación de la sección de núcleo.

La sección de núcleo puede variar dentro de límites relativamente extensos, resultando según los casos mayor o menor rendimiento y mayor o menor costo. El cálculo económico exige considerar los precios del hierro y del cobre, y resulta conveniente, para transformadores de potencia importante, realizarlo a continuación de dos o tres pre-diseños.

Desde el punto de vista constructivo, se pueden aplicar las siguientes fórmulas aproximadas, que permiten acercarse a las condiciones de máximo rendimiento (pérdidas primarias iguales a pérdidas secundarias; y pérdidas totales en el cobre iguales a pérdidas totales en el hierro).

$$\text{Sección de núcleo } S \text{ (cm}^2\text{)} = 24 \sqrt{\frac{P q}{f B \alpha}}$$

Siendo $\left\{ \begin{array}{l} P, \text{ potencia en watts} \\ q, \text{ densidad de corriente en los arrollamientos, en amp/mm}^2 \\ f, \text{ frecuencia en ciclos/s} \\ B, \text{ inducción máxima en miles de gauss} \\ \alpha, \text{ pérdidas en el hierro, en watts por kilogramo, a la inducción prefijada (fig. 32).} \end{array} \right.$

También puede utilizarse la fórmula siguiente, deducida con criterio distinto, y que corresponde en forma óptima a una determinada relación entre peso de hierro y peso de cobre:

$$S(\text{cm}^2) = 36 \sqrt{\frac{P}{f q B}} \left\{ \begin{array}{l} \text{igual nomenclatura} \\ \text{que en la fórmula} \\ \text{precedente.} \end{array} \right.$$

Para $f = 50 \text{ c/s}$ $q = 2 \text{ amperes/mm}^2$ y $B = 10.000 \text{ gauss}$ se puede aplicar la fórmula

$$S(\text{cm}^2) = 1,1 \sqrt{P(\text{watts})}$$

que es un promedio del resultado de las dos fórmulas anteriores, y que supone en la primera una pérdida en el hierro de 2 watts por kilogramo aproximadamente.

Criterios de elección

- 1° Si interesa obtener un transformador de buena regulación entre régimen de plena carga y funcionamiento en vacío, deben proyectarse bobinados de baja resistencia propia y de baja dispersión mutua. Esto exige que el espesor radial del carrete sea mucho menor que el lado menor de la sección del núcleo: se requiere gran sección de hierro, gran peso de hierro y baja pérdida propia del mismo (hierro de buena calidad). El diseño resulta en pocas espiras y baja inductancia propia. Este tipo de transformador suele presentar fuertes extracorrientes al conectarlo a la línea.
- 2° Si se desea un diseño con escasa corriente en vacío a costa de una regulación inferior, puede tolerarse mayor dispersión mutua, o sea, mayor espesor radial del carrete respecto del diámetro equivalente del núcleo. Esto permite núcleo de menor sección y menor peso, pudiendo usarse hierro de menor calidad. Resultan mayores números de espiras y aumenta el peso de cobre en forma que puede ser muy pronunciada.

Longitud de circuito magnético: Conviene conocerla para poder realizar pre-diseños rápidos. Para la nomenclatura de la figura 27, la longitud aproximada del circuito magnético es

$$l_k = 4a + 2(H + b)$$

y el volumen de hierro es

$$V_k = l_k S,$$

siendo S la sección de la barra en el núcleo de columna (figura superior) o de la rana central en el núcleo acorazado (figura inferior).

Transformadores con núcleo acorazado

La sección se obtiene como se indicó precedentemente. La longitud de circuito magnético resulta comprendida entre

$$l_k = 4\sqrt{S} \quad \text{y} \quad l_k = 8\sqrt{S}$$

según las proporciones de núcleo. Una aproximación para pre-diseños es

$$l_k = 6\sqrt{S} \quad (S \text{ en cm}^2; l_k \text{ en cm})$$

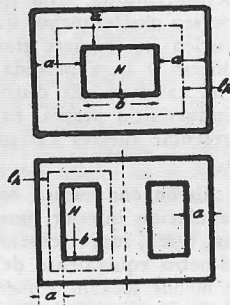


Fig. 27

Las proporciones aceptables de la ventana son

$$\frac{H}{b} = 1,5 \text{ a } 3$$

Transformadores con núcleo a columnas, monofásicos

La sección de núcleo puede obtenerse como para el caso anterior. La longitud del circuito magnético conviene de $8\sqrt{S}$ a $12\sqrt{S}$.

Las proporciones aceptables de la ventana son

$$\frac{H}{b} = 2 \text{ a } 5$$

Transformadores con núcleo a columnas, trifásicos

La sección de la columna central, en transformadores de cierta potencia, se hace distinta de las exteriores para tener

en cuenta la diferencia entre las respectivas longitudes efectivas de circuito magnético. La corriente magnetizante en la bobina central es menor que en las exteriores, si las secciones de núcleo son iguales. En potencia moderada, el des-equilibrio así introducido no es importante, mientras no se trabaje con altos valores de inducción.

La sección por rama puede estimarse con la fórmula

$$S(\text{cm}^2) = 15 \sqrt{\frac{Pq}{fB\alpha}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{igual nomenclatura} \\ \text{que en el primer} \\ \text{caso.} \end{array} \right.$$

Las proporciones aceptables de la ventana son

$$\frac{H}{b} = 3 \text{ a } 7$$

b) Espiras por volt: n

$$n = \frac{N}{E} = \frac{22.500}{fBS} \quad \left\{ \begin{array}{l} f, \text{ en ciclos/s} \\ B, \text{ en miles de gauss} \\ S, \text{ en cm}^2 \end{array} \right.$$

Para $f = 50 \text{ c/s}$ $B = 10.000 \text{ gauss}$, resulta

$$n = \frac{45}{S}$$

- c) Espiras primarias $N_p = n \cdot E_p$ $\left\{ \begin{array}{l} E_p E_s, \text{ tensiones} \\ \text{en volts eficaces} \end{array} \right.$
 d) Espiras secundarias $N_s = 1,05 \cdot n \cdot E_s$

e) Secciones de conductores *

Primario: $s_p = \frac{kP}{E_p q} \quad \left\{ \begin{array}{l} k, \text{ coeficiente que varía según} \\ \text{el uso del transformador, en-} \\ \text{tre } 1,1 \text{ y } 1,2, \end{array} \right.$

Secundario: $s_s = \frac{N_p}{N_s} s_p = \frac{I_s}{q} \quad \left\{ \begin{array}{l} q, \text{ en amperes por mm} \\ \text{cuadrado: el valor eficaz} \\ \text{de } I_s \text{ para casos de rectifi-} \\ \text{cadores se puede hallar en} \\ \text{la tabla de página 87.} \end{array} \right.$

* La tabla 4 permite hallar los diámetros de alambre.

f) Datos para pre-diseños

Para una primera estimación de peso, tamaño y costo, fijando previamente la potencia P y la densidad de corriente q , y para transformadores de proporciones usuales, se pueden aplicar las siguientes fórmulas aproximadas:

Peso de hierro G :

Para núcleo acorazado	$G = 0,047 S^{3/2}$	} G en kilogramos S en cm^2
Para núcleo de columna (monofásico)	$G = 0,071 S^{3/2}$	
Para núcleo de columna (trifásico)	$G = 0,133 S^{3/2}$	

Los valores de $S^{3/2}$ se pueden obtener en la fig. 28.

Peso de cobre: C

Siendo N_p las espiras primarias, puede estimarse el peso total de cobre del transformador (monofásico) con la fórmula

$$C_{(\text{gramos})} = 1,08 N_p s_p \sqrt{S} \quad \left\{ \begin{array}{l} S \text{ en } cm^2 \\ s_p \text{ en } mm^2 \text{ (secc. alambre primario)} \end{array} \right.$$

Caída relativa de tensión

La fórmula que sigue permite estimar la caída de tensión producida por la resistencia del alambre (no incluye la dispersión magnética) y referida a la tensión en vacío del bobinado considerado.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{23 q}{f B \sqrt{S}} \quad \left\{ \begin{array}{l} q, \text{ en amperes por } mm^2 \\ f, \text{ en ciclos} \\ B, \text{ en miles de gauss} \\ S, \text{ núcleo, } cm^2 \end{array} \right.$$

ΔE es la caída absoluta y E la tensión en vacío. Para $f = 50$ c/s y $B = 10.000$ gauss resulta:

$$\frac{\Delta E}{E} = 0,046 \frac{q}{\sqrt{S}}$$

Se supone que la espira media tiene una longitud 50 % mayor (aprox.) que el perímetro de la sección del núcleo. Para diseños con gran núcleo y poca ventana el valor así obtenido resulta en exceso del real.

CALCULO GRAFICO DE $S^{3/2}$

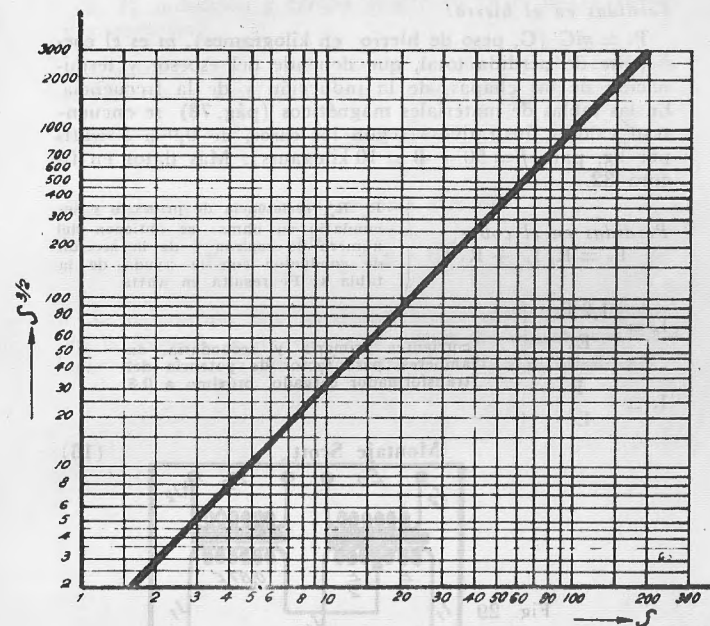


Fig. 28

Permite calcular groseramente los valores de la potencia $3/2$. Para cálculo exacto conviene el uso de logaritmos o de máquina calculadora.

Pérdidas en el cobre

Para $f = 50$; $B = 10.000$

$$\text{watts} = 0,09 \frac{q^2 s_p E_p}{\sqrt{S}} \left\{ \begin{array}{l} q, s_p \text{ y } S, \text{ como en las fórmulas precedentes} \\ E_p, \text{ tensión primaria} \end{array} \right.$$

Pérdidas en el hierro:

$P_h = mG$ (G, peso de hierro en kilogramos), m es el coeficiente de pérdida total, que depende del espesor y terminación de las chapas, de la inducción y de la frecuencia. En las tablas de materiales magnéticos (pág. 78) se encuentran valores ilustrativos (según los casos, de 0,9 a 5 watts por kg, para $f = 50$ y $B = 10$ kilogauss). Más datos en figura 32.

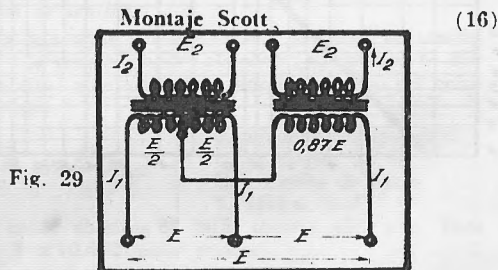
Pérdidas en el cobre:

$$P_c = R_p I_p^2 + R_s I_s^2$$

R_p, R_s , resistencia de primario y secundario en ohms: se obtienen del número de espiras y de la sección de conductor con la ayuda de la tabla 4; P_c resulta en watts.

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{1,2 P}{E_p} \\ I_s &= \frac{P}{E_s} \end{aligned}$$

corrientes primaria y secundaria, en amperes, para factor de potencia del transformador cargado, próximo a 0,8



$$P_{1A} = 1,73 E \cdot I_1 = 2 E_2 I_2$$

Si $E_2 = E$

$$\begin{aligned} P_{1A} &= 2 E I_2 & I_1 &= \frac{2}{1,73} I_2 = 1,15 I_2 \\ & & I_2 &= 0,866 I_1 \end{aligned}$$

Transforma tensión trifásica en bifásica.

ELECTROIMANES EN HERRADURA

(5-6)

B, H , inducción y campo magnético en el hierro (gauss y gilberts/cm).

S , sección activa (doble de la sección polar) (cm^2); e , entrehierro en cm (para un solo polo); NI , amperes-espiras.

$$\text{Sin entrehierro. Fuerza portante } F_{12} = \frac{B^2 S}{8 \pi} \times 1,02 \cdot 10^3$$

Con entrehierro apreciable. Fuerza atractiva

$$F_{12} = \left(\frac{NI}{c} \right) \cdot \pi S \cdot 10^3$$

Se supone que hay igual entrehierro sobre ambos polos en la fórmula, e representa la mitad del entrehierro total existente, o sea la distancia entre el imán y la armadura.

h) ALGUNOS DISEÑOS PRACTICOS DE TRANSFORMADORES

N°	Potencia kVA (primario)	No de fases	Frec. f c/s	Sección núcleo cm ²	Ventana		Corriente primaria I _p (amperes)		Tensión primaria entre fases	Espiras primarias (por columna) N _p	
					Altura H (cm)	Ancho b (cm)	En vacío	En carga			
1	0,075	1	50	16*	4,1	1,6	0,92	2,7	92,5	298	Refrigeración por aire
2	1,00	1	42	34†	25	6,3	0,34	9,1	3000	2484	
3	15	1	42	86†	49	10	5,1	68	3000	864	
4	25	1	42	133†	60	12,5	8,5	227	3000	766	
5	75	3	50	177†	70	15	15	350	3000	611°	
6	0,08	1	50	12*	4,8	1,6	—	—	220**	825	
7	0,80	1	50	36†	13	7	—	—	380**	590	
8	3,20	3	50	64†	22	7	—	—	380**	205°	
9	4,00	3	50	42†	19	6	—	—	380	241°	
10	5,1	3	50	51	33	6,9	0,21	14,8	15000	8940	Refrigera- ción por aceite
11	12,8	3	50	72	40	7,5	0,52	37	15000	6020	
12	40	3	50	113	50	8,4	1,64	116	15000	3620	
13	30	2	50	150	30	18	—	—	380**	79°	

* Núcleo acorazado; † núcleo a columnas; ° bobinados en estrella.

** Secundario para rectificador.

TABLA 14. — MATERIALES MAGNETICOS (5-10-13-16)

MATERIAL	Fuerza coercitiva gilberts/cm.	Magnetismo remanente (gauss)	Permeabilidad máxima μ máx.	Inducción de saturación (gauss)	Peso específico gr/cm ³
Hierro electrolítico.....	2,83	11.400	1.850	21.620	7,85
Hierro laminado recocido.....	1,30	9.400	3.270	20.500	—
Acero blando.....	1,51	10.600	3.550	21.420	—
Acero al tungsteno.....	64,0	9.600	105	13.600	7,9
Acero al cromo.....	64,0	9.000	94	12.600	7,9
Acero al cobalto (15 %).....	192,0	8.000	—	—	8,0
Acero al silicio.....	—	—	aprox. 7.000	21.000	7,5

MATERIALES MAGNETICOS COMERCIALES (5-10-13-16)

MATERIAL	Fuerza coercitiva gilberts/cm.	Magnetismo remanente (gauss)	Permeabili- dad máxima μ máx.	Inducción de satura- ción (gauss)	Peso específ. gr/cm ³	Coefficiente de histéresis (Steinmetz)	Pérdidas con B = 10.000 g f = 50 c/s chapa 0,35 mm. watts/kg
Permalloy.....	0,06	—	{ 60.000 105.000 490.000	{ 8.000 10.700	—	—	—
Permalloy especial.....	—	—	—	—	—	—	—
Armco Electric.....	—	—	—	21.000	7,7	3,8×10 ⁻⁴	2,08
Armco TranCor 1.....	—	—	6.650	19.800	7,5	6×10 ⁻⁴	1,35
Armco TranCor 6.....	—	—	9.600	19.300	7,5	4×10 ⁻⁴	0,93
Acero al carbono 1 %.....	48	8.600	—	—	—	—	—
Acero al cobalto-tung- steno-cromo.....	240	9.600	—	—	—	—	—
Alnico V.....	550	12.500	—	—	7	—	—