



ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS TRANSFORMADORES

NOCIONES HISTÓRICAS SOBRE EL TRANSFORMADOR

El primer transformador fue construido por M. Faraday (1831) cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética. El aparato que usó consistió en dos bobinas enrolladas una encima de la otra. Faraday no puso mayor atención en este aparato, ya que estaba interesado en otras cosas.

Fue hasta 1878, cuando el científico ruso **P. N. Yablochkov** construyó la primera planta comercial para la alimentación de un nuevo tipo de lámparas eléctricas inventadas por él conocidas como bujías Yablochkov. Para esta nueva central de energía, Yablochkov creó en cooperación con los talleres Gramme Engineering Works de Francia un generador síncrono y para mejorar el trabajo de la instalación, fabricó un transformador que tenía un circuito magnético abierto. Aunque fue impugnada la originalidad de este invento, las patentes concedidas a Yablochkov en 1876 y 1877 aunadas a la evidencia del relato sobre la iluminación en la Exposición mundial de París y el informe publicado por la Compañía Francesa de Iluminación Eléctrica, no deja lugar a dudas de que Yablochkov fue el primero que lo utilizó en una planta industrial comercial.

Lucien H. Gaulard, inventor francés y **John D. Gibbs**, ingeniero inglés, obtuvieron en 1882 una patente para un dispositivo que llamaron generador secundario. El sistema que ellos patentaron fue una versión poco práctica de lo que actualmente llamamos un transformador. Demostraron su sistema en Inglaterra en 1883 y en Italia en 1884.

Entre los visitantes a sus exposiciones estuvieron tres húngaros : **Otto T. Bláthy**, **Max Déri** y **Karl Zipernowski**. Ellos mejoraron el diseño del transformador y en 1885 presentaron en la exposición Nacional Húngara (en Budapest), lo que resultó ser prototipo del sistema de iluminación que se utiliza en la actualidad. Sus sistema tenía 75 transformadores conectados en paralelo que alimentaban 1067 lámparas incandescentes



del tipo Edison. El sistema era alimentado por un generador de ca de 1350 volts. La construcción de los transformadores era laboriosa y cara. Otto T. Bláthy fue el primero en usar la palabra transformador.

George Westinghouse (industrial norteamericano) presenció la demostración de Gaulard y Gibbs en Italia y conocía el sistema construido por Edison en Nueva York, del cual no era simpatizante, ya que estaba consciente de sus desventajas¹. En 1884 Westinghouse contrató a **William Stanley** (joven ingeniero eléctrico). En 1885 Stanley ya había diseñado varios tipos de transformadores superiores a los de los húngaros. Stanley construyó con la ayuda de otros científicos, transformadores con laminillas de hierro, las cuales disminuían las pérdidas de energía. En 1886 entró en operación una planta construida bajo la dirección de Stanley en el pueblo de Great Barrington , Massachussetts. Esta planta operó con ca, con un generador de 500 volts y alimentó un conjunto de lámparas a una distancia de 2 km. Utilizando transformadores redujeron el voltaje a 100 V, que es el valor que se requiere para hacer funcionar las lámparas. De esta manera Westinghouse inició la manufactura y venta de equipos para distribuir electricidad de ca.

En 1891 el ingeniero **Braun** (director de los talleres Oerlikon de Suiza) construyó el primer transformador de 30 kV sumergido en aceite ; este valor de tensión era elevadísimo en aquel tiempo desde entonces, los transformadores utilizan aceite.

A 166 años de la invención del transformador, en la actualidad no se vislumbran cambios notables en las formas convencionales de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, es decir, seguirán existiendo subestaciones eléctricas como las que operan actualmente, quizás con algunas variantes, pero la transmisión y distribución de la energía eléctrica no tendrá cambios sustanciales, por lo que se puede concluir que el transformador seguirá utilizándose por mucho tiempo.

¹ Debido a la caída de voltaje a lo largo de las líneas de transmisión de corriente directa, la longitud de éstas debían ser relativamente cortas ; esto requería tener plantas generadoras cercanas a los centros de consumo, lo que resultaba poco práctico y costoso.

DEFINICIÓN DE UN TRANSFORMADOR

Un transformador es un máquina eléctrica estática que $\square\square$ (ver Fig. 2.1) :

a). Consta de dos o más circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Uno de los circuitos eléctricos (el devanado primario) se conecta a una fuente de potencia y el segundo circuito (el devanado secundario) entrega potencia eléctrica a la carga. Cuando existe un tercer devanado se llama terciario².

b). Al transferir la energía de un circuito a otro no cambia la frecuencia de los voltajes y corrientes, solamente cambian los niveles de voltaje y corriente.

c). Funciona en base al principio de inducción electromagnética, descubierto por M. Faraday. Este principio se presenta cuando a través de una bobina se hace pasar un campo magnético variable con el tiempo y se induce un voltaje en dicha bobina.

d). Los circuitos eléctricos (primario y secundario) están aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas es a través del flujo magnético que se establece en el núcleo.

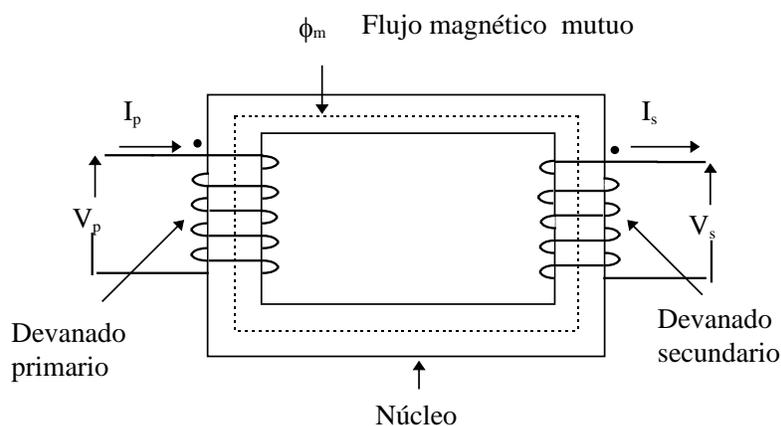


Fig. 2.1. Transformador con núcleo de hierro.

² Estos devanados suministran la tensión necesaria para los servicios auxiliares de la subestación o para una distribución local. Pueden conectarse al terciario condensadores estáticos o síncronos con objeto de corregir el factor de potencia.

Cuando se alimenta con una tensión de corriente alterna el primario del transformador, se induce una tensión en el secundario del transformador (éste puede estar abierto o cerrado). Ver Fig. 2.2.

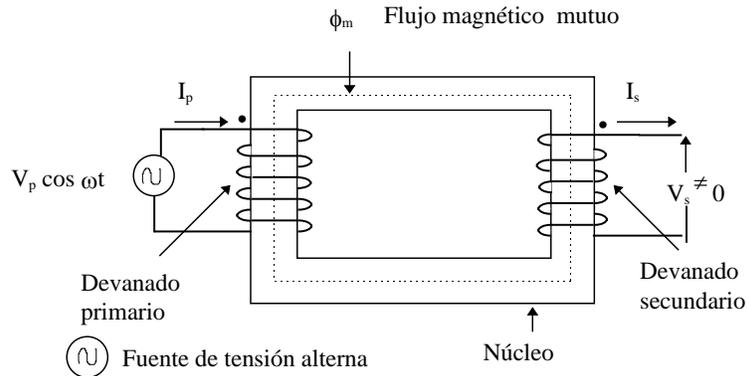


Fig. 2.2. Transformador con núcleo de hierro alimentado con una fuente de corriente alterna.

Sin embargo, cuando se alimenta con una tensión de corriente directa el primario del transformador, no se induce una tensión en el secundario del transformador (éste puede estar abierto o cerrado). Solamente se inducen voltajes en el secundario cuando se abre y se cierra continuamente el circuito primario. Ver Fig. 2.3.

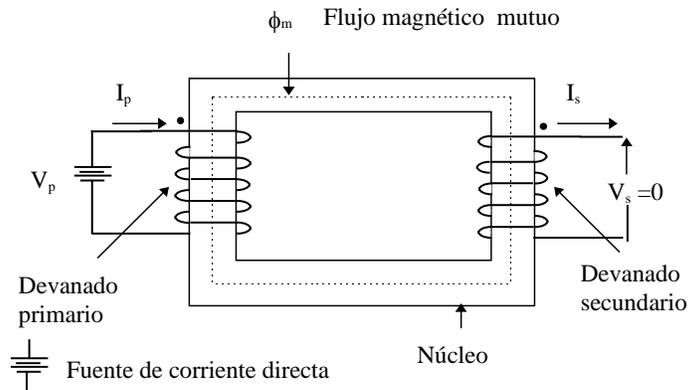


Fig. 2.3. Transformador con núcleo de hierro alimentado con una fuente de corriente directa

IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES

Sin el transformador no se podría utilizar la potencia eléctrica en muchas de las formas en las que se utiliza en la actualidad. Un transformador cambia un nivel de voltaje de ca en otro nivel de voltaje³, sin afectar la potencia real suministrada. En las centrales generadoras se eleva el voltaje para transmitirlo a largas distancias con pérdidas mínimas y se disminuyen en las subestaciones de distribución para su utilización. Las pérdidas en las líneas de transmisión se calculan con $I^2 R$, elevar el voltaje transmitido, reduce las pérdidas enormemente □□ Ver. Fig. 2.4.

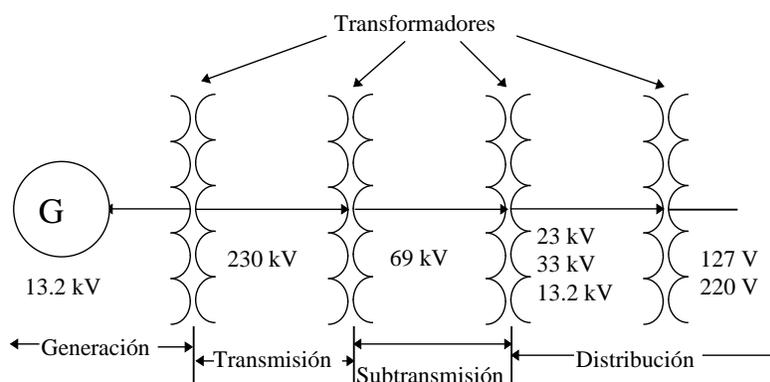


Fig. 2.4. Sistema de potencia eléctrica que muestra los componentes básicos.

➤ Clasificación de los transformadores

Los transformadores se clasifican de acuerdo a diferentes factores □□

a) Capacidad

- Transformadores de distribución. Son aquellos cuya capacidad se encuentra entre 5 y 500 KVA y los hay de diversos tipos en función de su uso o localización, por ejemplo : tipo poste, tipo pedestal, en bóveda, para red secundaria.

³ Si eleva el nivel de voltaje de un circuito, debe disminuir la corriente para conservar invariante la potencia de entrada y de salida del transformador.

- Tipo poste. Diseñados para distribución aérea(montados en el poste). Pueden ser tipo monofásicos (normal, tipo YT, autoprotegido, tipo costa) y trifásico. Ver Fig. 2.5 y Fig. 2.6.

Los transformadores autoprotegidos están provistos de un apartarrayos de alta tensión, un fusible de expulsión en alta tensión y un interruptor en el secundario. Para la protección contra sobretensiones, el apartarrayos se monta directamente en el tanque del transformador. Para protección contra fallas secundarias y sobrecargas, se instala un interruptor térmico o termomagnético, dentro del transformador y se conecta entre la bobina y los aisladores de baja tensión. Para indicación visual de condiciones antieconómicas de carga, la luz de señalización se monta en la pared exterior del tanque del transformador cerca de la manija de operación del interruptor.

Los transformadores YT (estrella aterrizada) son comúnmente utilizados en zonas rurales. Tienen la característica de que permiten un ahorro en líneas de transmisión, ya que sólo se requiere una fase. El voltaje al que opera el devanado del transformador es menor al voltaje al que opera la línea.

El transformador tipo costa opera en ambientes de alto índice de contaminación. Esto se logra sustituyendo las boquillas de alta tensión por las correspondientes a la clase de aislamiento inmediata superior. Para poder realizar esta sustitución se requiere cambiar la cubierta del transformador.



Fig. 2.5. Transformadores tipo poste monofásicos



Fig. 2.6. Transformadores tipo poste trifásico

- *Tipo subestación.* Está diseñado para distribución trifásica local, es decir en el sitio de consumo. Se instala directamente sobre el piso, dentro de la subestación. Ver Fig. 2.7.



Fig. 2.7. Transformadores tipo subestación



Fig. 2.8. Transformadores tipo pedestal trifásicos



Fig. 2.9. Transformador tipo pedestal monofásico

- *Tipo pedestal.* Están diseñados para alimentar cargas de distribución residencial y comercial subterráneas, tales como : fraccionamientos, hoteles, hospitales y centros comerciales. Pueden ser monofásicos y trifásicos. Se llaman pedestales porque se instalan sobre un pedestal de concreto es espacios abiertos (jardines, aceras, camellones, etc.). Forman una subestación compacta que integra todos los elementos de conexión-desconexión y protección de la red. Ver Fig. 2.8 y Fig. 2.9.

Están diseñados para operar en sistemas de alimentación en anillo, como se muestra en la Fig. 2. 10, ya que cuentan con dos boquillas de alta tensión por fase. Sin embargo, pueden utilizarse en sistemas de alimentación radial utilizando una sola boquilla de alta tensión por fase. En operación radial el transformador es conectado en forma individual a la fuente de alimentación y los transformadores trifásicos tienen tres boquillas en el lado de alta tensión. Se dice que el transformador opera en anillo cuando el transformador puede ser alimentado por dos fuentes de alimentación diferentes. En este caso puede formar parte de un sistema de distribución que interconecte varios transformadores entre sí. La ventaja inherente de esta configuración es continuidad en el servicio. Para fines de identificación, los transformadores trifásicos (en operación en anillo) tienen 6 boquillas en el lado de alta tensión y los monofásicos tienen solamente dos boquillas en el lado de alta tensión.

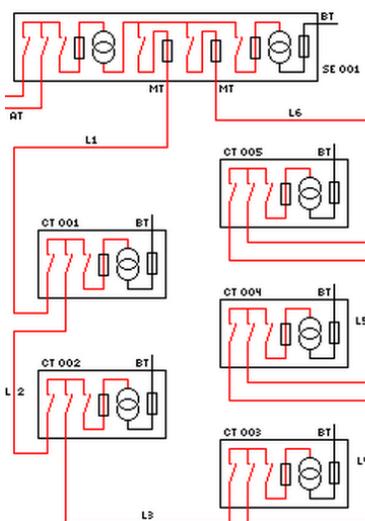


Fig. 2. 10. Alimentación en anillo

- *Tipo pozo (llamados también tipo bóveda o sumergibles⁴)*. Se conectan en las redes de distribución subterráneas. Son instalados en bóvedas normalmente bajo el nivel del piso. Son apropiados para instalarse en lugares donde no se tiene espacio disponible a nivel de piso o bien en lugares donde se requiere seguridad por ser zonas muy

⁴ Eventualmente pueden ser cubiertos por agua.

concurridas por personas. La mayor parte de sus accesorios son colocados en la cubierta del tanque del transformador. Al igual que los pedestales forman una subestación compacta que integra todos los elementos de conexión-desconexión y protección de la red (Ver Fig. 2.11). Están diseñados para operar en sistemas de alimentación en anillo o sistemas de alimentación radial.



Fig. 2.11. Transformadores tipo pozo trifásicos

Transformadores de potencia. Son aquellos transformadores mayores de 500 kVA.

Los transformadores de pequeña potencia usualmente abarcan capacidades que van desde los 750 hasta los 3000 kVA. Estos pueden fabricarse con gargantas para acoplamiento a tableros de distribución. Se utilizan para cargas industriales. Ver Fig. 2.12.



Fig. 2.12. Transformadores de pequeña potencia de 750 a 1500 kVA.

b) **Utilización**

Transformadores para generador. Son transformadores de potencia que van conectados a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.

Transformador subestación. Son transformadores de potencia que van conectados al final de la línea de transmisión para reducir el voltaje a nivel de subtransmisión.

Transformadores de distribución. Reduce el voltaje de subtransmisión a voltajes de consumo.

c) **Transformadores especiales.** Aquí se encuentran los reguladores de voltaje, transformadores para horno de arco eléctrico, autotransformadores, transformadores para mina, etc.

Reguladores de voltaje. Se alimentan con un voltaje variable y lo transforman a un voltaje uniforme mediante un cambiador de derivaciones que opera bajo carga.

Transformadores para horno de arco eléctrico. Los transformadores para horno suministran energía a los hornos eléctricos en los tipos de inducción, resistencia, arco abierto y arco sumergido. Por los secundarios de estos transformadores circulan altas corrientes⁵.

⁵ Esto se logra al conectar en paralelo muchas secciones del devanado.



Autotransformadores. Son transformadores en los que existe conexión entre el primario y el secundario del transformador. En el autotransformador, la misma bobina sirve como primario y secundario y se utiliza en aplicaciones donde la relación de transformación no difiere grandemente de la unidad y que no requiere que la bobina secundaria este aislada de la bobina primaria.

d) **Número de fases**

Monofásicos Son transformadores de potencia o de distribución que se conectan a una línea y un neutro. Tienen 1 devanado de alta tensión y 1 devanado de baja tensión.

Trifásicos. Tienen 3 devanados de alta tensión y 3 devanados de baja tensión. Pueden estar o no conectados a un neutro común.

e) **Sistemas de disipación del calor**

Tipo seco. Su aislamiento depende fundamentalmente de materiales que soportan hasta 180 ° C (mica, fibra de vidrio, resinas, etc.). Se enfrían por aire natural o aire forzado.

Sumergidos en líquido aislante. Su aislamiento depende de materiales que pueden operar hasta 130 ° C, sumergidos en líquidos aislantes tales como aceite mineral, silicón, etc.

f) **Transformadores para instrumento**

Son los transformadores que se utilizan para la conexión de los instrumentos. Existen dos tipos de transformadores de instrumento :

Transformadores de corriente (TC's). Se conectan en serie con la línea para transformar altos valores de corriente a un valor nominal de aproximadamente 5 Amp para los amperímetros y los wattómetros.

Transformadores de potencial (TP's). Usualmente transforman voltajes altos a aproximadamente 115 Volts secundarios para alimentar voltímetros y wattómetros además de los relevadores y aparatos de control.



g) **De acuerdo al medio refrigerante.** La capacidad de los transformadores (y en general de todo aparato eléctrico) está íntimamente ligada a sus posibilidades de enfriamiento de las partes activas (conjunto núcleo bobinas) . El medio refrigerante de los transformadores sumergidos en aceite puede ser :

- Tipo ONAN (OA) (Oil-Air). Es un transformador sumergido en aceite con enfriamiento natural. Este es el enfriamiento más comúnmente utilizado y más económico. En estos transformadores el aceite dieléctrico circula por convección natural dentro del tanque con paredes lisas o corrugadas, o bien provisto de radiadores.
- Tipo ONAF (FA) (Force Air). Es básicamente una unidad OA a la que se le agrega un sistema de circulación forzada de aire a base de ventiladores para aumentar la disipación del calor en las superficies de enfriamiento. El empleo de este sistema de enfriamiento se recomienda cuando el transformador debe soportar sobrecarga durante períodos cortos.
- Tipo ONAN/ONAF/ONAF (OA/FA₁/FA₂) . Es básicamente una unidad OA a la que se le agrega un sistema de circulación forzada de aire a base de ventiladores en dos pasos (con dos grupos de ventiladores).
- Tipo ONAN/ONAF/OFAF (OA/FA/FO) (Force Oil). Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado y a base de aceite forzado. El arranque y parada de los ventiladores y bombas se controlan por la temperatura del aceite, se utilizan controles automáticos que seleccionan la secuencia de operación al aumentar la carga del transformador.
- Tipo OW (Oil- Water). Sumergido en aceite, y enfriamiento con agua. Este tipo de transformador está equipado con un cambiador de calor tubular colocado fuera del tanque. El agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente.



COMPONENTES PRINCIPALES DEL TRANSFORMADOR

Las partes externas más importantes del transformador de distribución sumergido en aceite son

- a). Tanque. El tanque es el recipiente que contiene el conjunto núcleo bobinas y líquido refrigerante. Se construye con lámina de acero para proporcionar soporte mecánico, superficie de disipación de calor y protección contra la introducción de aire y humedad al interior del transformador.
- b). Boquillas aislantes (bushings). Permiten la entrada y la salida de los conductores de cada bobina a través del tanque. Están formadas por un cuerpo aislador y un conector o terminal. El aislador puede ser de porcelana o de resina epóxica.
- c). Válvula de muestreo y drenaje. Normalmente se encuentra localizado en la parte inferior del tanque y se utiliza para hacer las extracciones de muestras de aceite y en algunos casos para efectuar el cambio de aceite del transformador.
- d). Conexión a tierra. Consiste de un conector dispuesto en el exterior del tanque para conectarlo a tierra y desviar las posibles corrientes de fuga por fallas de aislamiento del transformador.

Algunos de los transformadores tienen además de lo anteriormente mencionado : aparatos indicadores del nivel de aceite, válvulas de seguridad, etc.

Las partes internas más importantes del transformador son las siguientes :

- a). Núcleo. El núcleo es de un material formado de láminas (acero al silicio) aisladas entre sí y sirve para canalizar y aumentar la intensidad del campo magnético.
- b). Las bobinas. Constituyen los circuitos de alimentación y de carga ; pueden ser de alambre delgado o grueso dependiendo de la corriente. La función del devanado primario es crear un campo magnético y utilizar el flujo para inducir un voltaje en el secundario.
- c). Las derivaciones (taps). Generalmente se encuentran en las bobina de alta tensión del transformador y sirven para hacer variar el número de vueltas de la bobina.



d). Aceite. Cumple dos funciones importantes a saber : para el enfriamiento del interior del transformador cuando está en operación y como aislamiento entre las bobinas y entre las bobinas y el tanque.

PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El fenómeno de inducción electromagnética toma lugar solamente en el transformador cuando el flujo magnético es variante en el tiempo⁶. Si se voltaje de ca se aplica al primario del transformador con el devanado secundario en circuito abierto, una corriente muy pequeña fluirá por el primario y tiene la función de magnetizar el núcleo y alimentar las pérdidas del hierro del transformador. De esta manera un flujo magnético se establece en el núcleo, lo cual induce un voltaje tanto en el circuito primario y secundario □□ El flujo magnético que eslabona ambas bobinas tiene la forma :

$$\phi = \phi_m \text{ sen } (\omega t) \quad (2.1)$$

Aplicando la Ley de Faraday, el voltaje inducido en el devanado primario está dado por :

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$e_1 = N_1 \omega \phi_m \cos (\omega t) \quad (2.3)$$

como $\omega = 2 \pi f$

$$e_1 = 2 \pi f N_1 \phi_m \cos (\omega t) \quad (2.4)$$

⁶ En el caso de que se aplique voltaje de cd al primario del transformador se inducirá voltaje en el secundario solamente si se abre y cierra continuamente el circuito primario.



Expresando e_1 en valor eficaz⁷ :

$$e_{1(\text{rms})} = \frac{2 \Pi f N_1 \phi_m}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

Puesto que $\phi_m = AB_m$,entonces :

$$e_{1(\text{rms})} = 4.44 f N_1 A B_m \quad (2.6)$$

- en donde
- ω = Frecuencia angular, rad/seg
 - B_m = Densidad de flujo máxima, Teslas⁸
 - A = Sección transversal del núcleo, m²
 - f = Frecuencia de la fuente de alimentación, Hz
 - ϕ_m Flujo magnético máximo a través del núcleo, weber
 - N_1, N_2 = Número de vueltas en el primario y secundario respectivamente
 - e_1, e_2 = Valor instantáneo del voltaje inducido en el primario y secundario respectivamente, Volts
 - $e_{1(\text{rms})}, e_{2(\text{rms})}$ = Valor eficaz del voltaje inducido en el primario y secundario respectivamente, Volts

Similarmente el voltaje secundario eficaz inducido en el secundario está dado por :

$$e_{2(\text{rms})} = 4.44 f N_2 A B_m \quad (2.7)$$

⁷ El valor rms (root-mean-square) de una función $f(t)$ se encuentra por medio de la expresión :

$$A_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [f(t)]^2 dt} , \text{ donde } T \text{ es la longitud de un período de la forma de la onda (en segundos).}$$

⁸ El valor de B_m tiene un límite superior debido a las pérdidas del hierro, la corriente de energización, así como también a la magnitud y distorsión de la corriente de magnetización. Para transformadores varía de 1.4...1.8 Teslas.



Las expresiones (2.6) y (2.7) se pueden escribir como :

$$\frac{e}{N} = 4.44 f A B_m \quad (2.8)$$

e/N son los volts por vuelta, los cuales son iguales para ambos devanados. En el diseño de transformadores B_m , A y f se conocen, así que las vueltas de cada devanado se determinan del voltaje especificado del devanado y de los volts por vuelta especificados.

CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Uno de los aspectos más importantes para el análisis del comportamiento de los transformadores lo constituyen los circuitos equivalentes, éstos deben reproducir de manera bastante aproximada el fenómeno físico a ser estudiado. Estrictamente, un transformador podría ser representado por una red compleja de resistencias, inductancias y capacitancias. La influencia de cada uno de estos parámetros en el transformador se considera de acuerdo con el fenómeno a ser estudiado. En otras palabras, los circuitos equivalentes del transformador pueden tener diferentes formulaciones matemáticas dependiendo del contexto de estudio □ De este modo un transformador se puede modelar como :

- Inductancia
- Red de capacitancias
- Combinación de las dos anteriores
- Inductancia no lineal
- Dependiente de la frecuencia

El circuito equivalente que se explica en la presente sección corresponde al comportamiento eléctrico y magnético del transformador en baja frecuencia⁹. En la Fig. 2.13 se muestra el circuito equivalente de un transformador real.

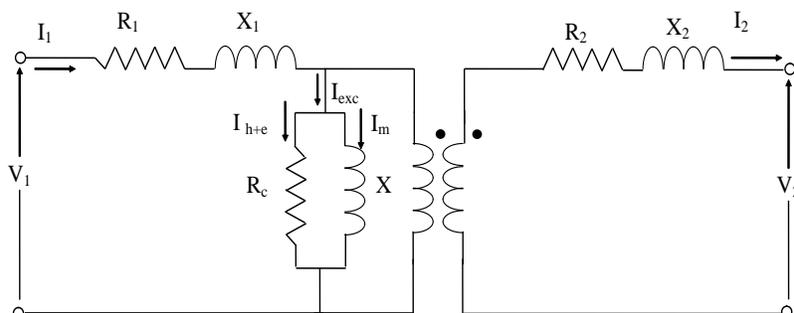


Fig. 2.13. Circuito equivalente del transformador

En el circuito de la Fig. 2.13 el subíndice 1 se refiere al primario y la 2 al secundario del transformador.

La corriente de excitación del transformador es la corriente que fluye por el primario cuando el secundario del transformador está en circuito abierto. La corriente de excitación está formada por dos componentes: la corriente de pérdidas en el núcleo (I_{h+e}) y la corriente de magnetización (I_m). La corriente de pérdidas en el núcleo es una componente de potencia real y se debe a las pérdidas en el núcleo. La corriente de magnetización es la responsable de que un flujo magnético circule por el núcleo.

La Fig. 2.14.a es un circuito equivalente del transformador referido a su lado primario y la Fig. 2.14.b es el circuito equivalente referido al lado secundario.

Por la rama de excitación circula muy poca corriente en comparación con la corriente I_1 en estado estable; por esta razón se puede trabajar con un circuito equivalente simplificado, en el cual la rama de excitación se mueve hacia la entrada del transformador y las

⁹ Esto es, a frecuencia de 50 Hz y 60 Hz

impedancias del primario y secundario se combinan en serie. Esto se indica en la Fig. 2.15.

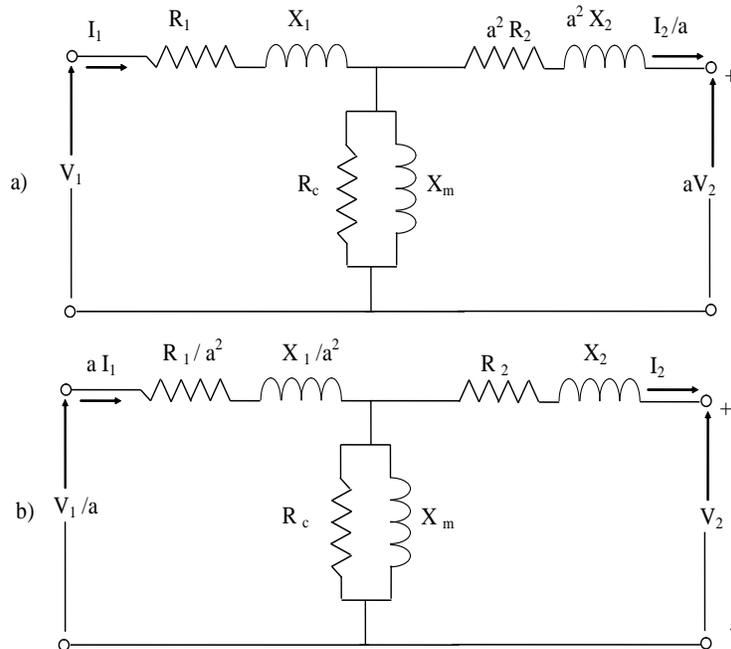


Fig. 2.14. a). Modelo del circuito equivalente del transformador referido al primario, b). Modelo del circuito equivalente del transformador referido al secundario.

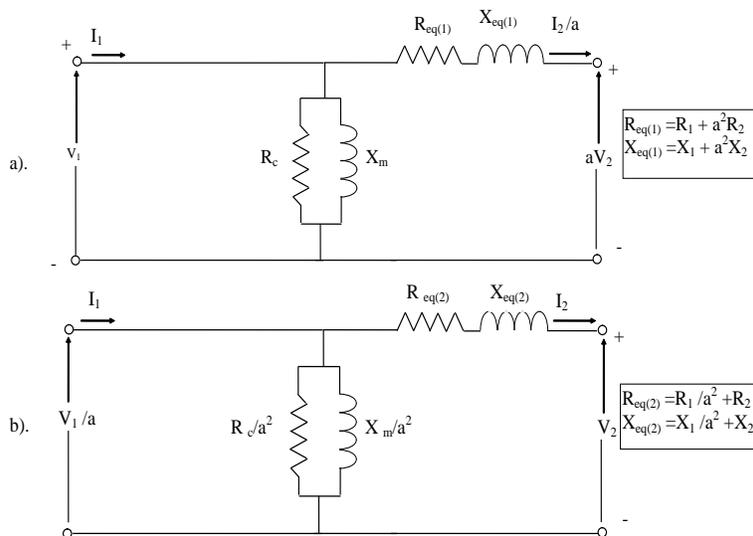


Fig. 2.15. Modelos aproximados del transformador : a). Referidos al lado primario ; b). Referidos al lado secundario.

En algunas aplicaciones, la rama de excitación puede eliminarse totalmente sin causar error apreciable. En este caso, los circuitos equivalentes del transformador se muestran en la Fig. 2.16.

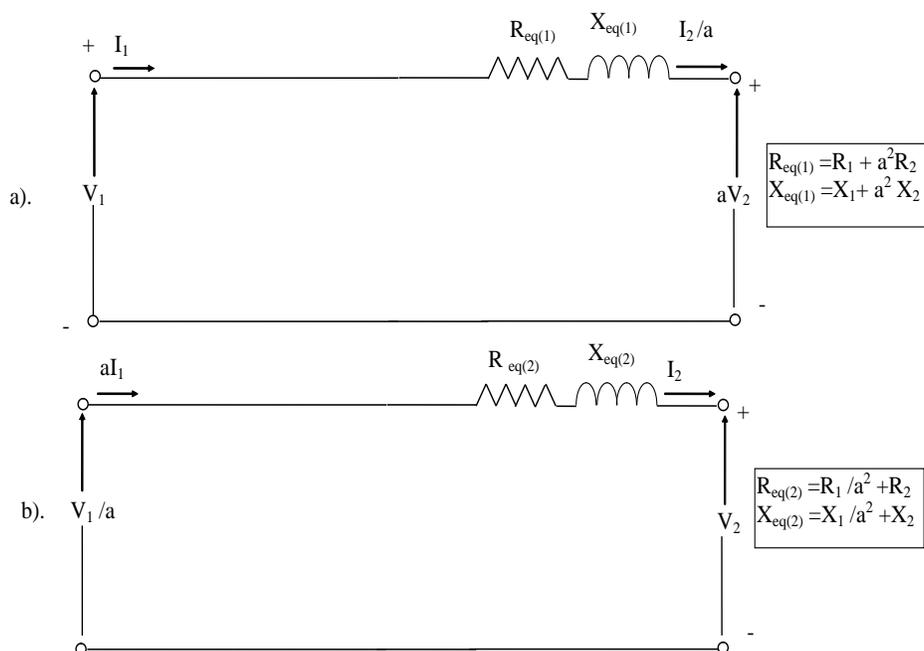


Fig. 2.16. Modelos aproximados del transformador sin rama de excitación : a). Referidos al lado primario ; b). Referidos al lado secundario.

CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

Los parámetros del circuito equivalente se pueden obtener de las pruebas de circuito abierto y corto circuito

La prueba de circuito abierto proporciona los parámetros de la rama de excitación y consiste en poner en circuito abierto el devanado secundario, en tanto el devanado primario se conecta a la línea a voltaje nominal ; en estas condiciones, la corriente (casi en su totalidad) debe fluir a través de la rama de excitación del transformador. Los elementos R_1 y X_1 se pueden considerar despreciables en comparación con R_c y X_m , ya que producen una caída de voltaje no significativa, así que todo el voltaje de alimentación

se aplica a través de la rama de excitación. Se deben tomar lecturas de voltaje, corriente y de potencia real como se muestran en la Fig. 2.17.a

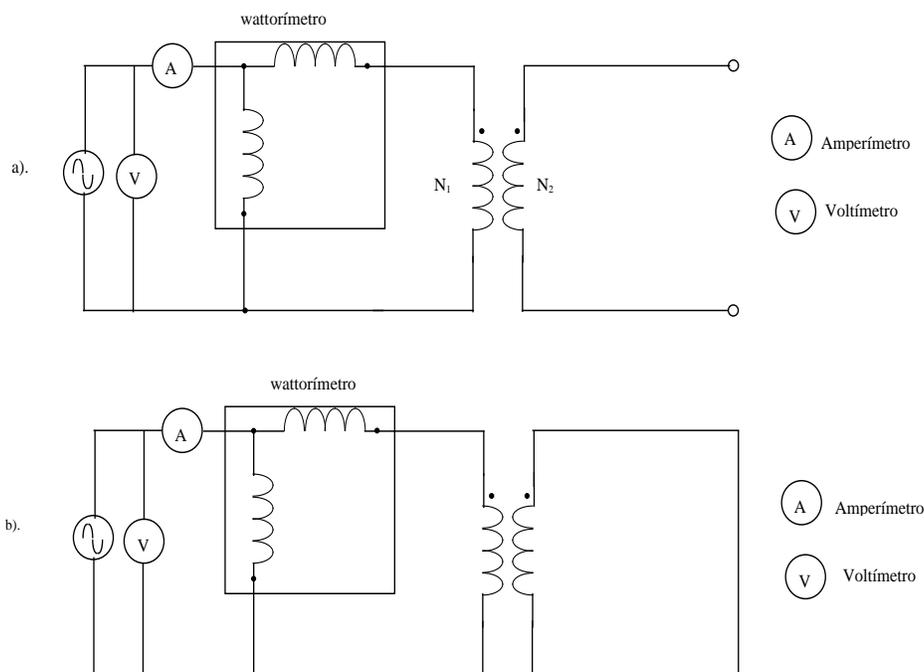


Fig. 2.17. a). Conexión para la prueba de circuito abierto del transformador, b). Conexión para la prueba de cortocircuito.

En la prueba de cortocircuito se cortocircuitan las terminales secundarias del transformador y el primario se alimenta de una fuente de voltaje ; el voltaje de alimentación se ajusta hasta que la corriente del devanado de cortocircuito alcanza la corriente nominal. Se deben tomar lecturas de voltaje, corriente y de potencia real, tal como se indica en la Fig. 2.17.b.

De la prueba de circuito abierto, la admitancia de excitación está dada por¹⁰ :

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\theta = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m} \quad (2.9)$$

¹⁰ Esta cantidad está expresada en forma fasorial y los fasores son cantidades complejas. Utilizando la identidad de Euler, se tiene que $F \angle \theta = F(\cos(\theta) + j\text{sen}(\theta))$



$$\text{donde } \cos(\theta) = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}}$$

La impedancia serie referida al lado primario del transformador se calcula mediante :

$$Z_{SE} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta = R_{eq} + j X_{eq} = (R_1 + a^2 R_2) + j(X_1 + a^2 X_2) \quad (2.10)$$

$$\text{Donde } \cos(\theta) = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc}}$$

EFICIENCIA DEL TRANSFORMADOR

La eficiencia de un transformador se define por :

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} 100 \% \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{perdidas}} 100\% \quad (2.12)$$

La eficiencia de los transformadores son algo mayores que las de las máquinas rotativas, para la misma capacidad en KVA, debido a que estas últimas poseen pérdidas adicionales.

Las pérdidas que se presentan en transformadores son las siguientes :

a). Pérdidas en el cobre ($I^2 R$). Estas son debidas a la resistencia primaria y secundaria del transformador.

b). Pérdidas por histéresis¹¹. Esta pérdida depende de la calidad de las láminas del núcleo utilizado. Es proporcional al peso del material utilizado y varía de acuerdo al valor de la densidad de flujo. Para minimizar estas pérdidas, el peso del material debería mantenerse tan bajo como se pueda y la densidad de flujo no debería ser alta. Sin embargo, la disminución de la densidad de flujo para reducir las pérdidas por histéresis implica el uso de una gran cantidad de hierro, el cual incrementa las pérdidas. Las pérdidas de histéresis varían directamente con la frecuencia.

c). Pérdidas por corrientes parásitas. La ley de Faraday explica las pérdidas por corrientes parásitas : un flujo variable en el tiempo, induce voltajes dentro del núcleo ferromagnético, ver Fig. 2.18. Estos voltajes causan remolinos de corriente, que al fluir por el núcleo originan calentamiento. Estas pérdidas son dependientes de la densidad de flujo utilizada, la calidad de las láminas del núcleo, el espesor de las láminas y de la eficiencia del aislamiento entre las láminas del núcleo. Estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Las pérdidas de este tipo pueden ser reducidas, al reducir el espesor de las láminas, pero se presentan las siguientes desventajas :

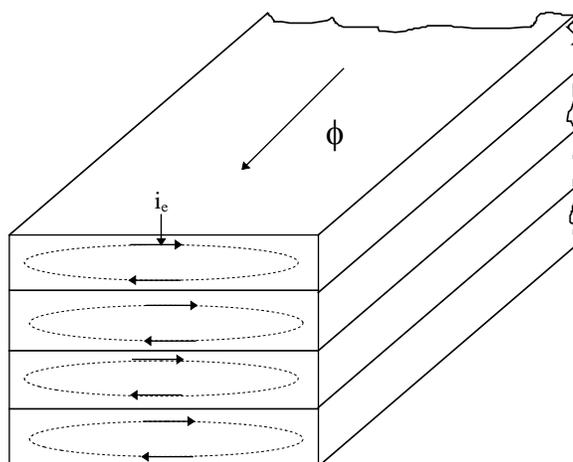


Fig. 2.18. Corrientes de eddy en un núcleo laminado. La corriente de eddy (i_e) depende del flujo por lámina y de la resistencia de la lámina.

¹¹ El tamaño del lazo de histéresis es proporcional a las pérdidas de histéresis.



- La suma total de los espesores del aislamiento entre las láminas es alto y se obtiene un factor de apilamiento.
- Es más difícil la manufactura del transformador.
- Mecánicamente los núcleos son más débiles.

Ya que la potencia de salida es :

$$P_{\text{sal}} = V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (2.13)$$

La eficiencia del transformador se puede expresar por :

$$\eta = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{cu}} + P_{\text{nucleo}} + V_2 I_2 \cos \theta_2} 100 \% \quad (2.14)$$

En la Fig. 2.19 se muestra la variación de la eficiencia de un transformador¹² en función de carga y a diferentes factores de potencia.

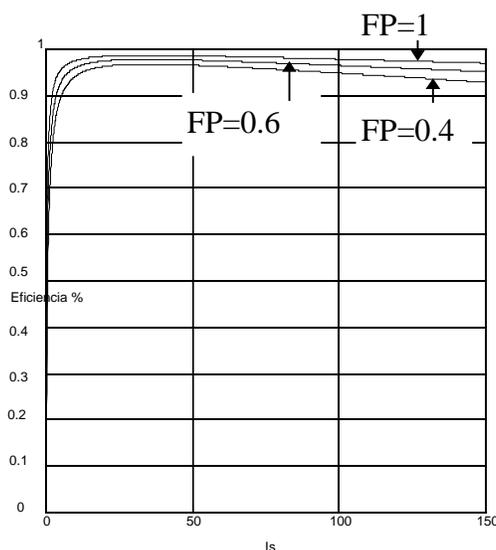


Fig. 2.19. Eficiencias del transformador contra corriente secundaria a diferentes factores de potencia,

¹² De 15 kVA de 2300/230, monofásico a 60 Hz



La eficiencia máxima tiene lugar cuando las pérdidas en el hierro son iguales a las pérdidas del cobre¹³, es decir, $P_{\text{núcleo}} = (I_2)^2 R_{\text{eq}(2)}$.

Para valores constantes de V_2 y I_2 , la máxima eficiencia ocurre cuando : $\frac{d\eta}{d\theta_2} = 0$, es decir, $\cos(\theta_2) = 1$.

La eficiencia se define por (Ver Fig. 2.20):

$$\eta = \frac{C}{P_{\text{Dev}} + P_{\text{fe}} + C} 100 \% \quad (2.15)$$

donde :

η = Eficiencia

C=Capacidad nominal del transformador en kVA

P_{fe} = Pérdidas máximas en el núcleo a tensión nominal en kW

P_{Dev} =Pérdidas máximas en los devanados a capacidad nominal kW a 85°C ó 75°C

Observaciones importantes de la Fig. 2.20 son las siguientes :

- A mayor capacidad del transformador se exige mayor eficiencia.
- A menor clase de aislamiento se tiene mayor eficiencia.

¹³ Suponiendo V_2 y $FP = \cos(\theta_2)$ constantes el máximo se calcula de $\frac{d\eta}{dI_2} = 0$

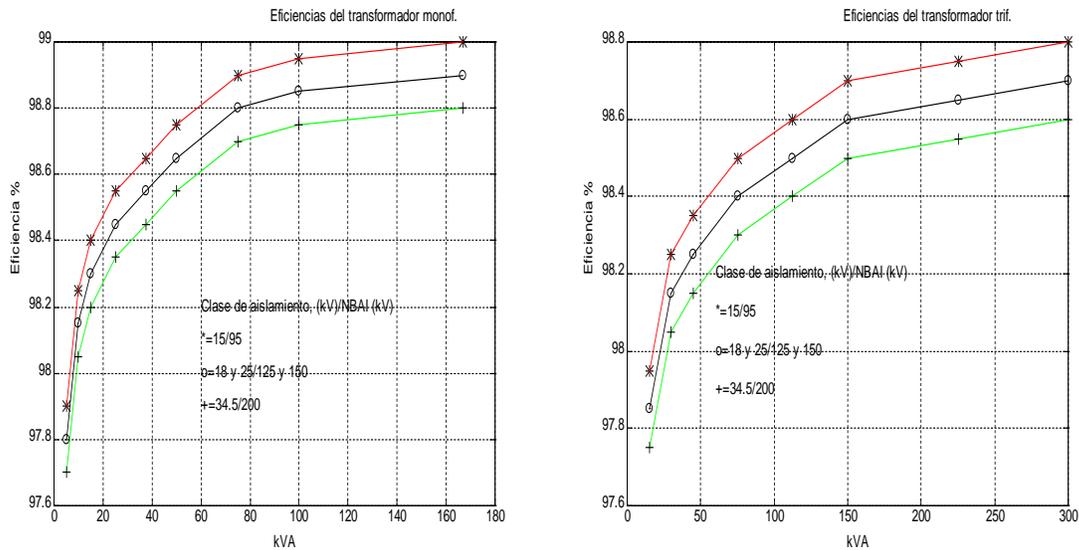


Fig. 2.20 Eficiencias exigidas en México para transformadores monofásicos y trifásicos.

NUCLEO DEL TRANSFORMADOR

a) Materiales utilizados en los núcleo

El material más comúnmente empleado en la fabricación de núcleos de transformadores se conoce como lámina de acero al silicio. Esta lámina consiste fundamentalmente de una aleación de hierro y silicio de bajo contenido de carbón y es obtenida a través de un proceso de rolado en frío. Adicionalmente, ambas caras de la lámina se recubren con un material aislante conocido como Carlite (Nombre patentado por la Cía ARMCO). Comercialmente existen varios tipos de aceros al silicio de diferentes espesores y pérdidas. La tabla 2.1 muestra un resumen de las características de aceros al silicio fabricados por la compañía ARMCO □



Tabla 2. 1. Designaciones del American Iron Steel Institute (AISI) y nombre comercial de la compañía ARMCO para aceros al silicio.

Tipo	Grado designación AISI	Nomenclatura ARMCO
Aceros al silicio no orientados	M-15	DI-MAX M-15
	M-19	DI-MAX M-19
	M-22	DI-MAX M-22
	M-27	DI-MAX M-27
	M-36	DI-MAX M-36
	M-43	DI-MAX M-43
	M-45	DI-MAX M-45
Aceros al silicio orientados	M-47	DI-MAX M-47
	M-3	M-3 Orientado
	M-4	M-4 Orientado
	M-5	M-5 Orientado
Aceros al silicio orientados de alta permeabilidad	M-6	M-6 Orientado
		TRAN-COR H-1 TRAN-COR H-2

b) Acero amorfo

Con el propósito de reducir las pérdidas energía en la operación de los transformadores, se ha desarrollado un nuevo material para núcleos de transformadores llamado acero amorfo, el cual tiene la característica de producir pérdidas de excitación del orden del 25 % respecto al acero al silicio convencional. El acero amorfo es un material de estructura molecular no cristalina que se forma en pequeñas cintas por enfriamiento rápido del material fundido, lo cual evita que se cristalice durante la solidificación. La composición de estos aceros consiste aproximadamente de 80 % de hierro y 20 % de metaloides tales como boro y silicio y su espesor es reducido (del orden de 0.10 mm), por lo cual, la manufactura del núcleo constituye uno de los problemas más importantes por resolver

c) Clasificación de los núcleos

Los núcleos que se utilizan en los transformadores de distribución y en los transformadores de potencia (ver Fig. 2.21), se clasifican en dos grupos:

a). Tipo acorazado. En éste el circuito magnético rodea a la bobina.

b). Tipo columna. Es aquel en el cual la bobina envuelve al circuito magnético.

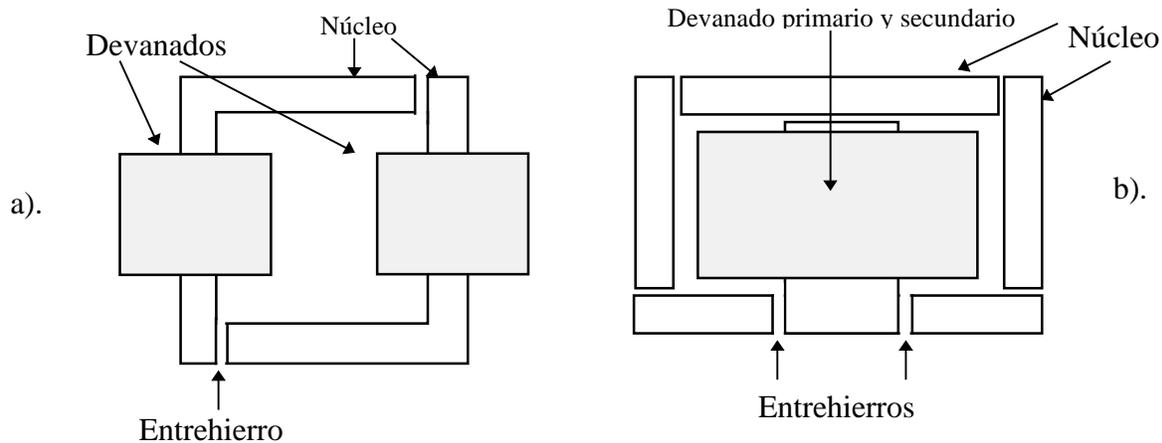


Fig. 2.21 Tipos de núcleos, a). Tipo columna, b). Tipo acorazado.

La selección de la construcción tipo columna o bien del tipo acorazado está en función del costo, tensión nominal, capacidad nominal, peso, resistencia mecánica y distribución del calor.

Desde el punto de vista de ensamblaje de las laminaciones del núcleo, los núcleos se clasifican de la siguiente manera :

a). Núcleo apilado. Se forma de varias láminas cortadas y apiladas, generalmente una por pierna y una o dos por yugo. Su sección transversal puede ser transversal o cruciforme. Se utiliza tanto en los transformadores de distribución y de potencia. Ver Fig. 2.22.

b). Núcleo enrollado.

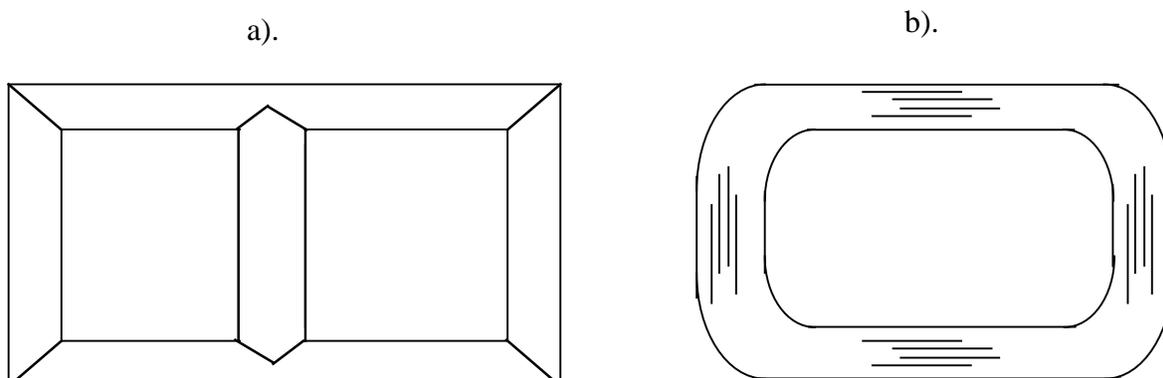


Fig. 2.22 Ensamble de laminación en núcleos, a). Núcleo trifásico apilado, b). Núcleo monofásico enrollado.

d) Factor de destrucción

Durante la fabricación del núcleo, la lámina de acero al silicio se somete a esfuerzos mecánicos, tales como corte, tensión, compresión, etc. Estos esfuerzos originan cambios en la orientación de los dominios magnéticos del acero eléctrico, disminuyendo la permeabilidad magnética y como consecuencia incrementan las pérdidas del material. Tal incremento puede alcanzar valores del 300 % del valor de pérdidas correspondiente a la lámina virgen.

Con el fin de recuperar las características de magnetización originales, el núcleo se somete a un proceso de recocido a una temperatura aproximada a los 780 °C. Posterior a este calentamiento sigue un período de enfriamiento natural. Con este proceso el núcleo puede recuperar prácticamente sus propiedades magnética originales.

El factor de destrucción se calcula mediante

$$F_{\text{DESTRUCCION}} = \frac{P_{NT}}{P_{LV}} \quad (2.16)$$

Donde :

P_{NT} = Pérdidas en el núcleo del transformador

P_{LV} = Pérdidas en la lámina virgen



Los valores típicos del factor de destrucción de los transformadores van de 1.1 a 1.2 dependiendo del número de fases y del tipo del núcleo.

e) Factor de apilamiento

Cuando un núcleo se ensambla, las láminas que los forman se encuentran separadas por pequeños espacios de aire además del aislamiento de las láminas llamado “carlite”. Por esta razón la sección transversal exterior del núcleo no representa la sección transversal correspondiente exclusivamente al acero eléctrico.



REFERENCIAS

- E. Braun, *Electromagnetismo : de la ciencia a la tecnología*, la ciencia/112 desde México, 1992.
- V. Ivanov-Smolenski, *Máquinas eléctricas*, tomo I, Editorial Mir Moscú, 1984.
- S. Siskind, *Electrical Machines*, Second edition, International Student Edition, McGraw-Hill International Book Company, Japan, 1959.
- Gourishankar, *Conversión de energía electromecánica*, Representaciones y Servicios de México, México, 1975 (Traducido del inglés).
- L. W. Matsch, *Máquinas electromagnéticas y electromecánicas*, Alfaomega, México, 1990.
- S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*, McGraw-Hill, México, 1987.
- R. L. Bean, N. Chackan, H. R. Moore, E. C. Wentz, *Transformers for the Electric Power Industry*, Westinghouse Electric Corporation, 1959.
- Kind and H. Kärner, *High-Voltage Insulation Technology*, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Weisbaden, Germany, 1985, (Translated from the German).
- C. Franklin, D. P. Franklin, *The J&P Transformer book*, Butterworths, 11th edition, England, 1988.
- G. Enríquez, *Curso de transformadores y motores trifásicos de inducción*, Limusa Noriega Editores, México, 1995.
- G. Hernández, *Diseño de transformadores*. Instituto de Investigaciones eléctricas, Cuernavaca, Morelos, México, 1991.
- J. Flores, *Transformadores (Fascículo 1)*, Comisión Federal de Electricidad, México, 1994.
- J. H. Kuhlmann, *Diseño de aparatos eléctricos*, Compañía Editorial Continental, México, 1959.
- M. Liwshitz-Garik, et al. *Máquinas de corriente alterna*, Compañía Editorial Continental, México, 1970.
- R. Feinberg(Editor), *Modern Power Transformer Practice*, The Macmillan Press Ltd, Great Britain, 1979.
- Fitzgerald, C. Kingsley, A. Kusko, *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*, Segunda edición, Editorial Hispano Europea, México, 1984.



- E. Staff-M.I.T., *Circuitos magnéticos y transformadores*, Editorial Reverté, Argentina, 1981.
- J.C. Olivares, *Modelado de la distribución de sobretensiones transitorias en los devanados del transformador*, Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Morelia, 1997.
- Ras, *Transformadores de potencia, de medida y de protección*, Marcombo Boixareu Editores, Textos monográficos de electrotecnica, España, 1983.
- Armco Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels. Tenth Edition, 1986.
- D. Kind and H. Kärner, *High-Voltage Insulation Technology*, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/Weisbaden, Germany, 1985, (Translated from the German).
- D. M. Nathasingh, "Transformers Applications of Amorphous Alloys in Power distribution Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987.
- D. W. Whitley, "Type Testing of Amorphous Metal Distribution Transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, July 1987.
- M. N. Sarwate, et al, "Amorphous Core Transformers-Energy Conservation and Field Experience," Research and Development Cell, M.P. Electricity Board, Jabalpur, January-March 1995.