

REACTOR

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

Los reactores o inductores son bobinas en aire o con núcleo ferromagnético que poseen diversas aplicaciones en los sistemas eléctricos.

Por ejemplo en media y alta tensión y en los casos en que los transformadores están en conexión triángulo, se los utiliza principalmente para generar centros de estrella y hacer las conexiones a tierra. También se los utiliza para conectar protecciones e instrumentos de medición. Otras aplicaciones en los sistemas de media y alta tensión son en la compensación de capacidad de líneas largas, filtros de onda portadora, compensadores de factor de potencia, etc.

En las redes de baja tensión el principal uso de los reactores es como balastos e ignitores para lámparas de descarga, también se los utiliza en filtros de armónicos y en sistemas de arranque de motores de inducción.

En el presente artículo se estudiarán solamente el comportamiento de los reactores en bajas frecuencias, no se analizarán las aplicaciones en comunicaciones, donde se utilizan frecuencias mucho mayores que las industriales, tampoco se estudiará el diseño de los mismos ya que eso es tema de otra asignatura. Desde el punto de vista didáctico, el reactor, por su sencillez, es un buen punto de partida para el estudio de las máquinas eléctricas, en especial las de corriente alterna.

2 REACTOR EN AIRE

Muchos reactores no poseen núcleo ferromagnético, en particular los que están destinados a filtros, trampas de onda (circuitos sintonizados) o alguna otra aplicación especial. Desde el punto de vista del análisis poseen la importante característica de su linealidad, es decir la corriente es proporcional a la tensión aplicada, ya que el aire no se satura.

En la figura 1 se muestra el esquema de un reactor sin núcleo, donde se han indicado las principales magnitudes, con los sentidos positivos adoptados.

Como las convenciones de signo son arbitrarias, y la experiencia ha mostrado la conveniencia de tomar el mismo sentido para la tensión y para la fuerza electromotriz inducida, se adoptará este criterio en todo el curso de máquinas eléctricas. Además como el reactor es un elemento pasivo que no genera energía, conviene adoptar para el mismo una convención consumidora, es decir la corriente entrando por el borne designado como positivo.

2.1 Relaciones generales

La fuerza electromotriz inducida en conductores fue estudiada por el físico inglés Michael Faraday (1791-1867), y para una espira vale:

$$e = \frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (1)$$

Donde ϕ es el flujo a través de la espira en cuestión expresado en Weber.

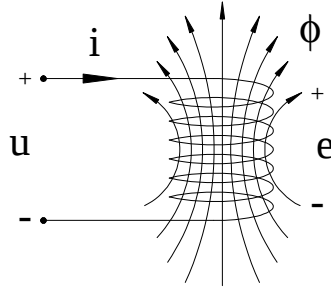


Figura 1. Reactor en aire.

Donde:

- N: Número de espiras.
- r: Resistencia óhmica del bobinado [Ω].
- u: Tensión aplicada [V].
- e: Tensión o fuerza electromotriz inducida [V].
- i: Corriente [A].
- ϕ : Flujo magnético [Wb].

Debido a que el flujo se dispersa y no es el mismo en todas las espiras, la fuerza electromotriz inducida en toda la bobina se expresa como la suma de las tensiones inducidas en cada una de las N espiras de la misma:

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_N = \sum_{k=1}^N e_k \quad (2)$$

Reemplazando cada una de las fuerzas electromotrices por expresiones del tipo de la (1) queda:

$$e = \frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_2}{dt} + \frac{d\phi_3}{dt} + \dots + \frac{d\phi_N}{dt} = \sum_{k=1}^N \frac{d\phi_k}{dt} \quad (3)$$

Permutando las operaciones derivada y suma, se puede poner:

$$e = \frac{d}{dt} (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots + \phi_N) = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^N \phi_k \quad (4)$$

A la suma de los flujos a través de cada una de las espiras se lo denomina “flujo concatenado” λ :

$$\boxed{\lambda = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \dots + \phi_N = \sum_{k=1}^N \phi_k} \text{ [Wb]} \quad (5)$$

Utilizando la definición anterior de flujo concatenado, se puede expresar la fuerza electromotriz inducida en toda la bobina, como:

$$\boxed{e = \frac{d\lambda}{dt}} \text{ [V]} \quad (6)$$

Que es una expresión de carácter muy general para la ley de Faraday. Otra forma muy empleada para la ley de Faraday es utilizando un flujo promedio:

$$\phi = \frac{\sum_{k=1}^N \phi_k}{N} = \frac{\lambda}{N} \quad (7)$$

De donde se puede despejar λ y reemplazarlo en la (6), lo que da:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \text{ [V]} \quad (8)$$

Partiendo de la definición de inductancia L [H]:

$$L = \frac{\lambda}{i} \text{ [H]} \quad (9)$$

Reemplazando el flujo concatenado en esta expresión se puede obtener la dependencia funcional de la inductancia, lo que siempre es conveniente recordar:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} = \frac{N}{i} \frac{Ni}{\mathcal{R}} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = N^2 \mathcal{P} = \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} N^2 \quad (10)$$

$\mathcal{R}$: Reluctancia [1/H].

$\mathcal{P}$: Permeancia [H].

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [H/m]: Permeabilidad del vacío.

μ_r : Permeabilidad relativa, que, para el aire, vale 1.

S : Sección a través de la cual circula el flujo magnético [m²].

l : Longitud del circuito magnético [m].

Si bien en un reactor en aire las líneas de fuerza del campo magnético se dispersan por el aire y tanto la sección S como la longitud l no quedan definidas, la expresión (10) es útil por que muestra de que depende la inductancia de una bobina. Si se desea emplearla para calcular la inductancia de una bobina, salvo para un toroide que prácticamente no tiene flujo disperso, habrá que utilizar factores de corrección empíricos. Como ya se verá esta situación cambia si el reactor posee un núcleo ferromagnético.

De acuerdo a la definición (9), el flujo concatenado se puede poner como el producto:

$$\lambda = Li \quad (11)$$

Ésta es una expresión muy utilizada, especialmente en el estudio circuital de las máquinas eléctricas, reemplazándola en la ecuación (6) queda:

$$e = \frac{d}{dt} (Li) \text{ [V]} \quad (12)$$

En las *máquinas estáticas*, es decir aquellas que no tienen movimiento relativo de sus partes, y *lineales*, o sea aquellas en las que sus circuitos magnéticos no se saturan y poseen parámetros

constantes, como es el caso del reactor en aire; la inductancia L no varía y se puede sacar fuera de la derivada, resultando:

$$e = L \frac{di}{dt} [\text{V}] \quad (13)$$

Expresión muy utilizada en el estudio de los circuitos eléctricos y, por lo tanto, en la *teoría circuital de máquinas eléctricas*.

Para obtener la tensión aplicada u se debe recurrir a un *modelo circuital* o *circuito equivalente*. Estos modelos son circuitos eléctricos, formados por elementos ideales, que, vistos desde sus bornes se comportan de una manera semejante al elemento real. La semejanza nunca es perfecta, todos los modelos tienen rangos de validez, que no deben ser olvidados para no cometer errores graves; en caso de duda se deberán realizar verificaciones experimentales. Afortunadamente, en el caso de las máquinas eléctricas, los modelos circuitales más empleados, han sido ampliamente verificados por la práctica.

El circuito equivalente de un reactor en aire y para bajas frecuencias, como lo son las frecuencias industriales de 50 ó 60 Hz, es el siguiente:

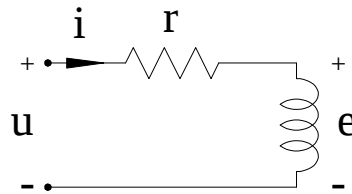


Figura 2. Circuito equivalente de un reactor en aire.

En este circuito equivalente, la resistencia es la que corresponde al conductor que forma la bobina, medida con corriente continua o calculada con la expresión:

$$r = \rho \frac{l}{s} [\Omega] \quad (14)$$

Donde:

- ρ : Resistividad del conductor [Ωm].
- l : Longitud del conductor [m].
- s : Sección del conductor [m^2].

Teniendo solamente la precaución de considerar el efecto de la temperatura, que, en general, no es despreciable.

Si la frecuencia fuera superior a unos pocos kilohertz habría que considerar la variación de la resistencia por el denominado efecto skin o efecto pelicular y también las capacidades parásitas que existen entre espiras y a masa. En general estos efectos, salvo casos muy especiales, tienen muy poca influencia en el funcionamiento de las máquinas eléctricas.

A partir del circuito equivalente de la figura 2, se puede escribir la expresión de la tensión aplicada a los bornes del reactor:

$$u = e + ri \quad (15)$$

Todas las expresiones planteadas hasta ahora son de carácter general y son válidas tanto para corrientes constantes como para las variables y con cualquier forma de onda. Pero sin duda las corrientes variables más importantes son las periódicas.

2.2 Funcionamiento armónico

Sin lugar a dudas el funcionamiento periódico más importante es el armónico, donde las magnitudes varían sinusoidalmente en el tiempo con amplitud y frecuencia f [Hz] constantes. Las ecuaciones que corresponde a esta condición de trabajo son un caso particular de las ya vistas. En efecto si la corriente vale:

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin 2\pi f t \quad (16)$$

En este reactor en aire, que no tiene saturación, el flujo resultará proporcional a la corriente:

$$\phi = k i = \Phi_{m\acute{a}x} \sin \omega t \quad (17)$$

$$k = \mu_0 \frac{S}{l} N \quad (18)$$

La tensión o fuerza electromotriz inducida resulta:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = 2\pi f N \Phi_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (19)$$

Cuyo valor eficaz es:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_{m\acute{a}x} \text{ [V]} \quad (20)$$

Donde

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44 \quad (21)$$

Todas estas magnitudes armónicas son representables fasorialmente y la tensión en bornes, cuyo valor instantáneo está dado por la ecuación (15), se transforma en:

$$\dot{U} = \dot{E} + r\dot{I} \quad (22)$$

Esta ecuación (22) y las anteriores (16), (17) y (19) conducen al diagrama fasorial de la fig. 3.

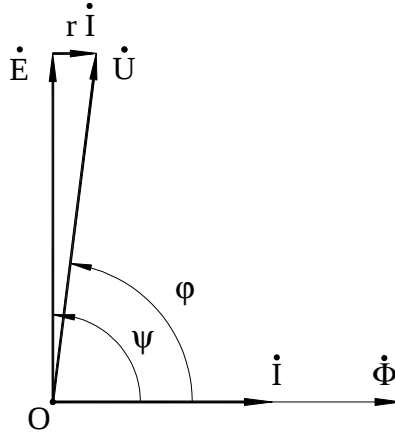


Figura 3. Diagrama fasorial del reactor en aire.

La expresión (20) es de suma importancia en máquinas eléctricas ya que relaciona el valor eficaz de la fuerza electromotriz inducida, que, en general es muy próxima a la tensión aplicada, con la frecuencia, generalmente constante, y parámetros constructivos como lo son el número de espiras y el valor máximo del flujo, asociado a la inducción máxima $B_{m\acute{a}x}$ [T] por:

$$\Phi_{m\acute{a}x} = S B_{m\acute{a}x} \text{ [Wb]} \quad (23)$$

Si bien esta relación es poco importante en una bobina en aire, ya que tanto la sección como el valor máximo de la inducción variarán según la región del espacio que se considere y no hay restricciones para las mismas, la situación cambia considerablemente cuando hay un núcleo ferromagnético. Como se verá, en este caso la sección y la longitud están bastante bien definidas, y el valor máximo de la inducción queda limitado por la saturación del material, siendo ésta la situación más frecuente en máquinas eléctricas.

A partir del diagrama fasorial se pueden obtener los valores de las potencias activa y reactiva que toma el reactor de la línea. Proyectando la tensión $\dot{U}$ sobre la corriente $\dot{I}$ y sobre la fuerza electromotriz $\dot{E}$.

La potencia activa absorbida vale:

$$P = UI \cos \varphi \quad (24)$$

Pero:

$$U \cos \varphi = rI \quad (25)$$

Reemplazando resulta:

$$P = rI^2 = P_{Cu} \text{ [W]} \quad (26)$$

Que es la potencia activa que se disipa en la única resistencia del circuito equivalente de la figura 2. En general a estas pérdidas por efecto Joule producidas en las resistencias de los conductores de las máquinas eléctricas se las denomina “pérdidas en el cobre” aunque algunas veces esos conductores no sean de cobre.

Respecto a la potencia reactiva, resulta:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (27)$$

Pero:

$$U \sin \varphi = E \quad (28)$$

Reemplazando:

$$Q = EI \text{ [var]} \quad (29)$$

Que es la potencia reactiva en la única reactancia del circuito equivalente de la figura 2. Si bien estas dos deducciones son un tanto obvias, sirven para comparar los resultados que luego se obtienen cuando el reactor posee un núcleo ferromagnético.

Dado que el objetivo básico de un reactor es desarrollar en el circuito donde se lo coloca una reactancia inductiva elevada, resulta claro que deberá ser:

$$Q \gg P \quad (30)$$

Esto equivale a decir que:

$$X \gg r \quad (31)$$

Por lo tanto la caída de tensión en la reactancia, es decir $\dot{E}$, es mucho mayor que la que se produce en la resistencia $r\dot{I}$. En prácticamente todos los diagramas fasoriales, las caídas de tensión en las resistencias se representan, por razones de claridad en el dibujo, mucho más grande de lo que en la realidad son. Este criterio se aplica a los fasoriales de todas las máquinas eléctricas y no debería ser olvidado por el lector. En algunos casos, lo anterior es tan notable, que hasta es posible despreciar las caídas de tensión resistivas; pero como regla general, se aconseja proceder con prudencia antes de despreciar partes de los circuitos equivalentes de las máquinas eléctricas.

3 REACTOR CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO

Es muy común encontrar en los sistemas eléctricos, reactores con núcleo ferromagnético, las formas constructivas más empleadas son los núcleos *acorazados*, figura 4, *de columnas*, figura 5 y, para aplicaciones especiales, los *toroidales*, figura 6.

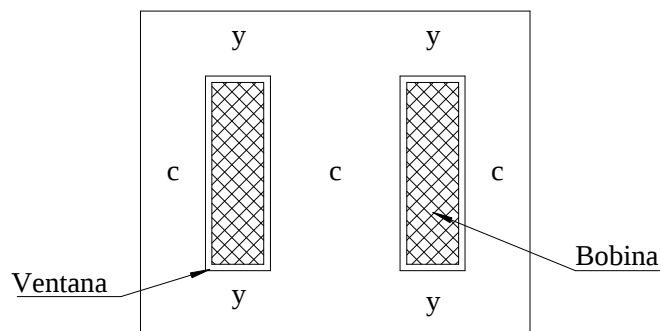
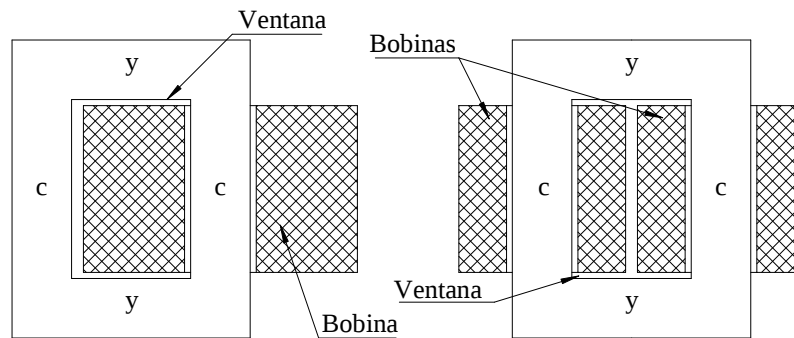


Figura 4. Núcleo acorazado normalizado.



Figurar 5. Núcleos de columnas.

En las figuras 4 y 5, y representa a los yugos y c a las columnas. En el dibujo de la derecha de la figura 5, la bobina del reactor está dividida en dos partes iguales, colocadas una en cada columna, esta configuración permite ahorrar material con relación a la de la izquierda, pero su construcción es un poco más laboriosa.

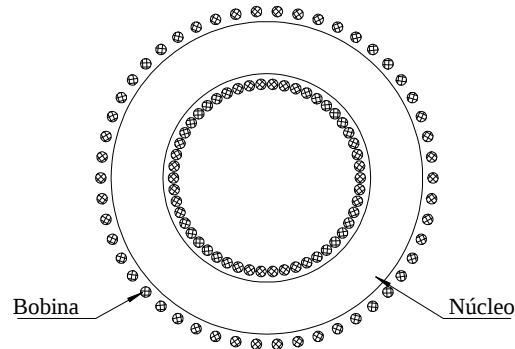


Figura 6. Núcleo toroidal.

La presencia de un núcleo ferromagnético de alta permeabilidad reduce notablemente la dispersión del campo magnético, no obstante lo cual, la concatenación no es perfecta y el flujo considerado será la suma del principal, que circula a través del núcleo y del que lo hace por el aire. Luego, en el estudio de las otras máquinas eléctricas, resultará conveniente separar los efectos de estos dos flujos, por ahora no es necesario.

Los tres fenómenos más importantes que se estudiarán, son:

- Aumento de la inductancia.
- Aparición de pérdidas en el hierro.
- Distorsión en la corriente (no se tratará en este curso).

3.1 Aumento de la inductancia

La característica que identifica a todos los materiales ferromagnéticos es su permeabilidad relativa muy superior a la unidad, yendo desde un mínimo de alrededor de 100 hasta valores tan altos como 10.000 o más. Como la inductancia (10) depende directamente de esta permeabilidad, se comprende que la presencia del núcleo produzca un considerable aumento de la inductancia de la bobina.

Pero otra característica de los materiales ferromagnéticos es que se saturan y a medida que se aproximan a esta situación bajan su permeabilidad, llegando a perder totalmente sus características y a comportarse como el mismo aire o el vacío. Llegar a un extremo de esta naturaleza sería totalmente desventajoso.

Como, por definición la permeabilidad, es la relación entre la inducción B [T] y el campo magnético H [A/m], ecuación (32), partiendo de la curva de magnetización se puede obtener su variación y la de la inductancia asociada. En la figura 7 se muestra la variación de la permeabilidad, en corriente continua, de una chapa para transformadores, laminada en caliente, calibre 26 (0,47 mm).

$$\mu = \mu_0 \mu_r = \frac{B}{H} \text{ [H/m]} \quad (32)$$

Esta característica convierte a un reactor con núcleo ferromagnético en un elemento alineal, lo que por un lado complica su estudio y por otro produce consecuencias como la ya mencionada deformación de la corriente absorbida.

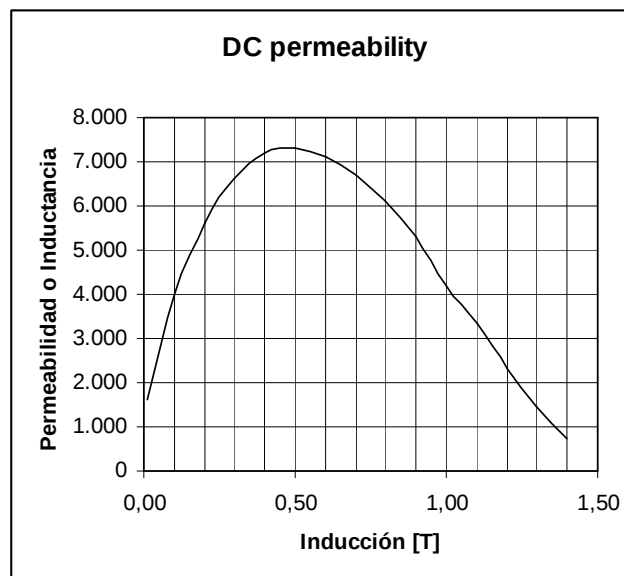


Figura 7. Variación de la permeabilidad y de la inductancia.

En aquellos casos en que se necesita un reactor lo más lineal posible y uno sin núcleo resultaría demasiado voluminoso y costoso, se utiliza el recurso, por cierto muy empleado, de colocar un entrehierro en el circuito magnético. Un pequeño entrehierro intercalado, agrega una importante reluctancia serie en el circuito magnético, la que por ser constante, atenúa considerablemente las características alineales de la porción de hierro. Esta técnica también es utilizada para ajustar la inductancia del reactor al valor deseado, la que no es fácil de obtener exactamente, por las incertidumbres que existen en la etapa de diseño y durante la construcción del mismo.

En algunas aplicaciones especiales, como ser en circuitos de filtrado, los reactores están sometidos a una corriente continua superpuesta a la corriente alterna, en estos casos se vuelve imprescindible la presencia del entrehierro para evitar la saturación del núcleo y en estos casos se define una *permeabilidad incremental*.

3.2 Pérdidas en el hierro

Si un material ferromagnético es sometido a un flujo variable, se puede observar un calentamiento del mismo, lo que significa que se está disipando potencia en forma de calor, lo que se traduce en una pérdida de energía. Hay dos fenómenos que conducen a esta pérdida de energía: la histéresis magnética y las corrientes parásitas.

3.2.1 Pérdidas por histéresis

El fenómeno de la histéresis se presenta en muchas situaciones, en general se podría decir que es la oposición que presentan los materiales a cambiar de estado o de condiciones. En el caso especial de los materiales magnéticos, es la resistencia que presentan a cambiar sus condiciones de magnetización, fenómeno caracterizado por el conocido ciclo de histéresis de estos materiales. Para recorrer un ciclo de histéresis completo se necesita una energía, por unidad de volumen (densidad de energía), representada por el área encerrada por el propio ciclo.

Lamentablemente la forma del ciclo de histéresis no facilita el cálculo de su área, pero en 1892, el ingeniero alemán Charles Proteus Steinmetz (1865-1923), radicado en los Estados Unidos, publica en la AIEE un importante trabajo sobre magnetismo, donde propone una fórmula empírica, avalada por las numerosas experiencias que había realizado, para obtener la densidad de energía necesaria para recorrer un ciclo de histéresis:

$$w = k_h B_{máx}^n \text{ [J/m}^3\text{]} \quad (33)$$

Donde k_h es un coeficiente que depende del material y el exponente n que afecta al valor máximo de la inducción, conocido como “exponente de Steinmetz”, varía entre 1,6 y 2, dependiendo del estado de saturación del material.

Si se multiplica la expresión (33) por la frecuencia f , en hertz, se obtiene la potencia disipada en watt, que en general interesa más:

$$P_h = k_h f B_{máx}^n \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (34)$$

Dado que estas pérdidas por histéresis son función del área encerrada por el ciclo de histéresis, para disminuirlas habrá que reducir dicha área; esto se logra adicionando silicio al acero del núcleo. Los valores más altos utilizados comercialmente están cerca del 5% ya que con títulos mayores, el acero se endurece, se vuelve quebradizo y resulta muy difícil de mecanizar.

3.2.2 Pérdidas por corrientes parásitas

Toda vez que un material conductor se mueve dentro de un campo magnético, cortando sus líneas de fuerza, o cuando un conductor es atravesado por un campo magnético variable en el tiempo, que es el caso del núcleo de un reactor; en ese conductor se desarrollan corrientes parásitas que provocan pérdidas por efecto Joule en el mismo. Este fenómeno se produce en todas las máquinas eléctricas con núcleos ferromagnéticos y fue estudiado por el físico francés León Foucault (1819-1868) por lo que a dichas corrientes también se las denomina en su honor: “corrientes de Foucault”.

Si se tiene una barra prismática atravesada por un flujo creciente, dirigido hacia arriba, como se muestra en la figura 8, en su interior se producirán corrientes parásitas que se oponen al crecimiento del flujo, dando lugar a dichas pérdidas.

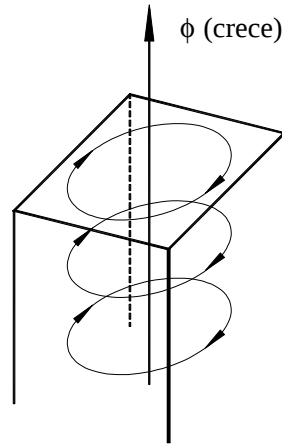


Figura 8. Corrientes de Foucault.

Para reducir estas corrientes, se procede a aumentar la resistencia del camino que ellas recorren, ya sea utilizando materiales ferromagnéticos más resistivos, como ciertas cerámicas, tales como las “Ferrites”, utilizadas en altas frecuencias, pero la solución más empleada desde frecuencias industriales hasta las audiofrecuencias es proceder a laminar el núcleo y aislar las chapas entre sí, como se muestra en la figura 9.

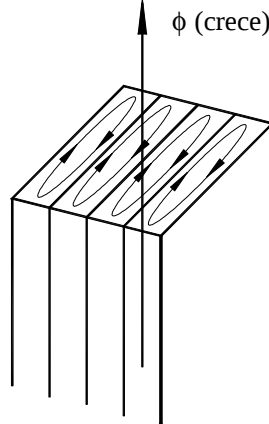


Figura 9. Núcleo laminado.

El laminado del núcleo alarga los caminos que deben recorrer las corrientes y reduce su valor y consecuentemente las pérdidas.

Para el caso de flujo armónico resulta:

$$P_p = \frac{\pi^2 a^2}{6\rho} f^2 B_{máx}^2 = k_p f^2 B_{máx}^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (35)$$

Donde:

a : Espesor de la chapa [m].

ρ : Resistividad el material del núcleo [Ωm].

Se puede observar que estas pérdidas dependen del cuadrado del espesor de la chapa magnética. Desde este punto de vista convendría hacerlas del menor espesor posible; pero lamentablemente esto tiene sus inconvenientes: encarece la fabricación de la chapa, complica el

armado del núcleo y por sobre todas esas cosas, se reduce la sección efectiva de acero; en efecto si las chapas son más delgadas, habrá mayor cantidad de ellas y también mayor cantidad de capas aislantes entre las mismas, que no son ferromagnéticas y no contribuyen a la circulación del flujo.

Por lo expresado en el párrafo anterior se deduce que la elección del espesor de las chapas es una solución de compromiso. En los reactores y transformadores de potencia que trabajan a frecuencia industrial, se utilizan chapas de 0,25 a 0,45 mm de espesor, este último valor para pequeños transformadores no muy exigidos.

En las máquinas eléctricas rotativas el espesor de las chapas varía aproximadamente entre 0,4 a 1 mm, dependiendo de la frecuencia del flujo en esa parte del núcleo.

Las chapas se comercializan recubiertas de un fosfatizado para evitar la oxidación de las mismas, lo que por sí dificulta la circulación de las corrientes parásitas, pero esto no es suficiente. Para garantizar la aislación entre las chapas, las mismas vienen cubiertas con una fina capa de barniz, que les confiere un característico color amarillo verdoso. Esta capa de barniz debe ser suficientemente fina para no desaprovechar mucho el espacio y suficientemente gruesa como para garantizar su resistencia mecánica y la uniformidad de su espesor; como las diferencias de potencial entre las chapas son fracciones de volt, el aspecto dieléctrico queda garantizado por las condiciones mecánicas.

3.2.3 Pérdidas totales en el hierro

Las expresiones (34) y (35) dan las pérdidas por unidad de volumen, o sea que para obtener el valor total de pérdidas que le corresponde a un núcleo, hay que multiplicarlas por el volumen del mismo.

$$P_{Fe} = (P_h + P_p) \cdot V_{Fe} \quad [W] \quad (36)$$

En esta expresión V_{Fe} es el volumen real del núcleo, es decir sin contar las separaciones aislantes entre chapas, para lo cual se debe tener en cuenta el, ya mencionado, factor de apilado, que está definido por la relación:

3.3 Circuito equivalente y diagrama fasorial

El circuito equivalente de un reactor con núcleo ferromagnético debe tener en cuenta la potencia de pérdidas en el hierro, para ello se deberá agregar otro elemento disipativo, es decir otra resistencia. Lo más conveniente es colocar una resistencia R_p en paralelo con la reactancia magnetizante X_m , en efecto en este caso la potencia que se disipa en esa resistencia depende del cuadrado de la fuerza electromotriz E , la que a su vez es función de la inducción B , como ocurre con las pérdidas del núcleo:

$$P_{Fe} = \frac{E^2}{R_p} \propto f^2 B^2 \quad (37)$$

Por todo lo expuesto, el circuito equivalente de un reactor con núcleo ferromagnético resulta, figura 10:

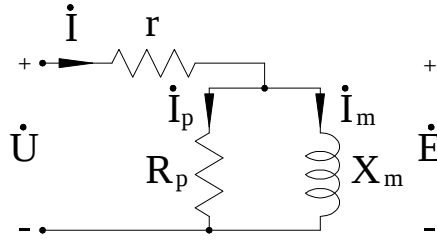


Figura 10. Circuito equivalente de un reactor con núcleo.

Donde:

r : Resistencia óhmica del bobinado [Ω].

R_p : Resistencia de pérdidas [Ω].

X_m : Reactancia magnetizante [Ω].

U : Tensión aplicada [V].

I : Corriente total [A].

I_p : Corriente de pérdidas [A].

I_m : Corriente magnetizante [A].

Algunas veces la rama paralelo se define con parámetros admitancia en Siemens [S] lo que simplifica algunos cálculos:

$$G_p = \frac{1}{R_p} \text{ [S]} \quad (38)$$

$$B_m = \frac{1}{X_m} \text{ [S]} \quad (39)$$

Las que se denominan “conductancia de pérdidas” y “susceptancia magnetizante” respectivamente.

A este circuito equivalente le corresponde el siguiente diagrama fasorial, figura 11:

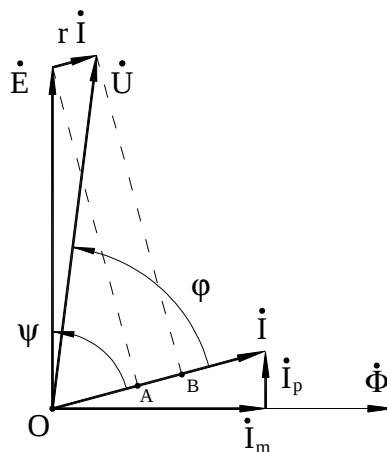


Figura 11. Diagrama fasorial de un reactor con núcleo.

En este fasorial se puede observar que el ángulo de fase interno ψ , entre la fuerza electromotriz y la corriente, es menor a 90° , como lo era en el reactor en aire, esto conduce a otra distribución de la potencia activa, en efecto, haciendo un razonamiento como el hecho con el reactor sin núcleo, ecuaciones (24) a (26), resulta que la potencia activa absorbida vale:

$$P = UI \cos \varphi \quad (40)$$

Pero:

$$U \cos \varphi = \overline{OA} + \overline{AB} = E \cos \psi + rI \quad (41)$$

Reemplazando resulta:

$$P = EI \cos \psi + rI^2 \quad (42)$$

Donde:

$$\boxed{EI \cos \psi = EI_p = P_{Fe}} \text{ [W]} \quad (43)$$

$$\boxed{rI^2 = P_{Cu}} \text{ [W]} \quad (44)$$

Que son las potencias activas que se disipan en cada una de las resistencias del circuito equivalente de la figura 10. Las pérdidas en el hierro que aparecieron en esta simple deducción son consecuencia de que el ángulo ψ , en este caso, es menor de 90° .

Respecto a la potencia reactiva, resulta:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (45)$$

Pero:

$$U \sin \varphi = E \sin \psi \quad (46)$$

Reemplazando:

$$\boxed{Q = EI \sin \psi = EI_p} \text{ [var]} \quad (47)$$

Que es la potencia reactiva en la única reactancia del circuito equivalente de la figura 10. Se deja al lector las comparaciones de estos resultados con los anteriormente obtenidos en el reactor sin núcleo. Otras relaciones útiles que resultan del diagrama fasorial son:

$$\boxed{I_p = I \cos \psi} \quad (48)$$

$$\boxed{I_m = I \sin \psi} \quad (49)$$

$$\boxed{I = \sqrt{I_p^2 + I_m^2}} \quad (50)$$

4 BIBLIOGRAFÍA

EE Staff del MIT: "Circuitos Magnéticos y Transformadores" Editorial Reverté, 1943.

Gourishankar Vembu: "Conversión de Energía Electromecánica". Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. 1969.