

TEMA 11. COMPONENTES REACTIVOS. CONSIDERACIONES PRÁCTICAS

11.1.INTRODUCCIÓN

11.2.DISEÑO DE INDUCTORES

11.2.1. Tipos de Núcleo Magnético

11.2.2. Carrete

11.2.3. Conductores

11.2.4. Entrehierro

11.3.DISEÑO DE TRANSFORMADORES

11.3.1. Núcleo Magnético

11.3.2. Conductores

11.4.SELECCIÓN DE CONDENSADORES

11.4.1. Electrolíticos

11.4.2. Plásticos y Cerámicos

INTRODUCCIÓN

En este tema se estudiará el diseño de inductores y transformadores así como la selección de condensadores.

- En los años iniciales de la electrotecnia se empleaban para la fabricación de inductores y transformadores núcleos de acero y sus aleaciones.
- En los circuitos electrónicos modernos trabajando a altas frecuencias esto ocasionaría demasiadas pérdidas “eddy”.
- Uso de láminas o polvos sinterizados de acero inicialmente y a partir de los años 30-40 se comenzaron a usar ferritas, especialmente a partir de los años 50 con la introducción de los televisores.
- Las ferritas están formadas por óxidos magnéticos con alta resistividad eléctrica y buenas características magnéticas.
- Se emplean dos grandes grupos:
 - Ferritas de Manganeso-Zinc (MnZn), formadas por una mezcla de óxidos de hierro, manganeso y zinc ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{ZnO}$).
 - Ferritas de Niquel-Zinc (NiZn), formadas por una mezcla de óxidos de hierro, niquel y zinc.
 - Las ferritas de NiZn tienen una resistividad muy alta por lo que se usan para frecuencias muy elevadas (desde 1÷2 MHz a varios cientos de MHz) mientras que las MnZn se emplean hasta 2MHz.
 - La permeabilidad magnética de las ferritas MnZn es del orden de 100 veces mayor que en las NiZn.

Las características principales de las ferritas se pueden resumir:

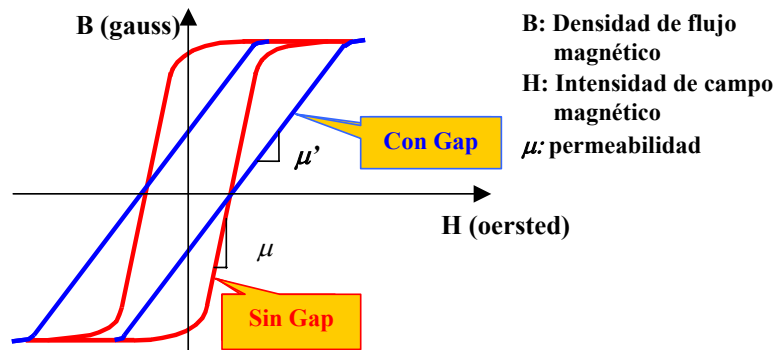
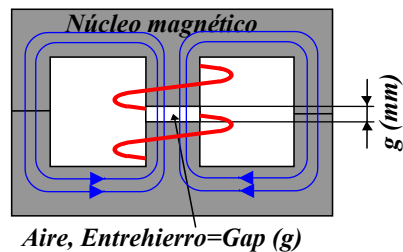
- Alta resistividad
- Amplio rango de frecuencias de trabajo
- Bajas pérdidas con alta permeabilidad
- Alta estabilidad con el tiempo y la temperatura
- Amplia selección de materiales
- Gran variedad de formas de núcleos
- Bajos coste y peso
- Baja conductividad térmica
- Fragilidad y poca resistencia mecánica
- Saturan a bajas densidades de flujo

INTRODUCCIÓN

Las unidades empleadas en electromagnetismo son (SM=Sistema Métrico, UC=Uso cotidiano):

Magnitud	Simb. SM	Unidad SM	Simb. UC	Unidad UC	Factor Convers
Inductancia	H	Henrio	L	Henrios	1
Intensidad de campo magnético	A/m	Amperio/metro	Oe	Oersted	79.58
Flujo Magnético	Wb	Weber	Mx	Maxwell	1 10 ⁸
Densidad de Flujo Magnético/Inducción Magnética	T	Tesla	g	Gauss	1 10 ⁴
Permeabilidad	H/m	Henrio/metro	μ	--	4 10 ⁻⁷
Carga eléctrica	C	Culombio	EM	Carga por masa	10

Sección de un núcleo magnético

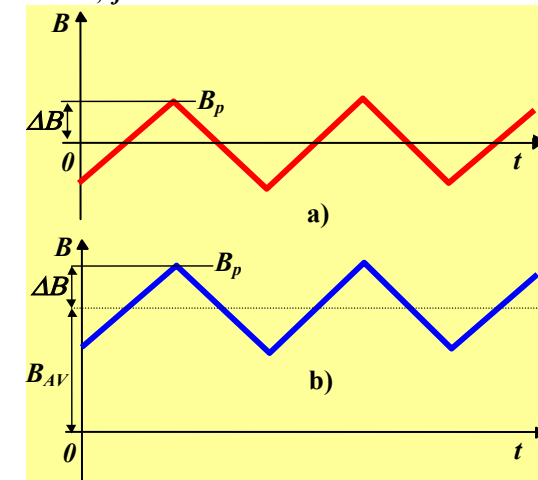


Curva característica B-H de un núcleo de ferrita

DISEÑO DE INDUCTORES

Para el diseño de un inductor debe conocerse (del circuito dónde se conecta):

- La inductancia, L .
- La corriente de pico, I_p .
- La corriente eficaz, I_{RMS} .
- La frecuencia, f



Definición de Densidad de Flujo Máximo AC. a) Flujo Bipolar. b) Flujo Unipolar

$$\Delta B = \frac{E \cdot 10^8}{k \cdot A_c \cdot N \cdot f}$$

ΔB es el incremento de densidad de flujo máximo AC expresado en *gauss* y es igual a la diferencia entre el valor de pico de la densidad de flujo y su valor medio.

k es una constante que es igual a 4.44 para onda senoidal y 4 para onda cuadrada.

E es la tensión eficaz en voltios.

A_c es la sección transversal efectiva del núcleo en cm^2 y es aproximadamente igual a la sección de la columna central.

N es el número de espiras que abrazan al núcleo.

f es la frecuencia en Hz .

DISEÑO DE INDUCTORES

Las pérdidas en un núcleo de ferrita pueden estimarse (según los fabricantes):

$$P = k f^a \Delta B^b$$

P es la pérdida de potencia en mW/cm^3 .

ΔB es la densidad de flujo máximo AC en gauss.

k , a y b son constantes dadas por los fabricantes para cada tipo de material magnético.

Estas pérdidas se limitan típicamente a unos $10 mW/cm^3$ para núcleos de baja potencia.

Para los núcleos de mayor potencia:

$$\Delta t = 0.833 \frac{P}{A}$$

Δt es el incremento de temperatura respecto de la temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

P es la potencia disipada (mW).

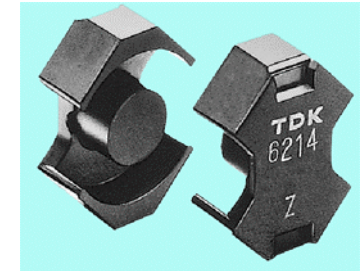
A es el área total de la superficie exterior del núcleo (cm^2).

DISEÑO DE INDUCTORES.

Tipos de núcleos magnéticos mas usados



a) POT



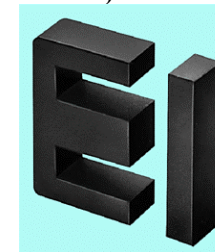
b) RM



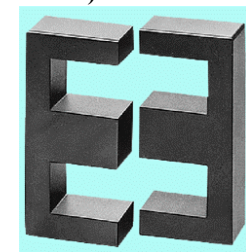
c) UU



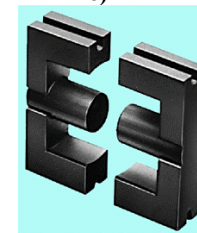
d) Toroidal



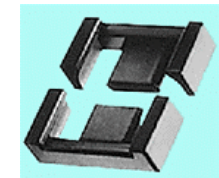
e) EI



f) EE

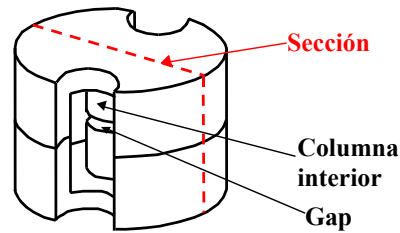


g) EC

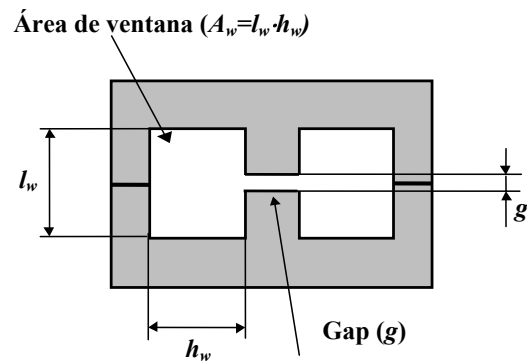


h) EPC

DISEÑO DE INDUCTORES

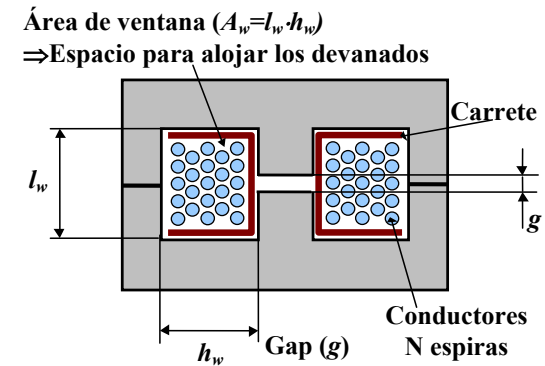


Vista Externa del Núcleo POT con Ranuras Laterales y Entrehierro (Gap)



Sección Transversal de los Núcleos POT, Cuadrados, y en E

DISEÑO DE INDUCTORES



Sección Transversal de los Núcleos POT, Cuadrados y en E

Para la selección del núcleo se emplea la fórmula que da la característica producto de áreas. (se deducirá posteriormente)

$$A_w A_c = \frac{L_{\max} I_p I_{rms}}{k_{cu} J B_{\max}}$$

A_w Área de ventana.

A_c Sección media transversal del circuito magnético.

L_{\max} Inductancia máxima que puede obtenerse con el núcleo (se deducirá posteriormente).

K_{cu} Coeficiente de empaquetamiento del cobre (valores típicos comprendidos entre 0.6 y 0.8).

J Densidad de corriente.

Carrete

Es la base sobre la que se asienta el solenoide o bobina de cobre.

Está caracterizado por el área de ventana A_w y se define como el producto de la altura de ventana h_w por el ancho de ventana l_w .

Conductores

A partir de la corriente eficaz I_{rms} , y una densidad de corriente aceptable (para cobre se suele fijar en 450 A/cm^2) puede determinarse la sección del conductor:

$$A_{cu} = \frac{I_{rms}}{J}$$

Si se define N como el número máximo de espiras de cobre de sección efectiva A'_{cu} (incluyendo la superficie de aislante que normalmente es barniz) que pueden ser alojadas en un núcleo de área de ventana A_w , se cumple:

$$N A'_{cu} = A_w k_{cu}$$

En la práctica: $A'_{cu} \approx A_{cu}$

DISEÑO DE INDUCTORES

El número máximo de espiras que puede alojar el núcleo se puede deducir de las dos ecuaciones anteriores: **(A)**

$$N = A_w \frac{k_{cu} J}{I_{rms}}$$

Aplicando la definición de densidad de flujo para la sección media del núcleo magnético:

$$\phi = B A_c$$

La inductancia de una bobina formada por N espiras:

$$L = \frac{N \phi}{I}$$

Su valor máximo será:

$$L_{\max} = \frac{N \phi_{\max}}{I_p} = \frac{N B_{\max} A_c}{I_p}$$

Este será el valor de la **inductancia máxima** que puede obtenerse para un núcleo dado. **Debe ser mayor que el valor de inductancia deseado.** En caso contrario se selecciona un núcleo más grande. Para este nuevo núcleo se determina la nueva inductancia máxima y así sucesivamente hasta que la inductancia máxima supere o iguale el valor deseado.

El número de espiras necesario para construir una bobina de valor L, será: **(B)**

$$N = \frac{L I_p}{B_{\max} A_c}$$

Igualando los valores de N dados por las ecuaciones **(A)** y **(B)** resulta la ecuación del producto de áreas del núcleo vista anteriormente:

$$A_w A_c = \frac{L I_p I_{rms}}{k_{cu} J B_{\max}}$$

El producto $A_w A_c$ depende de las dimensiones de cada núcleo, de forma que una vez evaluada la parte derecha de la expresión anterior, debe elegirse un núcleo con un producto de áreas mayor o igual que el valor calculado.

DISEÑO DE INDUCTORES

Entrehierro (gap)

Consiste en intercalar una zona de aire en el circuito magnético. Se realiza en la mayoría de los inductores para aumentar la corriente máxima por la bobina para una misma densidad de flujo (evitar saturación). $\Rightarrow L \downarrow$ pero se compensa aumentando N ya que $L \propto N^2$.

La distancia de entrehierro puede obtenerse aplicando la ley de Ampere al nuevo circuito magnético,

$$\oint H \cdot dl = NI$$

La densidad de flujo en el aire, B_g puede relacionarse con la densidad de flujo en el circuito magnético, B_{\max} , sin más que tener en cuenta que el flujo permanece constante a lo largo del circuito magnético:

$$B_g A_g = B_{\max} A_c$$

Donde A_g es la sección equivalente del entrehierro (esta sección es ligeramente superior a la del núcleo).

La intensidad del campo magnético en el entrehierro (H_g) viene dada por:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{\phi_{\max}}{\mu_0 A_g}$$

Debido a que la permeabilidad del núcleo magnético (μ) es mucho mayor que la del aire (μ_0), la intensidad del campo en el núcleo (H_c) será mucho menor que en entrehierro (H_g).

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \gg \frac{B_c}{\mu} = H_c$$

Despreciando, por tanto, la intensidad de campo en el material magnético frente a la intensidad de campo en el aire, de la ley de Ampere, puede obtenerse:

$$H_g g = N I_p$$

De estas ecuaciones se obtiene la longitud del entrehierro que hay que realizar para una corriente máxima I_p :

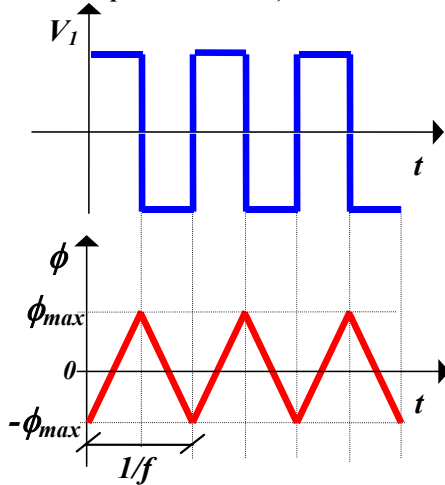
$$g = \frac{N I_p}{H_g} = \frac{\frac{L I_p}{\phi_{\max}} I_p}{\frac{\phi_{\max}}{\mu_0 A_g}} = \frac{\mu_0 A_g L}{\phi_{\max}^2} I_p^2 = \frac{\mu_0 A_g L}{B_{\max}^2 A_c^2} I_p^2$$

Donde g es la longitud del entrehierro.

DISEÑO DE TRANSFORMADORES

Para el diseño de los transformadores se puede proceder de forma análoga al diseño de los inductores. Para ello se deducirá una expresión análoga para el producto de áreas escrita en función de la potencia aparente del transformador. (se deducirá posteriormente):

$$A_c A_w = \frac{S}{2 f B_{\max} J k_{cu}}$$



La relación entre la tensión aplicada en el primario de un transformador y el flujo que aparece es:

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}, \text{ que en el caso de ondas cuadradas es:}$$

$$V_1 = N_1 \frac{2\phi_{\max}}{\frac{1}{2f}} = 4N_1 f \phi_{\max}$$

El número de espiras en el primario es:

$$N_1 = \frac{V_1}{4f\phi_{\max}} = \frac{V_1}{4fA_c \Delta B} \quad (C)$$

Tensión y Flujo en un Transformador

y en el secundario: $N_2 = N_1/a$, donde a es la relación de transformación.

Conductores

Suponiendo despreciable la corriente de magnetización, la fuerza magnetomotriz primaria es igual a la secundaria:

$$\mathfrak{F} = N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Si J es la densidad de corriente máxima que admiten los conductores, en ambos devanados será (A_{cu} =Sección de los conductores):

$$I_1 = A_{cu1} J$$

$$I_2 = A_{cu2} J$$

De las expresiones anteriores, si se supone el mismo tipo de conductores en primario y secundario:

$$N_1 A_{cu1} = N_2 A_{cu2}$$

El área de ventana se reparte entre los dos devanados:

$$A_w k_{cu} = N_1 A_{cu1} + N_2 A_{cu2} =$$

$$2N_1 A_{cu1} = 2N_2 A_{cu2}$$

DISEÑO DE TRANSFORMADORES

De la fórmula anterior ($A_w k_{cu} = 2N_1 A_{cu1} = 2N_2 A_{cu2}$) se deduce:

$$A_{cu1} = \frac{A_w k_{cu}}{2N_1}$$

$$A_{cu2} = \frac{A_w k_{cu}}{2N_2}$$

De las fórmulas anteriores y de $I_1 = A_{cu1} J$ $I_2 = A_{cu2} J$ se pueden calcular las corrientes máximas por los devanados:

$$I_{1\max} = \frac{JA_w k_{cu}}{2N_1} \quad (D)$$

$$I_{2\max} = \frac{JA_w k_{cu}}{2N_2}$$

Para demostrar la fórmula del producto de áreas, se puede despejar V_1 de la ecuación (C) obteniendo:

$$V_1 = 4fN_1 A_c \Delta B$$

Si la ecuación anterior se multiplica por el valor de la corriente $I_{1\max}$ del primario (D) se obtiene la potencia aparente máxima (para la que hay que dimensionar el transformador):

$$S_1 = 2fA_c \Delta B J A_w k_{cu}$$

Reorganizando los términos de la ecuación anterior se obtiene la ecuación que da el producto de áreas:

$$A_c A_w = \frac{S_1}{2f\Delta B J k_{cu}}$$

SELECCIÓN DE CONDENSADORES

- **Capacidad.**
- **Tensión máxima.**
- **Corriente eficaz.**
- **Frecuencia.**
- **Resistencia Serie Equivalente (ESR).**
- **Autoinducción Serie Equivalente (ESL).**
- **Volumen (tamaño).**

En electrónica de potencia se utilizan fundamentalmente tres tipos:

- **Electrolíticos.**
 - **Alta capacidad.**
 - **Altas ESR y ERL (Fuertes pérdidas I^2R).**
 - **Tensión máxima de unos 450÷500 V. Necesidad de conexión serie.**
 - **Tienen polaridad (peligro de explosión si se cambia la polaridad).**
- **Plásticos y Cerámicos.**
 - **Muy baja capacidad.**
 - **Muy bajas ESR y ERL.**
 - **Tensiones máximas muy elevadas.**
 - **No tienen polaridad.**

El uso principal de los condensadores electrolíticos es para mantener en determinados nudos una tensión constante. Si se requiere que el condensador suministre altas corrientes con cambios bruscos, es necesario conectar en serie con el condensador electrolítico un condensador plástico o cerámico que pueda suministrar instantáneamente la corriente solicitada, que el electrolítico no puede dar debido a su ESL.

Los condensadores plásticos y cerámicos suelen emplearse además para realizar circuitos resonantes o amortiguadores, en los que se requieren valores pequeños de las capacidades.