

ELECTRONICA DE POTENCIA.

GUIA PRÁCTICA

Ing. José Emilio Ledo Galano.

Introducción.

Pertenezco a una generación de ingenieros, cuyos primeros pasos en La Electrónica de potencia se remontan a los años 80, una época donde aún reinaban los diodos, tiristores y algunos transistores bipolares de conmutación. Recuerdo aquellos engorrosos circuitos auxiliares, usados para el apagado de los tiristores principales; formados por inductores, condensadores de potencia, diodos y tiristores auxiliares, que debían ser activados según una secuencia estricta, a partir de rigurosos cálculos de los procesos transitorios que ocurrían en el circuito en cada periodo.

También aparecieron los GTO (Gate turn off Thyristor), una especie de tiristor que podía ser apagado por la compuerta, si a la misma se le aplicaba un potente impulso de corriente negativa. Debo admitir, que he sobrevivido sin haber tenido nunca uno de ellos en mis manos.

Por aquel entonces, ya se hablaba de los MOSFETs de potencia, pero solo los veíamos en la revistas. Lo describían como un transistor prácticamente ideal, que solo tenía cosas buenas, un ente celestial de conmutación rápida, que se controlaba por voltaje y no consumía energía de control. Más tarde, cuando llegaron y comenzamos a familiarizarnos con los primeros ejemplares, quedó claro, que también tenían cosas malas.

Con este pequeño ensayo, no pretendo escribir un libro de texto, ni nada que se le parezca; solo intentaré plasmar de la forma más escueta posible, todo lo aprendido desde el punto de vista práctico durante los casi 30 años, que llevo implicado de forma continua, en el diseño, servicio y reparación de convertidores de potencia basados en semiconductores. Los pequeños detalles y sutilezas, que solo se adquieren al combinar una sólida base teórica adquirida en la universidad, con el intento de dar soluciones a los problemas cotidianos que van surgiendo a lo largo del desarrollo de diferentes proyectos.

Comenzaré haciendo un resumen sobre las principales características y funcionamiento de los principales componentes activos y pasivos usados en los circuitos de potencia. Luego iremos viendo diferentes tipos de convertidores de uso generalizado en reguladores de voltaje y corriente, temperatura, cargadores de baterías, control de motores, calentamiento por inducción, inversores en general, etc.

Espero que sea útil, fundamentalmente, para aquellos que se inician en el campo de la electrónica de potencia, jóvenes técnicos e ingenieros recién incorporados a la vida laboral, y también a aficionados entusiastas.

No puedo terminar esta pequeña introducción, sin antes advertir sobre los peligros que encierra el trabajo con los circuitos de conversión de energía.

En estos circuitos, como su nombre indica, la potencia no escasea. En ellos normalmente está presente el potencial de la red eléctrica y se trabaja con niveles de voltaje muy peligrosos para la vida. Los capacitores pueden almacenar la energía del campo eléctrico durante días, y también pueden explotar, si se conectan mal, o si se exceden sus parámetros máximos permitidos. Cuidado con las bobinas y transformadores, pueden generar picos de voltajes que perforan el aislamiento.

Antes de manipular un circuito, hay que asegurarse que ha sido desconectado de la red o fuente de alimentación alternativa, y de que han sido descargados los capacitores. Se debe ser muy cuidadoso cuando hay que realizar mediciones en caliente. Intenten no estar solos en estos casos.

CAPITULO I

LOS LADRILLOS QUE COMPONEN LA ELECTRONICA DE POTENCIA

Bienvenido al mundo real.

Los circuitos electrónicos de potencia pueden ser diversos y complejos, sin embargo los mismos están formado a partir de una base de componentes de tipos bastante limitada. Me refiero a aquellos circuitos, que superan el kW de potencia. Por debajo de los 500 vatios, existe una amplia gama de circuitos integrados especializados, que resuelven con gran eficiencia, fiabilidad y miniaturización las tareas de conversión, cubriendo todas las configuraciones posibles de convertidores DC-DC, Dimmers , reguladores del factor de potencia, etc.

En primer lugar tenemos los llamados componentes pasivos, donde podemos ubicar los resistores, capacitores, inductores y transformadores. Los componentes pasivos no generan ni controlan la energía, solo pueden almacenarla, consumirla o transmitirla.

En segundo lugar, tenemos los componentes activos, que normalmente son los semiconductores de potencia: diodos, transistores y tiristores. Los mismos pueden encontrarse como componentes simples o modulares, formando puentes y semipuentes rectificadores monofásicos o trifásicos a base de diodos y tiristores, o puentes y semipuentes inversores a base de tiristores transistores bipolares, IGBTs o MOSFETs.

Cada uno de estos componentes, fueron estudiados en la universidad de forma detallada, y para mejor comprensión de su funcionamiento, siempre se usaban modelos matemáticos, que idealizaban su comportamiento, de forma que se resaltaban los parámetros fundamentales, y se despreciaban los parámetros parásitos, presentes en cada uno de ellos. De esta forma se conseguía explicar la física de su operación, mediante expresiones analíticas armoniosas, que muchas veces resultaban ser soluciones a sistemas de ecuaciones diferenciales lineales de primer y segundo orden. Un ejemplo típico, lo podemos ver en la teoría que explica el funcionamiento de los transformadores.

Semejante enfoque, es de gran utilidad a nivel académico, ya que permite simplificar el proceso de aprendizaje, y la comprensión de los contenidos. En el análisis de aplicaciones reales, semejante idealización puede conllevar a errores graves, que pueden provocar el fallo de todo el sistema.

Los resistores de potencia presentan una inductancia parásita, que puede estar entre varios nH y cerca de los mH, en dependencia de su tamaño y tecnología de fabricación.

Los conductores, ya sean en forma cableada o de circuito impreso, presentan siempre inductancia parásita, que depende de su longitud y geometría. Un centímetro de conductor recto, tiene una inductancia aproximada de 10 nH.

Los capacitores tienen resistencia e inductancia parásitas, en mayor o menor medida, en dependencia del tipo de condensador, su tamaño y la tecnología de fabricación.

Los inductores presentan una resistencia óhmica diferente de cero, que provoca pérdidas de potencia en forma de calor, en la mayoría de los casos tienen un núcleo magnético no lineal con pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault, y que además puede llegar a saturarse.

Los transformadores son los campeones en cuanto a parásitos se refiere. Inductancia de dispersión, resistencia de los devanados, capacitancia entre bobinados y todas las pérdidas de potencia relacionadas con las propiedades físicas del material del núcleo.

Los diodos tiristores y transistores al conmutar, necesitan un tiempo determinado para entrar en conducción o apagarse. Dichos tiempos pueden variar mucho en dependencia del componente que se utilice. Todos estos semiconductores, presentan grandes capacitancias parásitas entre sus electrodos, la cual además no es constante si no que depende de factores como el voltaje aplicado y la temperatura del dispositivo.

Los transistores bipolares IGBTs y MOSFETs, adolecen del efecto Miller. Las variaciones del estado de la salida (colector o drenaje) durante los transitorios, influye en el estado del circuito de entrada o compuerta a través de la capacitancia parásita entre estos electrodos. Más adelante veremos esto en detalle.

Todo MOSFET lleva de compañero un diodo parásito entre drenaje y fuente, que es producto del proceso tecnológico de fabricación, imposible de erradicar ya que forma parte de la física del sistema, es el diodo antiparalelo. El problema de este diodo es que presenta un tiempo de recuperación mucho más largo que los tiempos de conmutación del propio transistor, y esto no es bueno si se quiere operar a altas frecuencias.

Son precisamente estos parámetros indeseables presentes en cada dispositivo, los que determinan el comportamiento de todo el circuito; de ahí que la correcta selección de cada componente, para que sus parámetros estáticos y dinámicos estén acorde con cada aplicación, es sin duda una de las partes más importante de cada diseño.

Resistores

Las resistencias son el componente más predecible en toda la electrónica. Son lineales y su funcionamiento se puede describir por la ley de Ohm

$$I = \frac{U}{R};$$

En electrónica de potencia, son tres los parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de elegir una resistencia:

- Resistencia nominal.
- Potencia nominal.
- Inductancia parásita.

La resistencia real de cualquier resistor, se ve afectada por la temperatura, normalmente esa dependencia es directamente proporcional para los resistores de metal, película metálica, capas de óxidos y resistencias de carbón, y es inversamente proporcional para la mayoría de resistores basados en materiales semiconductores.

Un caso peculiar son los termistores, dispositivos donde la variación de la resistencia con la temperatura es muy elevada, y son muy usados como sensores de temperatura en todo tipo de equipos y circuitos.

Emplear una resistencia con bajo valor de inductancia, es vital para un resistor integrante de una red Snubber, o si se utiliza como shunt para medir la corriente en una porción del circuito. Solo se recomienda usar resistores bobinados en circuitos que operen en corriente continua o baja frecuencia: Frenado de motores, carga y descarga de capacitores, como elementos calefactores en hornos y incubadoras, etc.



Fig.1.1.Resistores de potencia.

La potencia P que se disipa en una resistencia:

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R};$$

Donde la potencia se expresa en vatios, el voltaje en voltios, la corriente en amperios y la resistencia en Ohmios.

De los cursos elementales de física y electricidad, sabemos que los resistores pueden conectarse en serie y paralelo para modificar su resistencia y potencia disipada. En ambos casos, es recomendable que todas las resistencias tengan el mismo valor, para que la potencia disipada sea la misma en cada una de ellas, entonces tendremos que para la conexión serie:

$$P_{eq} = P \cdot N; \quad y \quad R_{eq} = R \cdot N;$$

Mientras que para la conexión en paralelo:

$$P = P \cdot N; \quad y \quad R_{eq} = R/N;$$

Donde P y R son la potencia y resistencia nominal de los resistores usados y N es la cantidad de resistores.

Muchos resistores modernos entre 20 y 50 vatios vienen en encapsulado TO-220, TO-247 etc., y están diseñado para trabajar adosadas a un disipador de calor. En su caso es importante consultar el parámetro I^2t que nos da una idea de la energía máxima que puede absorber sin deteriorarse, teniendo en cuenta, que si la potencia aplicada es excesiva, el calentamiento es adiabático y no hay suficiente tiempo para la evacuación del calor hacia la superficie de disipación.

No utilice nunca resistores bobinados en redes Snubbers de protección de semiconductores, ni como elemento para censar la corriente. Su inductancia parásita es demasiado elevada.

Capacitores de potencia.

Los capacitores o condensadores, son dispositivos encargados de almacenar la energía del campo eléctrico; están constituido por dos placas separadas por un material dieléctrico.

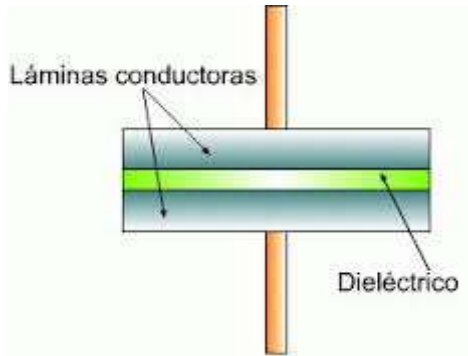


Fig.1.2. Esquema simplificado de un capacitor.

Su parámetro fundamental es la capacitancia eléctrica C , que es una constante que establece una relación entre la carga almacenada y el potencial aplicado a las placas del capacitor:

$$C = Q/V;$$

Donde la carga se expresa en Culombios y el potencial en voltios.

C se expresa en Faradio Φ , en honor al físico inglés, pero un faradio es una capacitancia muy grande, y es mucho más natural el uso de pico faradio, nano faradio y microfaradio.

$$1pF = 10^{-12}F; \quad 1nF = 10^{-9}F; \quad 1\mu F = 10^{-6}F;$$

La capacitancia o capacidad de almacenar cargas, depende del tamaño y geometría del condensador, así como de las propiedades del dieléctrico que se utilice para su fabricación.

Existen condensadores de cerámica, plástico, papel, poliéster, película de polipropileno, electrolíticos, aceite, tántalo, Mono capa, doble capa, electroquímicos, etc. Cada una de estas familias de condensadores tiene sus características propias, que determinan los rangos de capacitancia, y su cualidad para trabajar en distintas aplicaciones.

Hoy día, los capacitores comerciales cubren un ancho margen de capacitancias, desde unos pocos pico Faradios hasta miles de Faradios, presentes en los súper capacitores electroquímicos de doble capa.

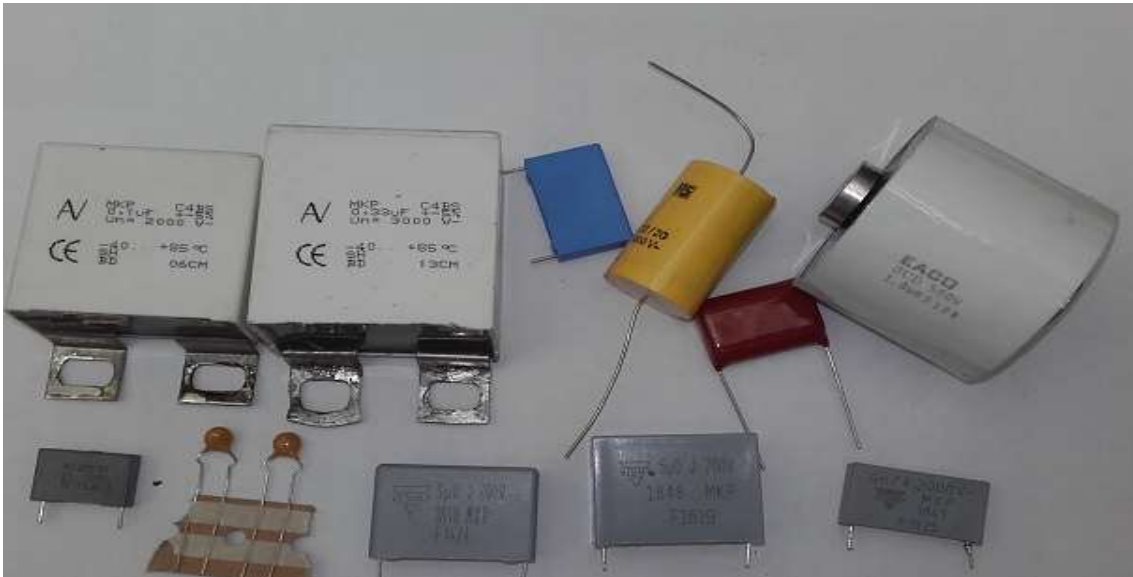


Fig.1.3. Capacitores usados en circuitos de potencia.

La corriente directa no puede circular a través de un condensador. Si conectamos un capacitor a una batería con voltaje E , la corriente circulará solo un instante mientras dure el proceso de carga, a partir de entonces, el voltaje en el capacitor se iguala al de la batería y la corriente cae a cero.

Cuando decimos que la corriente circula a través de un condensador, no significa que los electrones atraviesen el dieléctrico.

La corriente surge como un intercambio de cargas entre los electrodos del capacitor a través del circuito externo.

La corriente de un condensador se puede expresar como la velocidad de variación de la carga en el tiempo:

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt};$$

Esto implica que dicha corriente es directamente proporcional a la capacitancia C , a la frecuencia de trabajo F y al voltaje V que se le aplique al condensador.

Podemos escribir la expresión del voltaje entre los electrodos del capacitor, partiendo de la ecuación anterior:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c dt;$$

La energía W que puede almacenar un capacitor, depende de la capacitancia y del voltaje que se le aplique:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2;$$

De la fórmula de la energía, podemos ver que el voltaje de un capacitor no puede variar a saltos, de forma instantánea. Para toda transformación de energía se requiere un intervalo de tiempo mayor que cero. Esto se usa como una de las leyes fundamentales en la teoría de cálculos de los procesos transitorios de los circuitos eléctricos, donde el voltaje en los capacitores y la corriente en los inductores se usan como condiciones iniciales para integrar las ecuaciones diferenciales que describen los procesos físicos que tienen lugar durante la conmutación de los circuitos.

Esto es lo que sabemos de los capacitores de los distintos programas académicos. En ellos se habla fundamentalmente de dos parámetros:

- La capacitancia.
- El voltaje máximo permitido.

En electrónica de potencia tenemos que ver otras características relevantes, a la hora de seleccionar un capacitor:

- Potencia del capacitor en Vares o kilo vares.
- Corriente máxima que puede soportar.
- Resistencia serie equivalente o ESR.
- Inductancia serie equivalente o ESL.

De modo que la calidad de un capacitor es mayor mientras menor sean los parámetros ESR y ESL, y este tendrá un mejor comportamiento a altas frecuencias de trabajo.

Normalmente, ESR y ESL son mayores a medida que aumenta la capacitancia, por eso es mucho más eficiente usar varios capacitores de menor capacitancia en paralelo formando un banco, cuyas características son mucho mejores que la de cada capacitor por separado. Si el espacio no lo permite, entonces se recomienda colocar en paralelo por lo menos un capacitor con bajo ESR.

El comportamiento de un condensador cuando se conecta a un circuito, puede explicarse mediante su impedancia, llamada Reactancia Capacitiva X_C . La reactancia capacitiva (símbolo X_C) es una medida de la oposición que presenta el condensador a la corriente alterna (AC). Es similar a la resistencia y es medida en ohmios, Ω , pero la reactancia es más compleja que la resistencia porque su valor depende de la frecuencia (f) de la señal eléctrica que pasa a través del condensador así como del valor de la capacidad, C.

La Reactancia capacitiva, es una magnitud vectorial, cuyo módulo se calcula por la siguiente fórmula:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} ;$$

Donde: X_C = reactancia in ohmios (Ω)

f = frecuencia in Hertz (Hz)

C = capacidad in faradios (F)

La reactancia X_c disminuye con la frecuencia, y es infinitamente grande Para corriente continua (DC). Así ocurre que los condensadores dejan pasar la AC pero bloquean la DC.

Una peculiaridad importante del capacitor, es que en él la corriente se adelanta 90 grados con respecto al voltaje, exactamente lo contrario de lo que ocurre con las cargas inductivas; por este motivo, una de las principales aplicaciones de los capacitores es como compensadores del factor de potencia o coseno de Φ .

Como en el caso de los resistores, los capacitores también pueden ser conectados en serie y paralelo, para obtener otras capacitancias, mayores voltajes y potencia reactiva,

Cuando de conectan en paralelo, la capacitancia resultante aumenta:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + C_n ;$$

La capacitancia disminuye si los conectamos en serie:

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_n}} ;$$

Es posible por ejemplo fabricar un potente banco de condensadores para calentamiento por inducción, mediante la conexión en paralelo de cientos de capacitores de poliéster de unos pocos nano Faradios y el voltaje adecuado; solo hay que conectarlo de tal forma que el sistema esté equilibrado, y todos funcionen a la par.

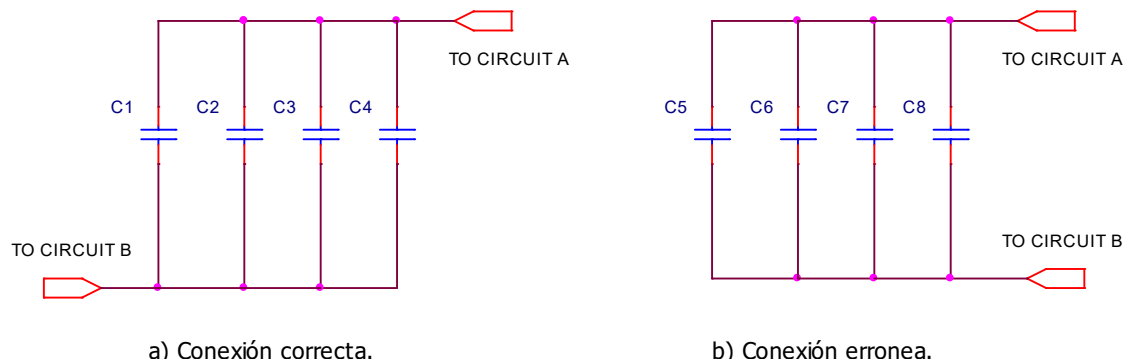


Fig.1.4. Conexión de capacitores en paralelo.

A veces, es útil conectar dos o más capacitores en serie, para poder usarlos en circuitos donde el voltaje supere el valor máximo permitido para un solo capacitor. En este caso, es conveniente que todos los capacitores tengan la misma capacitancia, para que el reparto de voltaje sea equitativo, tanto en circuitos de corriente alterna como en corriente continua.

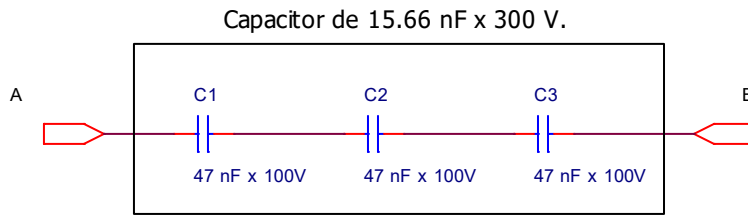


Fig.1.5. Conexión en serie de condensadores.

Un caso especial, es la conexión en serie de dos capacitores electrolíticos o de aluminio, con el objetivo de poder utilizarlos en un circuito de corriente alterna de baja frecuencia, por ejemplo como capacitor de trabajo o arranque de motores asíncronos monofásicos. Para ello hay que conectarlos en serie y con la polaridad inversa.

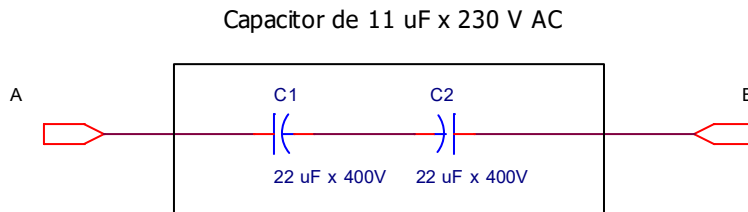


Fig.1.6. Obtención de un capacitor de corriente alterna usando dos electrolíticos.

Inductores y Transformadores.

Los elementos inductivos constituyen una parte fundamental en Electrónica de potencia, resulta casi imposible prescindir de ellos en cualquier aplicación real, por ello todo aquel que quiera incursionar en este mundo debe familiarizarse con los conceptos fundamentales de la teoría del campo magnético y las propiedades de los materiales ferromagnéticos usados para la fabricación de inductores y transformadores.

Los transformadores y autotransformadores se usan para transmitir la energía eléctrica hacia los circuitos secundarios, y permiten modificar o no su amplitud y fase. Los inductores se usan para almacenar la energía, esa es la principal diferencia entre ellos.

Los transformadores se fabrican con núcleos ferromagnéticos de alta permeabilidad magnética relativa μ_r alcanzando valores de varias decenas de miles. El material empleado se elige fundamentalmente en dependencia de la frecuencia de trabajo. Desde listones de acero electrotécnico para las frecuencias más bajas, hasta una gran variedad de materiales basados en polvo prensado de diferentes tipos de aleaciones (ferritas) para las frecuencias más altas, pasando por materiales de última generación a base de nanos cristales, partículas pulverizadas, materiales amorfos y otras tecnologías revolucionarias, que están logrando disminuir drásticamente el volumen de los inductores y transformadores. Es muy importante la correcta elección del tipo de núcleo para cada aplicación, ya que cada una de ellas ha sido optimizada para un rango de frecuencia específico, con su correspondiente μ_r , Inducción Magnética máxima B_m y nivel de pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Ya hay disponibles anillos magnéticos con entrehierro distribuido, destinados a la fabricación de inductores de potencia, capaces de almacenar grandes cantidades de energía.

En general, cualquier material magnético usado para la fabricación de inductores y transformadores debe cumplir lo mejor posible con las siguientes exigencias:

- Alto valor de la permeabilidad magnética relativa μ_r , tanto inicial como máxima. Este parámetro incide directamente en el número de espiras mínimo necesario para alcanzar la inductancia requerida
- Debe ser magnéticamente blando, lo que implica que se magnetice y desmagnetice fácilmente, con bajas pérdidas por histéresis
- Tener un alto valor de inducción magnética de saturación B_s , lo que permite disminuir el tamaño de los equipos electrónicos
- Tener alta resistencia al paso de la corriente eléctrica, para minimizar las corrientes parásitas
- Mantener las propiedades magnéticas ante grandes variaciones de la temperatura de trabajo
- Tener un bajo coeficiente de magnetostricción, para disminuir las vibraciones y hacer estable su funcionamiento bajo fuertes campos magnéticos
- Mantenerse estable ante cambios de temperatura, presentar una temperatura de Curie elevada
- Etc.

Está claro, que no existe ningún material ideal que reúna fielmente todas las exigencias arriba mencionadas. Por ello, no existe un material universal que satisfaga todas las necesidades y pueda ser usado en todas partes y aplicaciones; en la mayoría de los casos, la optimización de un parámetro afecta a otros. Por ejemplo, es difícil

mantener elevadas al mismo tiempo la permeabilidad magnética μ_r y la resistencia eléctrica del material, por lo que los núcleos destinados a la fabricación de inductores y transformadores de potencia a frecuencias por encima de 1MHz, presentan una μ_r muy

Es importante destacar, que los núcleos magnéticos con altos valores de μ_r , son buenos para la fabricación de transformadores, pero no para la fabricación de inductores, ya que no permiten almacenar grandes cantidades de energía.

Para almacenar grandes cantidades de energía se requiere la presencia de un entrehierro (Airgap), cuyo volumen mínimo en mm^3 debe ser debidamente calculado.

por debajo de las 1000 unidades.

Las ferritas blandas convencionales, cuyo material base es el Mn-Zn y el Ni-Zn, presentan un elevado valor de la permeabilidad relativa, y su Inducción magnética de saturación B_s no supera los 0.5 T (5000 gauss). Estas ferritas no se recomiendan para la fabricación de inductores, debido a su bajo valor de B_s .

Para la fabricación de inductores, es mucho más aconsejable el uso de alguno de los siguientes materiales:

- **Núcleos MPP.** Una mezcla de Ni-Fe-Mo. Presentan gran estabilidad térmica y un buen comportamiento ante campos magnéticos fuertes. Presentan las menores pérdidas en comparación con cualquier otro material ferromagnético; su permeabilidad magnética efectiva alcanza las 200μ . Este material presenta entrehierro distribuido, y está destinado a la fabricación de inductores en convertidores DC-DC, y filtros con elevado factor de calidad Q.
- **Núcleos High Flux.** Una mezcla de Fe-Ni. Presentan una alta inducción magnética de saturación $B_s = 1.5 T$ (15000 gauss). Su permeabilidad magnética puede alcanzar los 160μ . Ideal para la fabricación de inductores, choques, transformadores de pulsos y flybacks.
- **Núcleos Sendust.** Una mezcla de Fe-Si-Al. Su inducción magnética de saturación $B_s = 1.0 T$ (10000 gauss). La permeabilidad magnética puede alcanzar 125μ . Prácticamente carecen del fenómeno de magnetostricción, por lo que permiten fabricar inductores y transformadores que no generan ruido audible.
- **Núcleos Mega Flux.** Una mezcla de Fe-Si. Alcanzan la mayor inducción magnética de saturación B_s en comparación con todos los demás materiales descubiertos hasta la fecha. Llegando a los 1.6 T (16000 gauss). Su permeabilidad magnética no supera las 90μ .

Al diseñar un inductor, es importante tener en cuenta la forma de onda de la corriente que por él circula. No es lo mismo trabajar en corriente alterna, que en corriente directa, o corriente alterna con componente de DC. El ciclo de magnetización puede ser simétrico o asimétrico. Al realizar el análisis es necesario considerar los valores instantáneos de voltajes y corrientes durante los procesos transitorios y régimen estacionario, para evitar la saturación del núcleo.

Los transformadores de potencia, generalmente trabajan solamente en ciclos simétricos de magnetización, ya que una mínima componente de corriente directa a través de cualquiera de sus devanados puede ser catastrófico para el funcionamiento de todo el convertidor. En la mayoría de los casos, el bobinado primario se conecta en serie con un capacitor de potencia, que garantiza el equilibrio de las áreas voltios / segundos en cada periodo, o dicho de otra forma bloquea el paso de la componente de corriente continua que pueda estar presente.

Entre los principales fabricantes de materiales magnéticos, podemos citar grandes marcas como *Epcos*, *TDK*, *Ferroxcube*, *Fair Rite*, *Magnetics*, *Gammamet*, *Chan Sung (CS)*, *Micrometals* entre otras. En sus Webs, estas compañías ofrecen todos los datos necesarios para la correcta selección y uso de sus núcleos.

Cálculo de un Inductor

Primeramente, calculamos el tamaño mínimo del entrehierro necesario para almacenar la energía, teniendo como datos la inductancia L del inductor, la corriente máxima de pico y la inducción magnética máxima permitida por el material usado como núcleo.

La energía almacenada por un inductor, la podemos calcular como la suma de la energía W_{fe} almacenada en el campo magnético del núcleo y la energía W_{δ} almacenada en el entrehierro:

$$W_{total} = W_{fe} + W_{\delta}$$

$$W_{total} \approx \frac{B^2 \cdot l_{fe} \cdot A}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} + \frac{B^2 \cdot \delta \cdot A}{2 \cdot \mu_0}$$

Donde

B es la inducción magnética en Tesla

l_{fe} es la longitud de las líneas magnéticas dentro del núcleo, en metros

δ es la longitud del entrehierro en metros

A es el área de la sección transversal del núcleo, en m^2

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

Normalmente, para la fabricación de inductores se usan materiales magnéticos con altos valores de μ_r , por lo que casi la totalidad de la energía se almacena en el entrehierro, podemos despreciar W_{fe} y considerar que toda la energía almacenada por el inductor es:

$$W_{total} \approx \frac{B^2 \cdot \delta \cdot A}{2 \cdot \mu_0}$$

Por otra parte, sabemos que la energía almacenada por una bobina se puede calcular también por la fórmula:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Si juntamos las dos últimas expresiones, entonces tenemos que el volumen mínimo del entrehierro requerido $V = \delta \cdot A$ se puede calcular por la fórmula

$$V_{\delta} \geq \frac{L \cdot I^2 \cdot \mu_0}{B^2}$$

Donde:

V_{δ} – Volumen del entrehierro en metros cúbicos

L – Inductancia del inductor en Henry

I – Corriente de pico en Amperios

B – Inducción máxima del campo magnético del núcleo en Tesla

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

De aquí vemos, que para disminuir el tamaño de los inductores, debemos seleccionar materiales con altos valores de Inducción magnética B . Para la mayoría de las ferritas, su valor no sobrepasa los 300 mili Tesla, pero hay materiales especialmente optimizados para ser usados como inductores, cuya inducción magnética alcanza hasta 1.6 T.

Una vez conocido el volumen del entrehierro V_{δ} podemos elegir el núcleo magnético apropiado para la fabricación del Inductor. Lo más sencillo sería seleccionar un material con entrehierro distribuido, en cuyo caso solo habría que mirar en el datasheet y buscar un núcleo con un volumen de entrehierro mayor o igual al resultado de nuestro cálculo.

No siempre se tiene a mano uno de estos núcleos, por lo que lo más habitual es usar un núcleo de ferrita del tipo EE, EI, P, Rm , etc. y añadirle un entrehierro δ artificial.

La sección transversal del núcleo debe ser lo suficientemente grande, para que el entrehierro δ no sobrepase 1.5 mm, ya que entonces la permeabilidad magnética efectiva del núcleo caería demasiado, y se necesitarían muchas espiras para conseguir la inductancia nominal. Un elevado número de espiras conlleva a mayores pérdidas en conducción, aumento de la capacitancia parásita, y aumento del tamaño del inductor.

Cuando hayamos elegido el núcleo, podemos calcular el número de espiras del inductor, partiendo de los siguientes datos:

$$\delta = V_{\delta} / A_e \text{ – Longitud del entrehierro en metros}$$

L – Inductancia del inductor en Henry

A_e – Sección transversal núcleo en m^2

μ_r – Permeabilidad magnética relativa del material del núcleo

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} N/A^2$ permeabilidad magnética del vacío

l_m – Longitud de las líneas magnéticas del núcleo en m

Calculamos la permeabilidad magnética efectiva del núcleo con entrehierro

$$\mu_{ref} = \frac{\mu_r}{\left(1 + \mu_r \cdot \frac{\delta}{l_m}\right)}$$

Finalmente, el número de espiras N del inductor:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_m}{\mu_{ref} \cdot \mu_0 \cdot A_e}}$$

El diámetro del alambre del devanado, depende del valor de la corriente efectiva I_{rms} y de la densidad S de la corriente permitida según las características de la bobina. El valor de S suele fijarse entre $1.5 \dots 5 A/mm^2$ dependiendo de las condiciones de refrigeración y el aumento de temperatura permitido.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{rms}}{\pi \cdot S}}, \text{ en } mm$$

En la página de cálculos de la Web www.ledoelectronics.com pueden disfrutar de un Apple que le permite realizar todos estos cálculos de una forma rápida y sencilla.

Ejemplo 1.

Veamos un ejemplo de cálculo de un inductor para un convertidor DC-DC buck que se alimenta de un rectificador trifásico conectado a la red de 380V AC, con una corriente máxima de salida de 15 A. Los cálculos del convertidor establecen que dicho inductor debe tener una inductancia $L = 240 \mu Hn$, y su corriente de saturación I_{sat} debe ser mayor de 15A .

Lo más eficiente sería seleccionar un núcleo toroidal del tipo High Flux o Sendust, con entrehierro distribuido, y un alto valor de B_s , lo que permitiría minimizar el volumen del inductor, y disminuir el ruido audible generado; sin embargo, tomaremos como núcleo para su fabricación, la configuración EE de Epcos

con material N87, muy fácil de conseguir. Concretamente el E55/28/25, ya que hemos verificado que el modelo inferior E42/xx/xx se nos queda pequeño para la potencia requerida.

Entonces tenemos los siguientes datos para proceder con el cálculo:

Parámetro	valor	comentario
$L, \mu\text{H}$	240	Inductancia nominal del Inductor
I, A	15	Corriente nominal del Inductor
B_{max}, T	0.39	Inducción magnética máxima del material N87 a 100 °C
A_e, mm^2	420	Área de la sección transversal del núcleo
l_e, mm	124	Longitud de las líneas magnéticas
μ_e	1740	Permeabilidad efectiva del núcleo según hoja de datos

Calculamos el volumen del entrehierro:

$$V_{\delta} \geq \frac{L \cdot I^2 \cdot \mu_0}{B^2} = \frac{240 \times 10^{-6} \times 15^2 \times 4\pi \times 10^{-7}}{(0.39)^2} = 4.46 \times 10^{-7} \text{ m}^3 = 4.46 \times 10^2 \text{ mm}^3$$

Pueden verificar el resultado en la página de cálculos de mi web, en el apartado "Cálculo de Inductores"

Calculamos ahora la longitud del entrehierro requerido:

$$\delta = \frac{V_{\delta}}{A_e} = \frac{446 \text{ mm}^3}{420 \text{ mm}^2} = 1.062 \text{ mm}$$

Un valor que entra dentro de lo normal para este tamaño de núcleo. Valores por encima de los 2.5 mm no son aconsejables, ya que disminuiría demasiado la permeabilidad magnética efectiva, lo que dificultaría poder obtener la inductancia requerida; en ese caso sería necesario seleccionar un núcleo de mayor tamaño.

Para garantizar el entrehierro en el núcleo elegido, es necesario colocar entre sus dos partes, láminas separadoras con un espesor igual a la mitad del valor de δ obtenido en el cálculo anterior. Dichas láminas deben ser de un material no ferromagnético, y no conductor de la corriente eléctrica.

Calculamos la permeabilidad magnética efectiva del núcleo con entrehierro

$$\mu_{\text{ref}} = \frac{\mu_e}{(1 + (\mu_e \cdot \frac{\delta}{l_m}))} = \frac{1740}{(1 + 1740 \times \frac{1.062 \text{ mm}}{124})} = 109.42$$

Ahora ya podemos determinar el número de espiras necesario para obtener la inductancia nominal:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l_e}{\mu_{\text{ref}} \cdot \mu_0 \cdot A_e}} = \sqrt{\frac{240 \times 10^{-6} \text{ H} \times 124 \times 10^{-3} \text{ m}}{109.42 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 420 \times 10^{-6} \text{ m}^2}} = 22.7 \text{ espiras}$$

$N = 23$ espiras

Es importante destacar, que el número de espiras N obtenido, debe ser respetado. Si lo aumentamos para incrementar la inductancia, en ese mismo grado estaremos disminuyendo la corriente nominal del inductor, ya que la intensidad del campo magnético:

$$H = \frac{I \times N}{l_e}$$

Por último, calculamos el diámetro del alambre de cobre esmaltado con el que bobinaremos el Inductor:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{\text{rms}}}{\pi \cdot S}} = \sqrt{\frac{4 \times 15}{\pi \times 5 \text{ A/mm}^2}} = 1.95 \text{ mm}$$

Hemos aplicado una densidad de corriente $S = 5A/mm^2$, ya que en los inductores con pocas espiras las condiciones de refrigeración del alambre son muy buenas.

El volumen del inductor calculado, podría disminuirse hasta cinco veces, si hubiésemos utilizado un anillo toroidal del tipo Sendust, High flux o Mega flux, los cuales por tener el entrehierro distribuido por todo el anillo, presentan una permeabilidad magnética efectiva por debajo de 180μ , pero su Inducción magnética de saturación B_s se encuentra entre los 1.2 y 1.6 Tesla.



Fig.1.7. Imagen del inductor construido acorde con los cálculos.

Mediciones prácticas de Inductores

Medición de la Inductancia

En muchas ocasiones es necesario poder medir los parámetros de un inductor desconocido, o comprobar otro que hayamos fabricado sobre un núcleo cuyos parámetros desconocemos, y hacerlo sin el uso de equipamiento sofisticado.

Esto es posible, se puede medir la inductancia L y la corriente de saturación de prácticamente cualquier Inductor usando un osciloscopio como instrumento fundamental. Se trata de métodos rudimentarios que permiten obtener estos parámetros con un error por debajo del 5%; precisión más que suficiente para garantizar la fiabilidad de nuestros convertidores.

La inductancia la podemos medir usando solamente un Osciloscopio, para ello conectamos en paralelo con

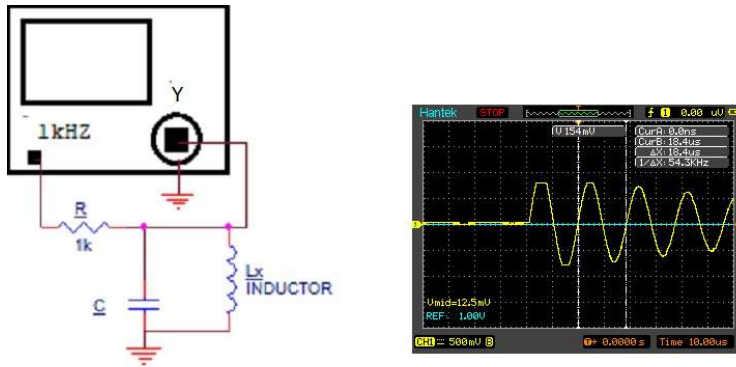


Fig.1.8. Medición de la inductancia de un Inductor usando un Osciloscopio.

el inductor L_x un capacitor de capacitancia conocida, y medimos la frecuencia de resonancia (oscilaciones amortiguadas que aparecen en la pantalla del osciloscopio. En caso de que el osciloscopio carezca de la típica señal de calibración, o en caso de que la inductancia de la bobina sea muy grande y la frecuencia de resonancia esté por debajo de los 5 kHz, entonces habría que usar otra fuente de señal para excitar el tanque resonante $L_x C$, también se puede usar con este fin la salida de señal de sincronismo presente en muchos osciloscopios analógicos.

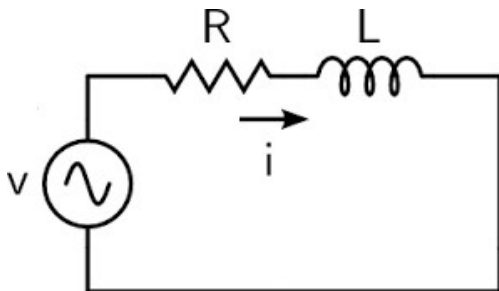
La instalación está representada en la Fig.1.8. La resistencia R solo se usa para limitar la corriente de la señal procedente de la salida de calibración. La instalación fue utilizada para comprobar el valor de la inductancia del Inductor fabricado con los cálculos del *ejemplo 1*. Se usó un capacitor de 33 nF, la frecuencia de resonancia fue de 54.3 kHz.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} ; \quad L = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \times 54.3 \times 10^3)^2 \times 33 \cdot 10^{-9}} = 260.5 \mu H$$

Al utilizar este método, hay que tener en cuenta que el inductor durante la medición se encuentra sometido a un campo magnético muy débil, y el núcleo ferromagnético presenta su permeabilidad magnética inicial. En el circuito real donde se use este inductor, su inductancia puede ser mayor o menor en dependencia de la intensidad del campo H .

La inductancia L de cualquier Inductor con núcleo ferromagnético no es una constante absoluta. Su valor fluctúa en dependencia de la intensidad del campo magnético H , la temperatura y otros factores externos.

Otra forma de medir la inductancia de un inductor, es conectarlo a una fuente de voltaje AC (Generador) en serie con una resistencia de valor conocido. Luego solo hay que aplicar la ley de Kirchof y las fórmulas elementales para el cálculo de circuitos de corriente alterna. En todo momento, la suma de la caída de tensión en R más la caída de tensión en la bobina es igual al voltaje de la fuente de voltaje AC.



La caída de tensión en la resistencia $U_R = I.R$ y la caída de tensión en la bobina (valor de pico)

$$U_L = I. \omega L$$

Si conocemos la frecuencia de la fuente de alimentación, podemos calcular la inductancia de forma indirecta, midiendo las caídas de voltaje con un multímetro o un osciloscopio. Solo hay que adecuar la frecuencia de la fuente y el valor de la resistencia con el rango de la inductancia, de tal forma que las impedancias de R y L estén en el mismo orden. También es muy importante no usar resistencias bobinadas con elevado valor de inductancia parásita.

También es posible medir la inductancia, usando un circuito integrador LR conectado a una fuente de corriente continua mediante conmutadores electrónicos. En ese caso, calculamos L en función del tiempo de integración. Ese método es implementado en muchos medidores profesionales de inductancias.

Medición de la corriente de saturación

No menos importante es conocer con certeza la corriente de saturación de un inductor. Hay unos pocos convertidores que basan su funcionamiento en este fenómeno, e incorporan reactores saturables en sus circuitos. En el resto de los convertidores electrónicos de potencia, por el contrario, hay que evitar a toda costa que los inductores alcancen la saturación, ya que esto puede provocar la destrucción de los transistores y diodos de potencia.

Aquí trataremos un método que permite obtener la corriente de saturación de un inductor, usando el mínimo de equipamiento, con el objetivo de que pueda ser accesible a la mayoría de ustedes.

Material necesario para implementar la instalación:

- Un Osciloscopio de dos canales
- Un transformador convencional de red
- Una resistencia shunt de baja inductancia

Estos tres componentes constituyen lo básico imprescindible para ejecutar la medición de la corriente. Luego, la instalación puede ser perfeccionada notablemente, si además podemos permitirnos un Variac y un conmutador, para poder regular, conectar y desconectar la corriente a través del Inductor, de forma operativa.

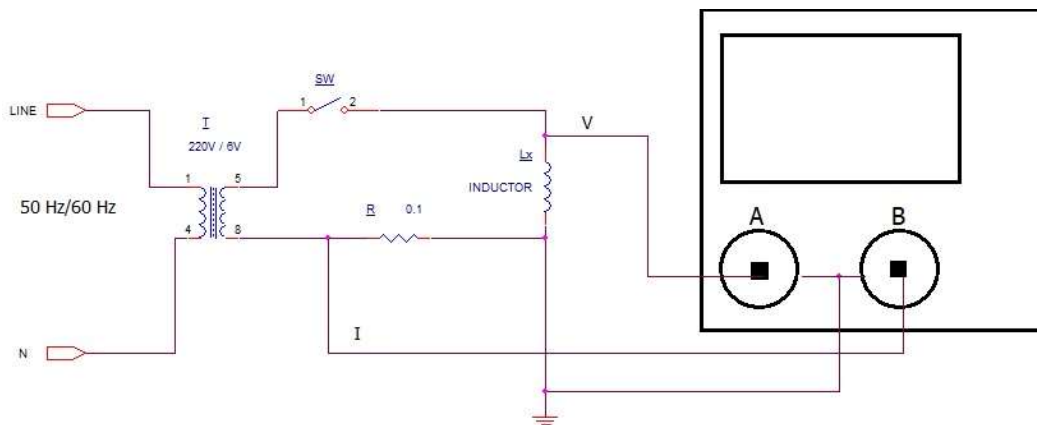


Fig.1.9. Medición de la corriente de saturación de un Inductor con el mínimo de recursos.

El transformador T debe ser capaz de proveer en el secundario una corriente mayor que la corriente de saturación del inductor que se quiera medir. La resistencia R hace la función de shunt para censar la corriente, su valor debe adecuarse a la corriente del inductor, y debe tener buena estabilidad térmica y baja inductancia parásita.

El método de medición es muy sencillo. Solo hay que detectar en la pantalla del Osciloscopio el instante cuando el inductor comienza a saturarse. Se ve claramente, ya que la caída de voltaje en el inductor cae bruscamente (señal del canal A) y aumenta la pendiente de la corriente (señal canal B)

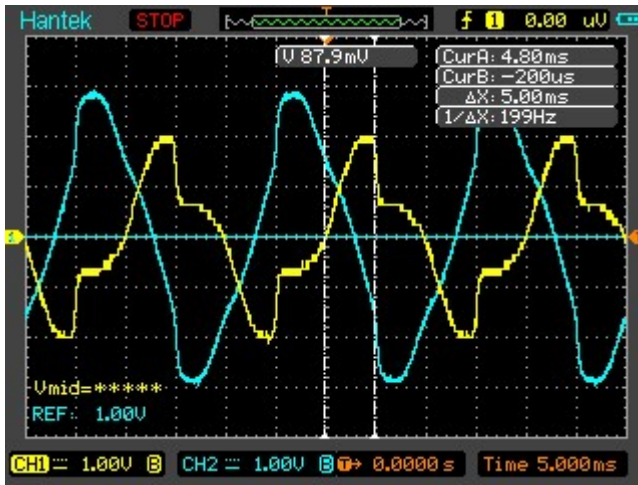


Fig.1.10. Apreciación del momento de saturación en la pantalla del Osciloscopio.

Entonces, la corriente de saturación la calculamos como:

$$I_{sat} = U_B / R$$

Donde U_B es el voltaje del canal B en el momento en que se inicia la saturación, y R es el valor del Shunt usado para medir la corriente.

Los parámetros del transformador T y la resistencia R deben seleccionarse teniendo en cuenta que la corriente no debe ser menor que la corriente de saturación del inductor, por cuestiones obvias, pero tampoco debe superarla en más de diez veces.

Los materiales ferromagnéticos pueden sufrir cambios irreversibles en sus propiedades, si son sometidos a campos magnéticos excesivos.



Fig.1.11. Estación experimental.