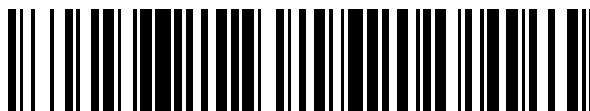


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 373 222**

51 Int. Cl.:
H03K 3/57

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **02793701 .0**

96 Fecha de presentación: **19.12.2002**

97 Número de publicación de la solicitud: **1554801**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **20.07.2005**

54 Título: **MODULADOR DE POTENCIA.**

30 Prioridad:
04.01.2002 US 35143

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.02.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.02.2012

73 Titular/es:
**SCANDINOVA SYSTEMS AB
ULTUNAALLÉN 2A
756 51 UPPSALA, SE**

72 Inventor/es:
**CREWSON, Walter y
WOODBURN, David**

74 Agente: **Arias Sanz, Juan**

ES 2 373 222 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Modulador de potencia

Campo de la invención

5 La invención se refiere a moduladores de potencia, y más específicamente a moduladores de potencia que tienen módulos de generación de pulsos que utilizan bobinados primarios y secundarios.

Antecedentes de la invención

a. Moduladores, descripción general y definiciones de la terminología

10 Un modulador es un dispositivo que controla el flujo de potencia eléctrica. Cuando se enciende una lámpara eléctrica y se vuelve a apagar, se podría decir que se está modulando la corriente que alimenta la lámpara. En su forma más común, un modulador suministra un tren de pulsos eléctricos de alta potencia a una carga especializada como un generador de microondas. La mayoría de los conjuntos de radares de alta potencia del mundo utilizan moduladores para suministrar pulsos de potencia a una fuente de microondas, la cual, a su vez, suministra la potencia, en la forma de burbujas periódicas de microondas, a una estructura de antena. Otras aplicaciones posibles de tal modulador de potencia se enumeran en el texto que sigue.

15 En las décadas transcurridas desde la Segunda Guerra Mundial, la estructura básica de los moduladores de potencia no ha cambiado significativamente. Un modulador convencional consiste en un suministro de potencia, que recibe potencia de una línea de potencia AC, eleva el voltaje, rectifica la potencia para producir una potencia directa de corriente DC, y se utiliza para suministrar energía a un almacén, constituido habitualmente por un banco de condensadores energéticos. Esto es necesario ya que la línea de potencia de entrada no puede suministrar la potencia pico requerida, de modo que el
20 almacén se utiliza para suministrar la potencia pico en pequeñas cantidades de energía, y se reabastece o rellena por la DCPS a una velocidad razonablemente constante con una potencia promedio mucho más baja.

25 Parte de la energía en este almacén se transfiere a continuación a un segundo almacén más pequeño, habitualmente una red de formación de pulsos (PFN). La PFN es una red de condensadores e inductores diseñada para suministrar potencia a una carga en la forma de un pulso rectangular (parte superior plana) con unos tiempos de subida y bajada rápidos en comparación con la anchura o duración del pulso.

30 La red de formación de pulsos (una línea artificial de transmisión o línea de retardo) se conmuta a continuación para conectarse al lado primario de un transformador de pulsos, habitualmente, aunque no siempre, un transformador de elevación de voltaje. El voltaje de la PFN antes de conmutar es V , y el voltaje aplicado al primario del transformador de pulsos es $V/2$ o algo menos. Esta es una desventaja de la tecnología de PFN. La razón de espiras del transformador de pulsos (razón de elevación de voltaje) debe ser el doble de grande con una PFN que con la presente invención.

35 La PFN se descarga completamente en un tiempo T (típicamente de unos pocos a unas pocas decenas de microsegundos), manteniendo un voltaje razonablemente constante en el primario del transformador de pulsos y produciendo un pulso de salida razonablemente plano en el secundario del transformador. Pero si se requiere una planaridad del pulso de 0,1% o similar, entonces la PFN debe tener un número muy grande de secciones de inductor-condensador (LC) y será difícil de ajustar. Asimismo, si fallara cualquier componente de la PFN, la PFN requerirá de un nuevo ajuste cuando se instale la nueva pieza, ya que todos los valores y posiciones de las piezas son muy críticos en una PFN.

40 Una vez suministrado el pulso, la PFN debe ser recargada completamente hasta un voltaje V para el siguiente pulso. Para mantener una repetibilidad pulso a pulso de unas cuantas décimas de 1%, está gran "oscilación" del voltaje de carga debe ocurrir con una gran precisión. Asimismo, cargar y descargar completamente todos los condensadores de la PFN para cada pulso, de varios cientos a varios miles de veces por segundo, exige un gran esfuerzo al material dieléctrico de estos condensadores, y esto fuerza a que los capacitores se diseñen con una carga muy baja y por tanto una densidad de energía muy baja. Esto hace que la PFN sea una gran estructura en comparación con el nuevo concepto inventivo, en el que los condensadores no se descargan y recargan en cada pulso, y por tanto pueden tener una densidad de energía
45 mucho mayor.

Como resumen, las desventajas de los moduladores del estado de la técnica anterior son:

- Los voltajes en el lado primario del transformador de pulsos son elevados, típicamente de 10 kV o más.
- La PFN debe ser completamente cargada al intervalo de 10-20 kV en cada pulso, y se descarga completamente durante el pulso, situando una elevada carga en sus condensadores.
- 50 – Los condensadores de la PFN tienen una densidad de energía baja por la razón anterior, de modo que son bastante

grandes en comparación con los condensadores de baja tensión utilizados en el nuevo concepto.

- Si tiene lugar un cortocircuito en la carga (como ocurre frecuentemente con los tubos de magnetron) no hay manera de interrumpir el flujo de corriente, ya que el conmutador de alta tensión de la PFN (un tiratrón de gas) no puede ser apagado hasta que su corriente caiga a cero.
- 5 – Si un componente de la PFN falla, es necesario reajustar la PFN para una forma óptima del pulso una vez que el componente es sustituido. Esto es una tarea laboriosa y peligrosa, ya que debe ser hecha con el alto voltaje aplicado a la PFN.
- Si se necesita una anchura de pulso diferente, es necesario sustituir y reajustar la estructura de la PFN.

b. Transformadores de pulsos

- 10 La historia de los transformadores de pulsos denominados de espiras fraccionarias comienza con una invención de Nicholas Christofilos, que fue otorgada al laboratorio nacional Lawrence Livermore (LLNL) del gobierno norteamericano a comienzos de los años 60. En ese momento, el laboratorio se denominaba laboratorio Lawrence Livermore o LLL. Esta invención divulgaba un modo de utilizar un gran número de núcleos magnéticos toroidales (en forma de rosquilla), cada núcleo alimentado por un generador de pulsos de alto voltaje a varias decenas de kilovoltios (kV) (utilizando un explosor y
- 15 una red de formación de pulsos o PFN) para generar un potencial de aceleración de varios cientos de kilovoltios a varios megavoltios (MV) para acelerar un haz de partículas cargadas. La idea básica de este denominado acelerador lineal de inducción magnética (LMI) se muestra a continuación en las figuras 1 y 2.

La figura 1 ilustra un conjunto de núcleos magnéticos toroidales dispuestos de modo que sus orificios centrales rodeen una línea recta, a lo largo de la cual será acelerado el haz de partículas.

- 20 La figura 2 muestra la estructura del LMI, con más detalles añadidos; se muestra un sistema de alimentación de alto voltaje (HV) (cada núcleo tiene uno) y se indica la trayectoria del haz de partículas.

- La característica principal de este tipo de acelerador es que, al igual que todos los aceleradores LINAC, tiene una superficie externa que está a tierra. Todos los voltajes que alimentan los núcleos individuales parecen sumarse en serie hacia el eje central, pero no aparecen en ningún otro sitio. Esto significa que el acelerador no irradia energía al exterior y es fácil de instalar en un laboratorio, ya que no necesitan aislamiento del entorno. Un acelerador LMI de 800 kV se construyó en el LLL en los años 60 (el acelerador ASTRON), y fue utilizado para acelerar haces de electrones en experimentos de fusión. Una máquina LMI más grande (FXR, de rayos X de destello) se construyó en ese laboratorio en los años 70, y aceleraba un pulso de la electrones hacia un blanco de conversión de rayos X. El FXR se utilizó para la radiografía de fotograma congelado de explosiones.
- 25

- 30 El principio de funcionamiento del acelerador LMI puede ser ilustrado con la ayuda de la figura 3, que muestra una sección transversal de la máquina en un plano que incluye el eje del haz.

- Se necesitan algunas reglas del juego para discutir el comportamiento de la estructura de núcleos múltiples mostrada en la figura 3. En primer lugar, se necesita la regla de la mano derecha. Esta regla (arbitraria) establece que si se agarra un conductor con la mano derecha, con el pulgar apuntando en la dirección de flujo positivo de corriente, entonces los dedos de enroscarán alrededor del conductor en la dirección de las líneas de flujo magnético que rodean al conductor. Aplicando esa regla en la figura 3, el flujo magnético inducido en los núcleos magnéticos toroidales circulará como se muestra. Se utiliza un "punto" para indicar vectores de flujo que apuntan hacia el lector, y se utiliza una X para representar vectores de flujo que apuntan alejándose del lector.
- 35

- Aplicando esta regla al haz de partículas que fluye hacia la derecha a lo largo del eje de la estructura en la figura 3, se encuentra que el flujo magnético generado por este haz circula en la dirección opuesta al flujo inducido por la corriente primaria, lo que es correcto. Si consideramos esto como un transformador, y el haz como un cortocircuito a través del bobinado secundario, entonces la corriente en este secundario fluirá en una dirección que cancele el flujo inducido por el primario, sin provocar flujo neto inducido en los núcleos magnéticos, y presentando así un cortocircuito a la fuente de potencia primaria. Ningún cambio de flujo en los núcleos significa ningún voltaje en el bobinado primario, y esto es un cortocircuito por definición. Un haz de partículas cargadas positivamente (protones) se aceleraría por lo tanto hacia la derecha por la estructura, y un haz de partículas cargadas negativamente (electrones) se aceleraría hacia la izquierda.
- 40
- 45

- A continuación se aplica otra regla de la electrónica, esto es, que el voltaje inducido en un conductor que rodea un flujo magnético es igual a la tasa de variación de ese flujo magnético. Considérese la trayectoria ABCD, que rodea el flujo de los cinco núcleos. El voltaje inducido en un cable que siga esta trayectoria sería igual a la tasa de cambio del flujo en todos los cinco núcleos conjuntamente. Pero cada núcleo está alimentado por un voltaje primario V, de modo que cada núcleo tiene una tasa de cambio de flujo igual a V. Por lo tanto, el voltaje inducido a lo largo de la trayectoria ABCD sería de 5 V. La estructura actúa como un transformador de elevación de voltaje. Otra regla es que en un transformador, la tasa del voltaje secundario al voltaje primario es igual a la tasa de espiras del secundario a espiras del primario, de modo que
- 50

el acelerador LMI de la figura 3 tiene una tasa efectiva de espiras de cinco, aunque la trayectoria ABCD representa tan sólo una única espira. Así pues, el primario debe ser de 1/5 de espira, de aquí el acelerador LMI puede ser considerado como un transformador con un primario de fracción de espira.

c. Estado de la técnica relacionada adicional

- 5 La figura 4 es un boceto de la conexión del transformador de pulsos que se divulga en la patente norteamericana nº 5.905.646, de Crewson et al., de 18 mayo de 1999. Por simplicidad, se muestran dos módulos de generación de pulsos. Cada módulo, como se puede observar, alimenta un primario de una única espira (1) que se enrolla alrededor de uno de los dos núcleos magnéticos. Cada módulo contiene un condensador cargado al voltaje V, y tiene un diodo limitador o diodo inverso D, para proteger el conmutador de un "pico" de voltaje destructivo cuando el conmutador se apaga.
- 10 La patente norteamericana nº 5.905.646, ofrecida anteriormente, enfatiza la idea de que cada módulo alimenta una espira independiente en la estructura primaria. Esto se hace para asegurar que todos los conmutadores del módulo conducirían la misma corriente. Pero esta restricción expone el modulador a un modo de fallo potencialmente destructivo. Para entender el fallo destructivo, se asume que los dos conmutadores de la figura 4 no conducen precisamente en el mismo momento. Si el conmutador superior comienza a conducir una fracción de microsegundo antes que el conmutador inferior
- 15 (o viceversa), aparecen los problemas. Si esto ocurre, el núcleo magnético superior transporta flujo en la dirección mostrada (fluyendo hacia la página en X y saliendo hacia fuera de la página en el símbolo de punto). Este flujo induce una corriente que fluye en el secundario y la carga, como se muestra. Todavía no hay presente ningún flujo en el núcleo inferior, ya que su conmutador de módulo no es conductor todavía. Sin embargo, la corriente que fluye en la bobina secundaria inducirá un flujo en el núcleo inferior opuesto a la dirección indicada. Este flujo inducirá una corriente en la
- 20 conexión del módulo inferior como se muestra, y esta corriente provocará que el diodo D en el módulo inferior conduzca.

A continuación, cuando el conmutador en el módulo inferior conduce, el voltaje aplicado repolariza el diodo inferior (que está en conducción) y esto fuerza al diodo a apagarse. El apagado de un diodo en conducción en unos pocos segundos cuando está conduciendo una corriente elevada destruirá habitualmente el diodo. Cuando el diodo se destruye, se produce un cortocircuito. Este cortocircuito canaliza una corriente casi ilimitada a través del conmutador del módulo inferior y destruye el conmutador.

25

Sumario de la invención

Es un objeto de la presente invención eliminar el inconveniente anteriormente mencionado del modulador del estado de la técnica, como el de la patente US 5.905.646. Otro objeto de la presente invención es proporcionar un modulador de potencia con una conexión del bobinado primario que elimina la necesidad de tener un número igual de módulos de generación de pulsos y de bobinados primarios. Todavía es otro objeto de la presente invención proporcionar un modulador de potencia que elimine los inconvenientes anteriormente mencionados de los moduladores de potencia del estado de la técnica anterior ya que:

30

- los voltajes en el lado primario del transformador de pulsos son bajos, típicamente de 1 kV o menos;
 - no existe PFN, por lo que se evitan las desventajas de la PFN ya que los conmutadores de modulador son semiconductores como IGBTs o MosFets, que pueden ser apagados con una corriente de fluyendo en ellos para terminar el pulso;
 - los condensadores de almacenamiento de energía no descargan más de un pequeño porcentaje durante un pulso, de modo que su densidad de energía puede ser mucho más grande que la de condensadores de PFN;
 - si tiene lugar un cortocircuito en la carga, éste puede ser detectado observando la caída súbita del voltaje de carga, que genera una señal que dispara un comparador rápido, que retira los pulsos de puerta de bajo voltaje de los conmutadores de semiconductor, terminando el pulso (los moduladores del estado de la técnica anterior utilizan detectores de sobrecorriente para este propósito, que son mucho menos rápidos en su funcionamiento y permiten que fluya una corriente mucho más grande antes de apagarse); y
 - si se necesita una anchura de pulso diferente, esto puede ser proporcionado simplemente cambiando la temporización de los disparadores de conmutador de estado sólido, una operación que tiene lugar a bajo voltaje y que puede ser realizada desde la estación de control computerizado, permitiendo un ajuste electrónico simple de la anchura del pulso.
- 35
- 40
- 45

Estas ventajas conducen a las ventajas consecuentes de un tamaño mucho menor y una vida útil mucho más larga del sistema de modulador de estado sólido, en comparación con la vieja tecnología de PFN/Tiratrón.

50 Todavía es otro objeto de la presente invención proporcionar un modulador de potencia en el que los distintos módulos de generación de pulsos puedan ser encendidos o apagados en momentos diferentes. Para poder encender o apagar los módulos de generación de pulsos en diferentes momentos es útil retirar la sobretensión o la llamada al comienzo del

pulso.

La invención se define por la reivindicación 1. Por claridad de la descripción, la discusión se limitará al caso de dos módulos de generación de pulsos. Esto no es en modo alguno una restricción de la invención, que por el contrario puede funcionar con cualquier número de módulos de generación de pulsos.

- 5 La adición de dos espiras individuales más, como se muestra en la figura 5, eliminará completamente el modo de fallo de sobrevoltaje anteriormente mencionado, y eliminará simultáneamente la restricción de tener igual número de módulos de generación de pulsos y de bobinados primarios. En los moduladores del estado de la técnica anterior, construidos bajo la patente norteamericana nº 5.905.646, se está restringido a tener un módulo de generación de pulsos por bobinado primario y al menos un bobinado primario por sección de núcleo. Con la presente invención, esta restricción es eliminada
 10 y se puede utilizar cualquier número de módulos. El estado de la técnica anterior requiere que cada sección de núcleo sea alimentada por el mismo número de módulos. Sin embargo, con la presente invención se puede utilizar cualquier número de módulos y se proporciona aun así la misma señal de alimentación a cada núcleo. Esta es una importante ventaja económica a favor de la presente invención.

- 15 Cuando los cables (11) en la figura 5 son añadidos, entonces cualquiera de los conmutadores de módulo que sea el primero en conducir controlará el circuito hasta que el otro conmutador se cierre. Si el conmutador superior conduce antes que el inferior, entonces el módulo superior alimentará el flujo en ambos núcleos, no sólo en el núcleo superior. Esto impedirá que el diodo inferior sea puesto en conducción, ya que este diodo estará retropolarizado. El efecto es casi el mismo que si todos los primarios estuvieran conectados en paralelo, ya que el conmutador "temprano" impondrá un voltaje positivo en todos los diodos en los módulos "tardíos".

- 20 Se podrían simplificar las cosas de hecho, y conectar todos los primarios en paralelo. Esto no es obvio, pero un vistazo a la figura 4 ayudará a apreciar que esto funciona. Si todos los conmutadores se cierran de hecho en el mismo momento, entonces no existirá voltaje entre los puntos P y R en la figura. Si los puntos Q y T están conectados entre sí, tampoco existe voltaje entre estos puntos. Si no hay voltaje entre P y R, entonces es posible igualmente conectar estos puntos entre sí sin provocar el flujo de cualquier corriente adicional, de modo que el circuito trabajará igual con todos los primarios
 25 conectados entre sí.

- Ambas de las conexiones anteriores servirán de hecho para igualar las corrientes de módulo, mientras que la conexión independiente reivindicada en la patente norteamericana número 5.905.646 no consigue este resultado. Esto es debido a que, por primera vez, se garantiza que la impedancia de carga presentada a todos los módulos de generación de pulsos es exactamente la misma. En el estado de la técnica anterior, esto no está garantizado. De las dos conexiones primarias
 30 que se ofrecen anteriormente, la mostrada en la figura 5 es preferible por encima de la idea de conectar simplemente todos los primarios en paralelo, ya que con todos los primarios en paralelo, cualquier fallo de un diodo de cualquier módulo canalizará toda la corriente de todos los módulos a fallo, y esto podría ser bastante destructivo para los conmutadores. La conexión de la figura 5 elimina esta posibilidad.

Breve descripción de los dibujos

- 35 La figura 1 muestra un conjunto de núcleo magnético para un acelerador LMI,
 la figura 2 muestra un acelerador LMI con una PFN y una trayectoria de haz,
 la figura 3 muestra una estructura para un acelerador LMI de cinco núcleos,
 la figura 4 muestra una vista esquemática de una conexión de primario de media espira con dos módulos de generación de pulsos de acuerdo al estado de la técnica anterior,
 40 la figura 5 muestra una vista esquemática de una conexión de primario de media espira con dos módulos de generación de pulsos de acuerdo con la presente invención,
 la figura 6 es una vista detallada de uno de los módulos de generación de pulsos en un modo de realización,
 la figura 7 muestra algunas vistas de transformadores de pulsos de alto voltaje típicos,
 la figura 8 es una vista en tres dimensiones de un transformador de pulsos que contiene dos núcleos lado a lado.

45 Descripción detallada de los modos de realización preferidos

A continuación se ofrece una descripción detallada de cómo diseñar el modulador de potencia de la presente invención por medio de un ejemplo, junto con algunos modos de realización preferidos de la invención. Los modos de realización preferidos y el ejemplo de diseño son tan sólo ilustrativos y no deben ser considerados en modo alguno como limitaciones de la invención.

La presente invención es un modulador de potencia. El modulador de potencia comprende: módulos de generación de pulsos, en el que cada módulo de generación de pulsos tiene una conexión de bobinados primarios que rodean un conjunto de núcleos magnéticos, y un bobinado secundario que rodea todos los núcleos magnéticos. Los módulos de generación de pulsos comprenden además un condensador de almacenamiento de energía, medios de comunicación y un diodo o conjunto de diodos conectados en serie. El diodo, o el conjunto de diodos conectados en serie, está conectado entre los medios de conmutación y el conductor que devuelve la corriente al condensador. Los medios de conmutación pueden ser cualquier conmutador conocido para el experto en la técnica de la electrónica, tal como, por ejemplo, un conmutador de estado sólido IGBT. El módulo/módulos de generación de pulsos en el modulador está/están dotado(s), como se mencionó anteriormente, de una conexión de los bobinados primarios, y que se muestra en la fig. 5, para el caso especial de un modulador de potencia con dos módulos de generación de pulsos y dos núcleos magnéticos. Este es un modulador de potencia con aquellas características a las que se hace referencia en el modo de realización que sigue.

Como se enfatizó anteriormente, la conexión mostrada en la fig. 5 elimina completamente el modo de fallos destructivo que ocurre frecuentemente en moduladores del estado de la técnica anterior. La fig. 5 ilustra esta conexión con dos módulos de generación de pulsos y dos núcleos. Esto es tan sólo una ilustración, el número de módulos puede ser cualquier número así como el número de núcleos. Todo lo que se necesita para obtener un modulador de potencia con más de dos módulos de generación de pulsos es conectar todos los módulos a través de bobinados primarios alrededor de cada núcleo magnético, de modo que cada núcleo esté rodeado por un bobinado primario para cada módulo. Así pues, es un asunto sencillo añadir cualquier número de módulos a cualquier número de núcleos. Como ejemplo, se puede considerar un modulador de potencia que tiene N módulos de generación de pulsos y M núcleos magnéticos. Si hubiera que construir un modulador de potencia utilizando tan sólo primarios de una única espira y la conexión de la presente invención, el número total de primarios de una única espira sería $2M \times N$, incluyendo $2M$ primarios de una única espira para cada módulo de generación de pulsos deben rodear M núcleos (una espira de primario por "pata" del núcleo, dos "patas" por núcleo, como se muestra en la fig. 7), y N módulos de generación de pulsos. Es importante notar que, en un modo de realización preferido, los módulos de generación de pulsos no están conectados entre sí mediante una conexión externa tal como un cable. La única conexión que existe entre los módulos es la inducida por el flujo magnético en los núcleos. Es posible por supuesto interconectar los módulos conectando todos los primarios en paralelo, incluso si esto desata la posibilidad de fallo mencionada previamente que, con todos los primarios en paralelo, cualquier fallo de diodo en cualquier módulo canalizará toda la corriente de todos los módulos a fallo, y esto podría ser muy destructivo para los conmutadores.

Debe notarse que los bobinados primarios discutidos anteriormente pueden ser bien bobinados de una única espira o de múltiples espiras. En este último caso, existe la condición de que los voltios por espira en todos los bobinados primarios sean los mismos, esto es, si hay una diferencia de voltaje V en condensadores que pertenecen a diferentes módulos de generación de pulsos, entonces esta diferencia debe estar reflejada en el número N de espiras que pertenecen a los bobinados primarios, de tal modo que V/N sea igual para todos los bobinados primarios. Si esta condición no se cumple, los primarios competirán entre sí y extraerán corrientes excesivas de los módulos de generación de pulsos. Si todos los voltajes en los condensadores son los mismos, entonces el número de espiras en cada espira múltiple debe ser el mismo para satisfacer esta condición de voltios por espira.

Un modulador de potencia en general tiene una amplia variedad de aplicaciones, que abarcan desde sistemas de radar, láseres, tratamiento del cáncer, calentamiento por microondas, en los procesos de esterilización de materiales, alimentación de aceleradores de partículas (LINAC), calentamiento por plasma para fusión nuclear, limpieza de semiconductores, tratamiento de superficies, bombeo por haz de electrones de láseres de gas, curado de tinta en la industria de impresión, alimentación de transductores piezoeléctricos o magnetostrictivos para sónar, obtención de imágenes de ultrasonidos en medicina, alimentación de estructuras de antena para radares de banda ancha de monopulsos, alimentación de corrientes elevadas y voltajes elevados en vehículos aeroespaciales, alumbrado o simulación de los efectos de armas nucleares, y para alimentar directamente fuentes de haces de electrones para la modificación de materiales, alimentación de clistrones, magnetrones, girotrones o tubos de amplificación de campo cruzado para generar microondas para radar, etc. Y un modulador de potencia tal como el de la presente invención puede ser utilizado, por supuesto, en cualquier otro sitio en el que se necesiten pulsos eléctricos.

Un ejemplo de diseño de modulador

Lo que sigue es un ejemplo de cómo diseñar un modulador de potencia, de acuerdo con los principios de la invención. Este ejemplo es tan sólo ilustrativo y todos los números y dispositivos especificados se incluyen tan sólo por razones pedagógicas y no deben ser vistos como restricciones a la presente invención.

a. Selección del número de módulos de generación de pulsos

Una aproximación productiva para entender el nuevo concepto de modulador es trabajar a través de un ejercicio de diseño de primer orden para tal modulador. Supongamos que se requiere obtener pulsos de 120 kV, con 70 amperios de corriente pico a una anchura de pulso de 5 microsegundos (μs) y una frecuencia de repetición de pulsos (PRF) de 800

pulsos por segundo (800 Hz). Supongamos además que se pueden obtener conmutadores de estado sólido IGBT con tasas de 1600 voltios, 2200 amperios.

5 La primera etapa es calcular la salida de potencia pico, ya que esto tiene una fuerte influencia en el número de conmutadores que se necesitarán. La potencia pico es 120 kV por 70 A, u 8,4 megavatios (MW). Se permite un margen de seguridad para los conmutadores, de modo que no funcionen a su máxima capacidad. La experiencia ha mostrado que un 75% de capacidad pico permiten un margen seguro para una vida larga. Entonces, los números de funcionamiento para cada conmutador no deben exceder los $0,75 \times 1600 = 1200$ voltios, y $2200 \times 0,75 = 1650$ A. Como resultado, cada conmutador puede desarrollar $1200 \times 1650 = 1,98$ MW. Para suministrar 8,4 MW necesitaremos $8,4/1,98 = 4,24$ conmutadores, de modo que se utilizarán cinco computadores para permanecer en el lado seguro del diseño.

10 En los moduladores del estado de la técnica anterior, construidos bajo la patente norteamericana nº 5.905.646, hay que restringirse a tener un módulo de generación de pulsos por bobinado primario, y al menos un bobinado primario por sección de núcleo. Con la presente invención, como se expuso anteriormente en la descripción, esta restricción desaparece, y se puede utilizar cualquier número de módulos. Por ejemplo, si se utiliza un transformador de pulsos con dos núcleos para obtener un bobinado primario de 1/2 espira, entonces hay cuatro "patas" o secciones de núcleos magnéticos en tal transformador. El estado de la técnica anterior requiere que cada una de dichas "patas" o sección de núcleo sea alimentada por el mismo número de módulos. No se pueden utilizar cuatro módulos, ya que esto viola el margen de seguridad seleccionado en este ejemplo. De modo que con el estado de la técnica anterior, uno se vería forzado a utilizar ocho (8) módulos, alimentando cada "pata" del núcleo con dos módulos. Sin embargo, con la presente invención, se pueden utilizar cinco (5) módulos y aun así se proporcionará la misma señal de alimentación a cada una de las cuatro "patas" del núcleo de transformador.

b. Tamaño del condensador y planaridad del pulso

En este ejemplo se ha decidido que el número de módulos de generación de pulsos sea cinco, al menos para nuestro diseño de primer orden. Iteraciones sucesivas del diseño que implican transferencia de calor y enfriamiento de los conmutadores, condensadores, y otros componentes pueden provocar que este número cambie ligeramente, pero ese nivel de detalle en el diseño está más allá del ámbito de la presente discusión. A continuación volveremos brevemente a los condensadores utilizados en cada módulo. Si un condensador de valor C faradios es cargado a cierto voltaje V y a continuación es conectado a una carga que extrae una corriente de I amperios durante un tiempo de T segundos, el voltaje del condensador "caerá" o "descenderá" de acuerdo a la relación:

$$\Delta V = \Delta Q/C = IT/C$$

30 en donde Q es el símbolo para la carga (en culombios) y el símbolo delta (Δ) significa "el cambio de". La ecuación se lee por tanto como "el cambio del voltaje V es igual al cambio de la carga dividido por la capacitancia C". Esto se sigue inmediatamente de la definición de capacitancia, que es la cantidad de carga en el condensador por el voltaje aplicado:

$$C = Q/V$$

35 A continuación supongamos, a modo de ejemplo, que tenemos el requerimiento de un pulso que tenga una parte superior plana con una desviación no superior al 0,5% del valor promedio del voltaje del pulso. En el ejemplo presente, el voltaje inicial es 1200 V, de modo que el voltaje al final del pulso no debe ser inferior a un 0,5% por debajo de esto, o $0,995 \times 1200 = 1194$ voltios. El valor de V es por tanto de 6 V. Se ha determinado que la corriente por módulo sea de 1650 amperios (1650 A), y la duración del pulso de 5 μ s, de modo que la capacitancia se determina que es:

$$C = Q/V = \Delta Q/\Delta V = IT/\Delta V = 1650 \cdot 5 \cdot 10^{-6}/6 = 1375 \cdot 10^{-6} = 1375 \mu F$$

40 Esto es una capacitancia muy grande. Para reducir la necesidad de tal capacitancia tan grande, se puede utilizar opcionalmente un circuito de aplanamiento del pulso, que puede reducir la capacitancia en aproximadamente un factor 10. Si se utiliza tal circuito, la capacitancia puede ser reducida hasta, aproximadamente, 137,5 μ F en lugar de 1375 μ F.

c. Circuito del módulo

45 Se ha decidido el número de conmutadores (5) y el tamaño de los condensadores del módulo (1200 voltios, 138 μ F). Por razones de enfriamiento, podemos dividir los condensadores en dos o tres contenedores separados, para aumentar la razón de área superficial a volumen, ya que esto mejora la capacidad de retirar calor residual. Así pues, el valor del condensador final puede ser $138/2 = 69 \mu F$ o $138/3 = 46 \mu F$. Estos componentes se ensamblan a continuación en módulos de generación de pulsos en la forma mostrada en la figura 6.

50 En la figura 6, las conexiones a tierra se muestran unidas al extremo negativo del condensador. Esta es una elección flexible, la conexión a tierra podría estar situada igualmente en el extremo de emisor del conmutador. Hacerlo así permitiría que el circuito de generación del pulso de disparo estuviera a tierra, eliminando el pequeño transformador de pulsos T1 que aísla a la conexión de puerta de tierra en el circuito como se muestra.

El diodo inverso se muestra igualmente conectado a lo largo de la salida del módulo. Este diodo está polarizado en inversa cuando el conmutador está en conducción, pero cuando el conmutador está desconectado (no conductor), la corriente de salida continúa fluyendo debido a la inductancia de transformador de pulsos. El diodo inverso se vuelve conductor y desvía a tierra el voltaje de salida casi a cero en este momento, protegiendo el conmutador de un estado de sobretensión destructivo que lo destruiría si el diodo inverso no estuviera presente. En el modulador del estado de la técnica anterior, una diferencia de temporizado entre dos módulos de generación de pulsos contiguos provocará que este diodo inverso se encienda prematuramente. Entonces, cuando el conmutador que se conecta a este diodo se enciende, el diodo conductor se apaga repentinamente. Este transitorio destruye habitualmente el diodo, haciendo un cortocircuito. Esto a su vez destruye el conmutador al permitir que fluya demasiada corriente en el conmutador.

- 10 El circuito opcional de aplanamiento de pulsos se muestra conectado en serie con el extremo de bajo voltaje del (de los) bobinado(s) secundario(s) del transformador de pulsos en la fig. 6. El circuito de amortiguación se muestra conectado en serie con la salida del módulo en la fig. 6. Como se describió anteriormente, el modulador del estado de la técnica anterior requiere uno de tales circuitos de amortiguación para cada módulo, pero el nuevo concepto de conexión permite que los módulos se enciendan en diferentes momentos, y esta característica permite utilizar tan sólo un circuito de amortiguación.
- 15 El módulo conectado a este único circuito de amortiguación se encienden primer lugar, y cuando el pulso de salida ha alcanzado su pico y el voltaje se ha estabilizado, los otros módulos se encienden entonces para transportar la carga pulsada. Todos los módulos se apagarían en este caso a la misma vez. Esto ahorra costes y complejidad.

d. Consideraciones del transformador de pulsos

20 La figura 7 muestra un transformador de pulsos de alto voltaje típico utilizado en moduladores pulsados. El núcleo magnético está etiquetado como (15), y las conexiones de salida de alto voltaje (anillos graduados) están etiquetados como (16). Las dimensiones son proporcionales al voltaje y potencia de la salida del modulador. Típicamente, tales transformadores están inmersos en un tanque lleno de aceite aislante de base mineral o de base silicona para mejorar tanto el enfriamiento como el aislamiento de alto voltaje.

25 El núcleo magnético mostrado en la figura 7 es un conjunto de un único núcleo. En un transformador de doble núcleo, se sitúan dos núcleos idénticos lado a lado, y ambos están rodeados por los bobinados secundarios, mientras que cada núcleo transporta un conjunto individual de bobinados primarios. Esto proporciona un comportamiento de primario de media espira, como se describió anteriormente. Tres o más núcleos pueden situarse de modo similar, proporcionando un rendimiento de primario de 1/3 o 1/4 de espira, respectivamente. Los moduladores del SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), por ejemplo, utilizan muchos más de cuatro núcleos, y muy pocas espiras en el secundario (de una a tres). ¿Qué es lo que guía la elección del número de núcleos y del número de espiras del secundario? Los tiempos de subida y bajada del pulso guían estas elecciones, como se describirá a continuación. Volveremos al ejemplo de diseño para ayudar a esta descripción.

35 El hueco entre los dos núcleos es claramente visible en la figura 8. Comparando las figuras 7 y 8, se puede ver que existe un volumen de espacio entre los bobinados secundarios (que rodean todos los núcleos), y los bobinados primarios. Cuando el transformador está en funcionamiento, la ley de Ampere nos dice que no hay casi campo magnético en ningún sitio del transformador (incluyendo el propio material del núcleo) excepto en este volumen entre los bobinados. Este campo magnético almacena energía magnética, y esto es igual a una inductancia que aparece en serie con la carga. La inductancia está en serie y no en paralelo ya que ninguna corriente puede alcanzar la carga a menos que fluya en primer lugar a través de los bobinados y establezca este campo magnético residual. Este campo representa una "tasa" en el rendimiento de transformador que debe ser pagada con el fin de obtener cualquier potencia de salida. La inductancia creada por este volumen de campo magnético se denomina inductancia de fugas del transformador.

40 Es bien conocido que la inductancia de una bobina es proporcional al cuadrado del número de espiras de la bobina. Cuando se mide desde el secundario o lado de salida del transformador, esta inductancia de fugas es proporcional al cuadrado del número de espiras del secundario. Consecuentemente, cualquier cosa que pueda reducir el número de espiras del secundario tendrá un marcado efecto en la inductancia de fugas. Cuanto menor se pueda hacer esta inductancia, más rápidamente subirá el pulso de salida hasta su nivel de potencia máxima. Utilizando un primario de espiras fraccionarias mediante la instalación de dos núcleos lado a lado, cada uno con su propio conjunto de espiras primarias, se reducirá a la mitad el número de espiras del secundario para un voltaje de entrada y salida dado. Esto (casi) reducirá la inductancia de fugas en un factor de cuatro, y permitirá que el pulso suba casi cuatro veces más rápido que si se utilizara un único núcleo.

50 Este argumento no es exacto, ya que la inductancia de fugas es proporcional al volumen contenido entre los conjuntos primario y secundario, así como al cuadrado de las espiras del secundario, y este volumen aumentará a medida que se añadan más núcleos al transformador. La reducción en la inductancia de fugas cuando se pasa de uno a dos núcleos está más cerca de 1/3 que de 1/4 por esta razón. Pero el efecto todavía es muy útil para obtener un tiempo de subida y de bajada más rápido del transformador de pulsos.

Examinando de nuevo las figuras 2 y 3, se puede observar que con dos núcleos hay cuatro "patas" verticales de material

magnético que deben ser rodeadas con espiras primarias. Esto se mencionó anteriormente en esta discusión, y la razón para esto es claramente evidente en las dos figuras. Con un único núcleo, hay dos de tales "patas" verticales, etc. En general, con N núcleos, hay 2N "patas" que necesitan de espiras del primario alrededor de las mismas. Básicamente, el transformador de múltiples núcleos es equivalente a varios transformadores conectados en paralelo.

- 5 Para completar el ejemplo de diseño, se necesita dimensionar el transformador. Supongamos que el material magnético tiene una densidad de flujo de saturación de B_{max} teslas. Los valores típicos para esta densidad de flujo están en la vecindad de un tesla, o 10.000 gauss utilizando el antiguo sistema de unidades magnéticas. Se arrollar un conjunto de espiras alrededor de los núcleos para transportar una corriente DC para ajustar los núcleos. Estas espiras están conectadas a un suministro de potencia DC a través de una reductora de ajuste en serie, ya que las espiras de ajuste
10 desarrollarán un voltaje pulsado cuando el transformador sea alimentado por los módulos de generación de pulsos, y se necesita una impedancia en serie elevada para proteger el suministro DC de este pulso y para asegurar que la corriente de ajuste no se ve afectada por el pulso. La reductora de ajuste mantiene la corriente de ajuste fluyendo de modo constante independientemente de la acción pulsante en el transformador.

15 La corriente DC de ajuste induce una densidad de flujo DC en los núcleos igual a -B_{max}, el signo menos indica que este flujo está dirigido en dirección opuesta al flujo que será inducido cuando el transformador sea pulsado. Esto permite que los núcleos se fabriquen con la mitad del material magnético que sería necesario si no se utilizará un ajuste, ya que la densidad de flujo puede oscilar ahora de -B_{max} a +B_{max} durante el pulso, para una excursión total de flujo de 2B_{max}. Cada núcleo magnético tiene un área en sección transversal (véase la figura 2) de A_c metros cuadrados. Así pues, la ley de Lenz establece que con el voltaje de módulo V dado y la duración del pulso T, si se utiliza un primario de una única
20 espira el área en sección transversal de cada núcleo se calcula mediante:

$$A_c = V \cdot T / 2B_{max}$$

Insertando los números V = 1200 V, T = 5 uS, B_{max} = 1 tesla, encontramos que A_c = 0,003 m² o 30 cm². Así pues, el área en sección transversal de cada uno de los dos núcleos es de, aproximadamente, 5,5 cm de ancho y 5,5 cm de profundidad, típica de los transformadores que hemos construido. Habitualmente se han diseñado para anchuras de pulso
25 más largas de 10 a 12 uS, de modo que los núcleos han sido más grandes que esto, de nuevo por la ecuación anterior.

A continuación se desea una salida de 120 kV con una entrada de 1,2 kV de modo que la ganancia en voltaje sea de 100:1. Esto requiere 50 espiras en cada una de las dos "cestas" secundarias conectadas en paralelo, mostradas en las figuras 2 y 3. Esto refleja el hecho de que el primario es efectivamente de 1/2 de espira. La ganancia en voltaje es igual a la razón de espiras, que en este caso es de 50/0,5 = 100.

- 30 Como se mencionó anteriormente, se tienen cuatro "patas" verticales de núcleo para ser rodeadas con espiras primarias, ya que en realidad estamos fabricando dos transformadores conectados en paralelo. Cada una de esas "patas" necesita cinco espiras alrededor de la misma, ya que vamos a utilizar cinco módulos. Cada módulo se conecta a continuación a un conjunto de cuatro primarios de una única espira, una espiral de cada conjunto para cada una de las cuatro "patas". Así pues, el número total de espiras del primario que se necesita es cinco módulos por cuatro patas-espira por módulo, o 20
35 primarios. Esto da cinco espiras por "pata", lo que está de acuerdo.

Debe mencionarse que para mantener la inductancia residual baja, se necesita rodear cada "pata" del núcleo con una buena aproximación de una "lámina de corriente" para mantener los campos magnéticos entre los cables individuales en un mínimo. Cinco cables de pequeño diámetro, separados a lo largo de una pata del núcleo que puede ser de 15 cm de longitud para 120 kV no es una buena aproximación de una lámina uniforme de corriente, de modo que se deben hacer
40 las cinco espiras individuales arrollando, por ejemplo, 10 o incluso 20 cables individuales alrededor de la pata del núcleo, y a continuación separando estas espiras individuales en cinco manojos de dos o tres o cuatro espiras individuales cada uno, conectando cada manajo en paralelo para fabricar el equivalente a una única espira ancha.

En el ejemplo de diseño, se desea una PRF de 800 Hz, y cada pulso suministra una energía de salida de V_{sec} x I_{sec} x T_{pulso} = 120 kV x 70 A x 5 uS = 42 julios por pulso. A 800 Hz de tasa de repetición, esto representa una potencia promedio de 800 x 42 = 33.600 W o 33,6 kW. El factor de duración es la razón de la duración del pulso al tiempo entre pulsos, en este caso 800 x 5 μs = 0,004 o 0,4%. El valor RMS (media cuadrática) de la corriente es el pico de corriente por la raíz cuadrada del factor de duración, que en este caso es 70 A por 0,063, o 4,4 A por la totalidad de la corriente del secundario. El secundario está fabricado por dos bobinados conectados en paralelo, por referencia a las figuras 7 y 8, de modo que cada uno de estos bobinados transporta una corriente de RMS de 2,2 A. La sección transversal del cable está
50 dimensionada por consiguiente a partir de tablas estándar de cables para transportar esta corriente.

De modo similar, para cada primario la corriente pico es de 1650 A, de modo que la corriente de RMS es de 104 A. De nuevo, los conductores primarios están dimensionados a partir de tablas estándar para transportar esta corriente, teniendo en consideración los medios de transferencia de calor/enfriamiento que están disponibles para enfriar los conductores a un nivel seguro.

5 Esto completa la conexión del modulador, excepto para el dimensionado del bobinado de ajuste y la corriente de ajuste. Esto involucra la permeabilidad del material magnético, que es la razón de la densidad de flujo magnético B en teslas respecto a la fuerza magnetomotriz H en amperios-vuelta por metro, y es una propiedad que está tabulada en los catálogos de material magnético. Cuando este número se determina, la selección de las espiras de ajuste y de la corriente de ajuste implica una simple aplicación de la ley de Ampere y no necesita de mayor elaboración aquí. Esto es tecnología bien conocida.

Los modos de realización y el ejemplo de diseño ofrecidos anteriormente son meramente ilustraciones. Hay otros modos de realización que se le ocurrirían fácilmente al experto en la técnica que están dentro del ámbito de la invención. La invención debe ser definida por lo tanto en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un modulador de potencia que comprende:
al menos dos módulos de generación de pulsos; e incluye
5 al menos un bobinado secundario que rodea todos los núcleos magnéticos de una pluralidad de núcleos magnéticos,
en el que cada uno de dichos al menos dos módulos de generación de pulsos incluye:
un condensador de almacenamiento de energía; y
medios de conmutación controlables electrónicamente en el apagado y encendido; y
10 al menos un diodo conectado en paralelo con los conductores de salida de dicho módulo de generación de pulsos; caracterizado porque
cada módulo de generación de pulsos incluye además un conjunto de bobinados primarios, cada uno de dichos bobinados primarios en cada uno de dichos conjuntos de bobinados primarios rodea un núcleo magnético respectivo de dicha pluralidad de núcleos magnéticos, y cada uno de dichos bobinados primarios en cada uno de dichos conjuntos de bobinados primarios está conectado en paralelo con al menos uno de dichos módulos de generación de pulsos para proporcionar así un modulador de potencia, en el que cada uno de dichos al menos dos módulos de generación de pulsos alimenta todos los núcleos magnéticos de dicha pluralidad de núcleos magnéticos.
15
2. Un modulador de potencia de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho al menos un diodo es un diodo o un conjunto de diodos conectados en serie que están conectados entre dichos medios de conmutación y el conductor que devuelve la corriente a dicho condensador.
20
3. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que dicho al menos un diodo es parte de un conjunto de diodos conectados en serie.
4. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que dicho conjunto de bobinados primarios es un conjunto de bobinados primarios de una única espira.
- 25 5. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que dicho conjunto de bobinados primarios es un conjunto de bobinados primarios de múltiples espiras.
6. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que el número de módulos de generación de pulsos es igual al número de núcleos magnéticos.
7. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que el número de módulos de generación de pulsos es distinto al número de núcleos.
30
8. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que cada módulo de generación de pulsos puede ser encendido o apagado, a mano o por medios automáticos, en diferentes momentos.
9. Un modulador de potencia de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en el que dichos medios de comunicación son un conmutador IGBT de estado sólido.

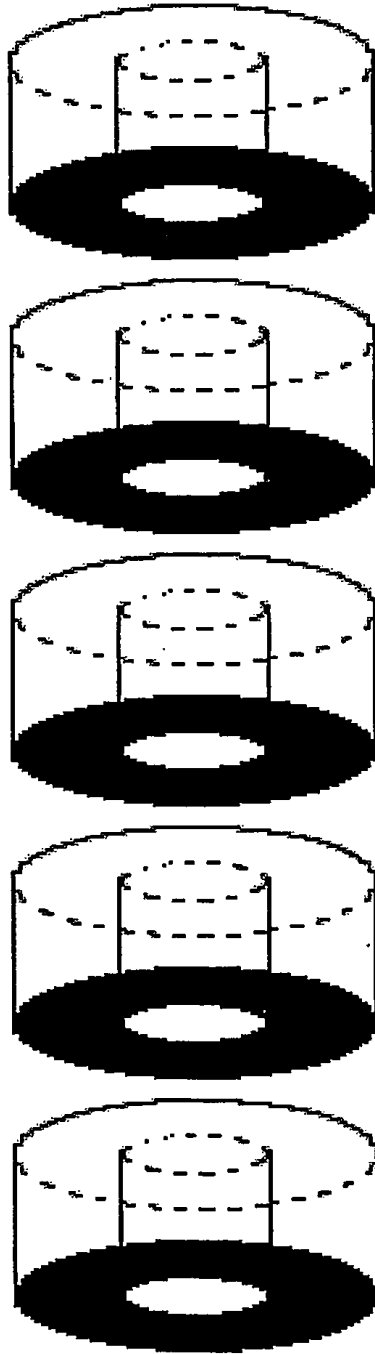


Figura 1

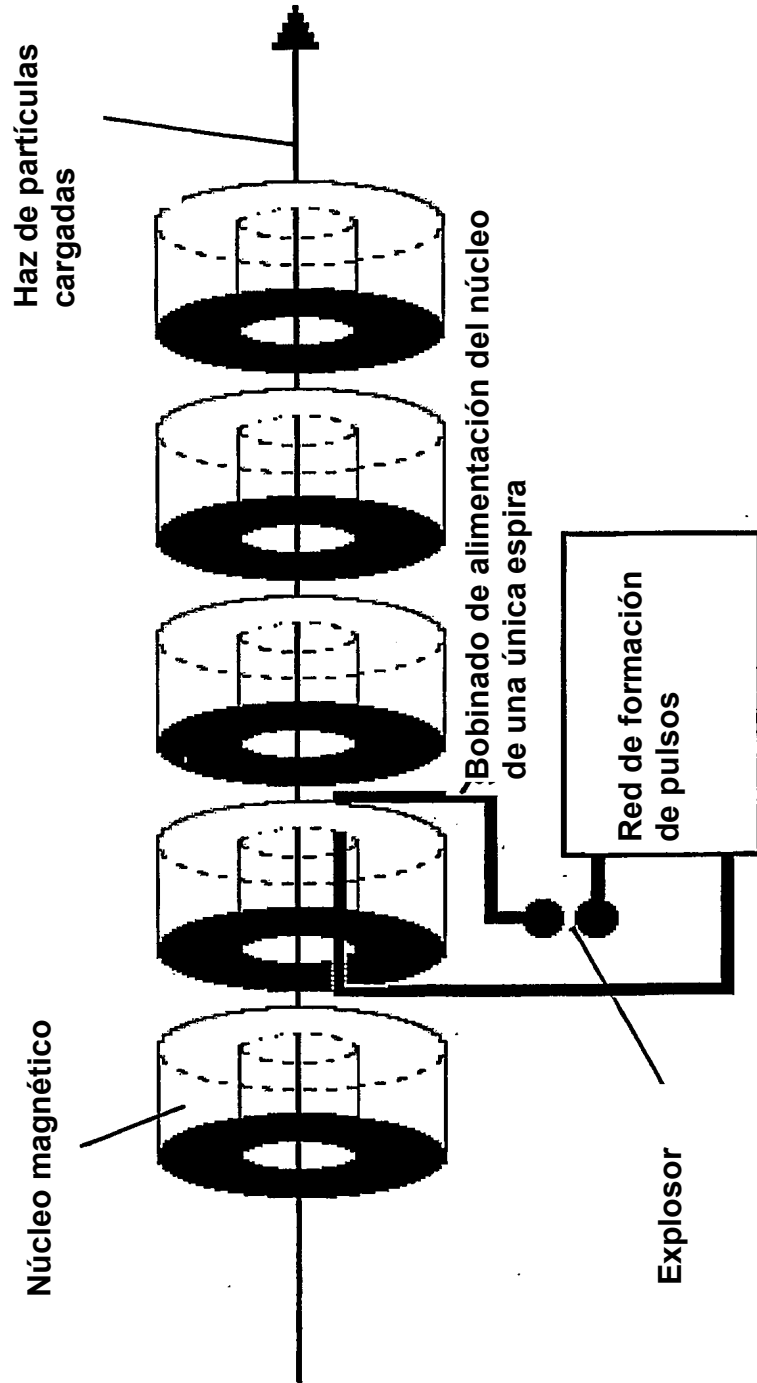


Figura 2

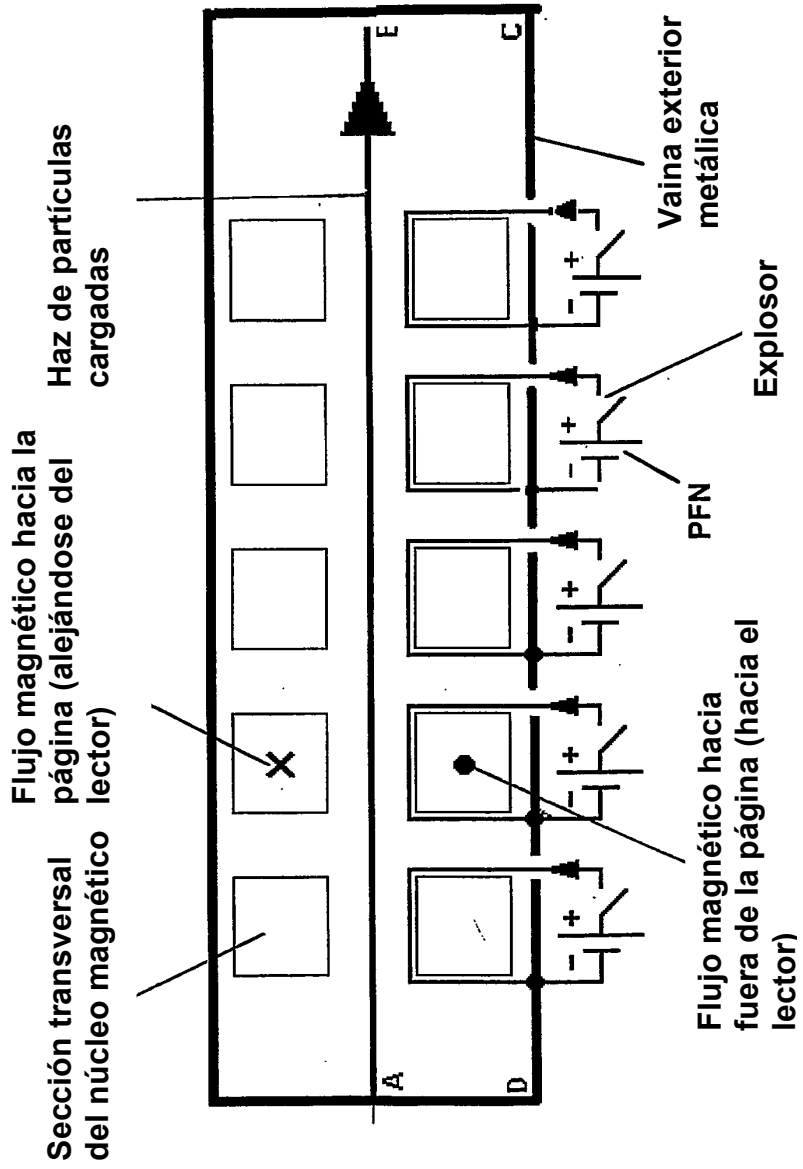


Figura 3

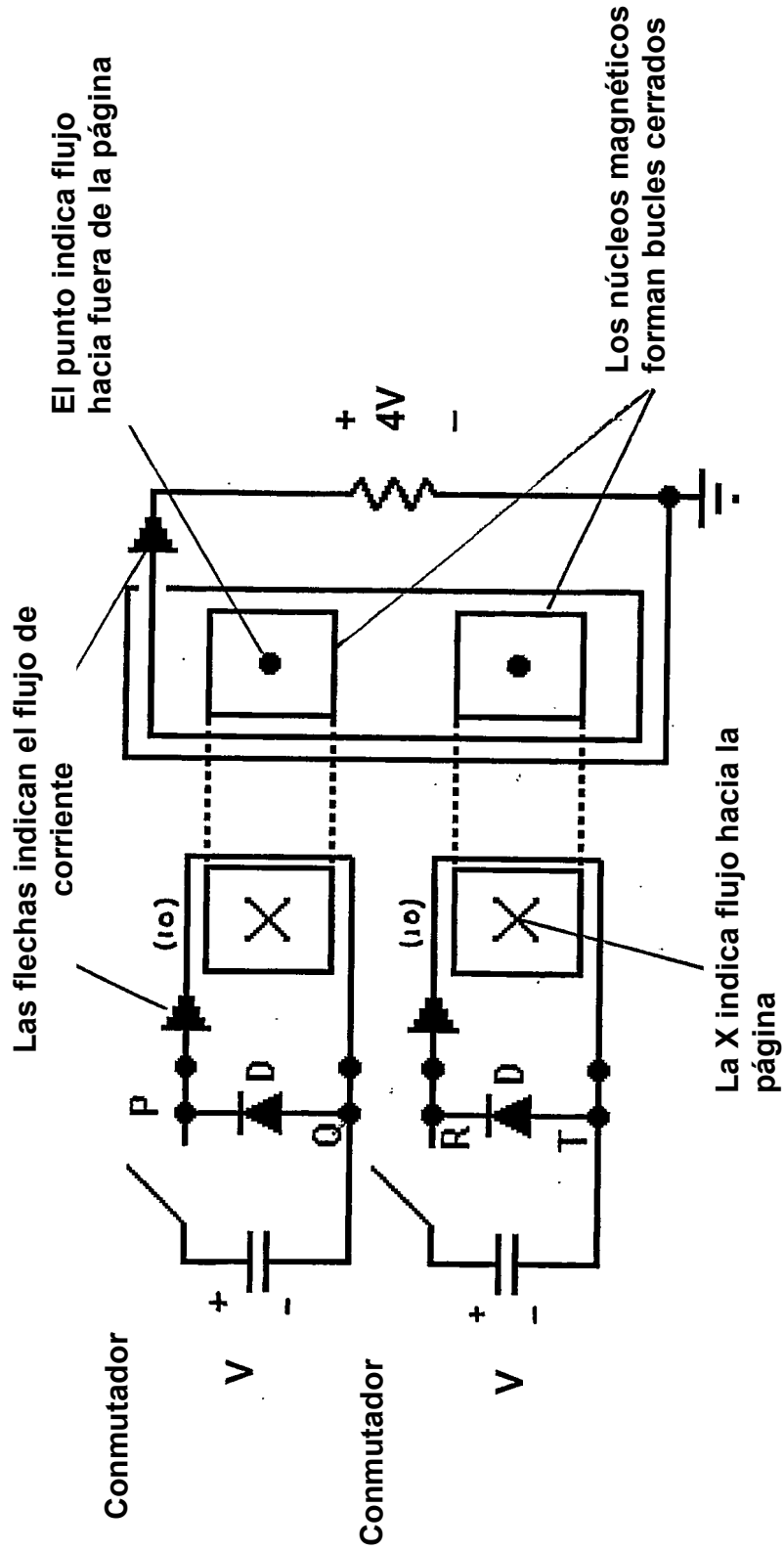


Figura 4

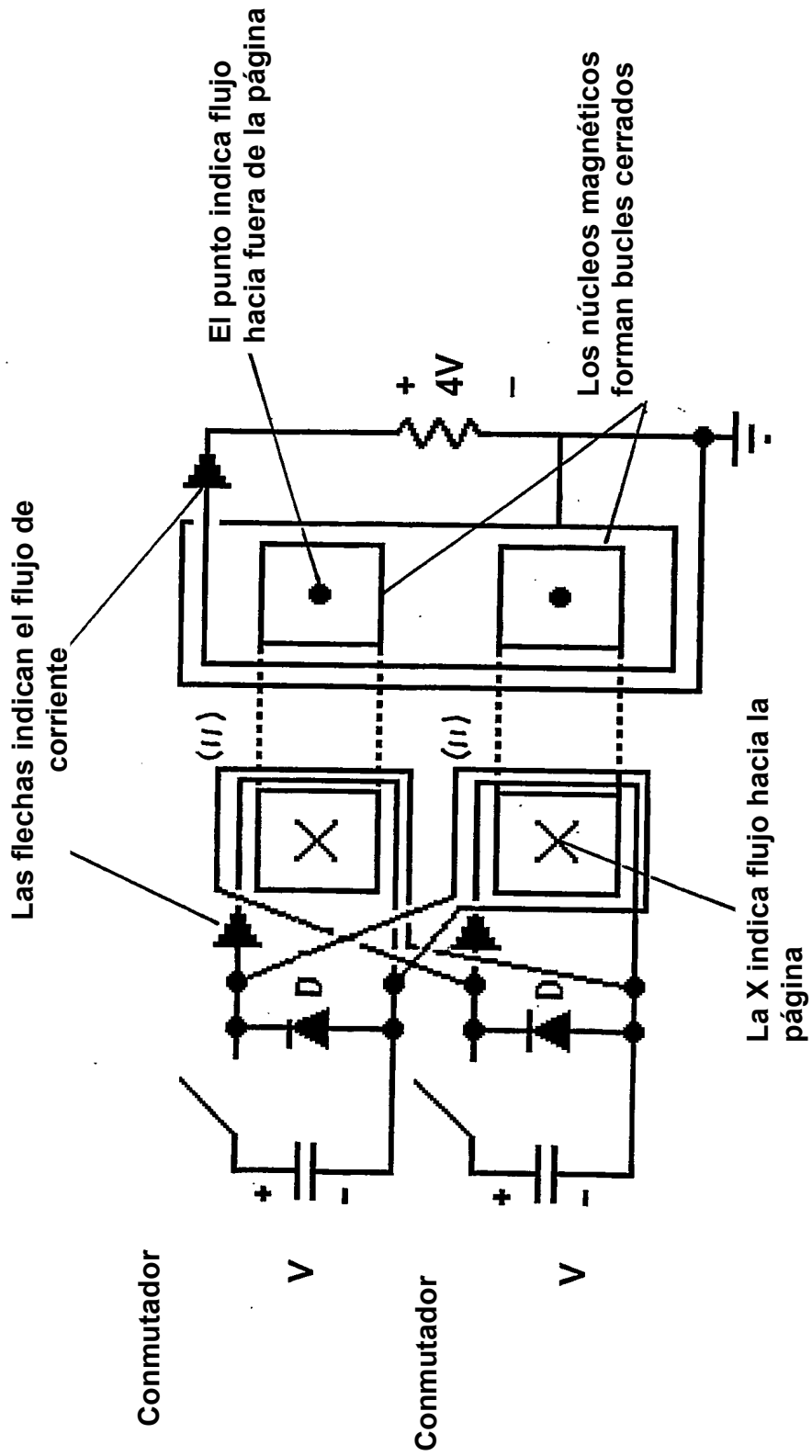
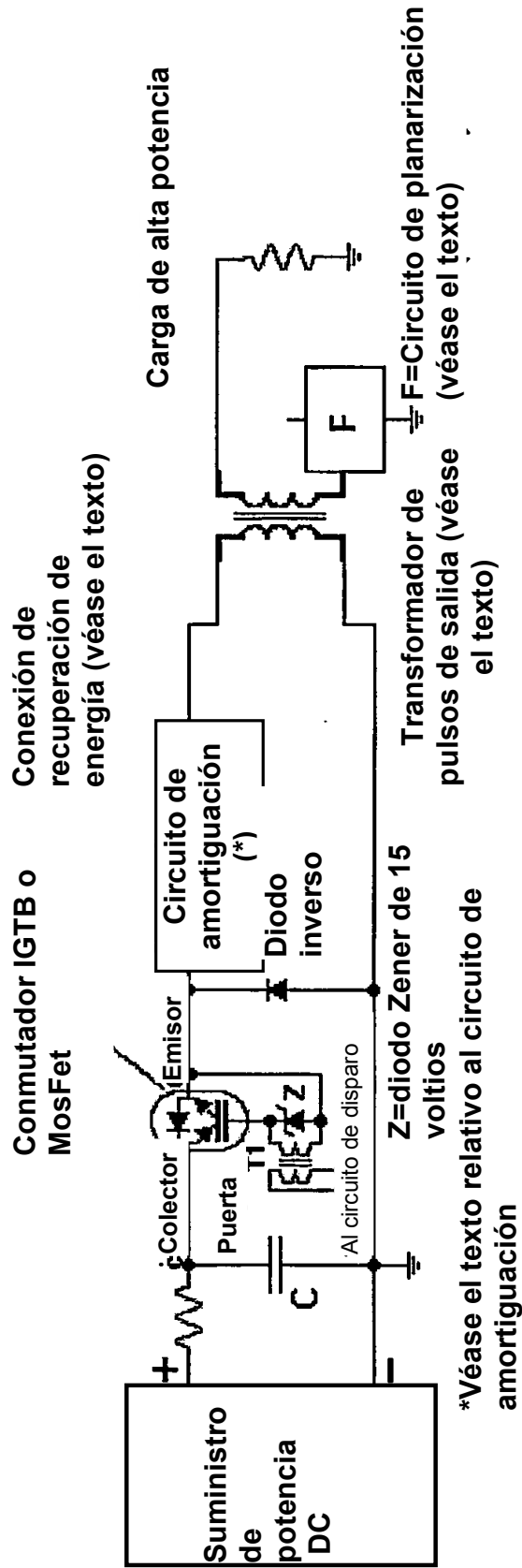


Figura 5



*Véase el texto relativo al circuito de amortiguación

Figura 6

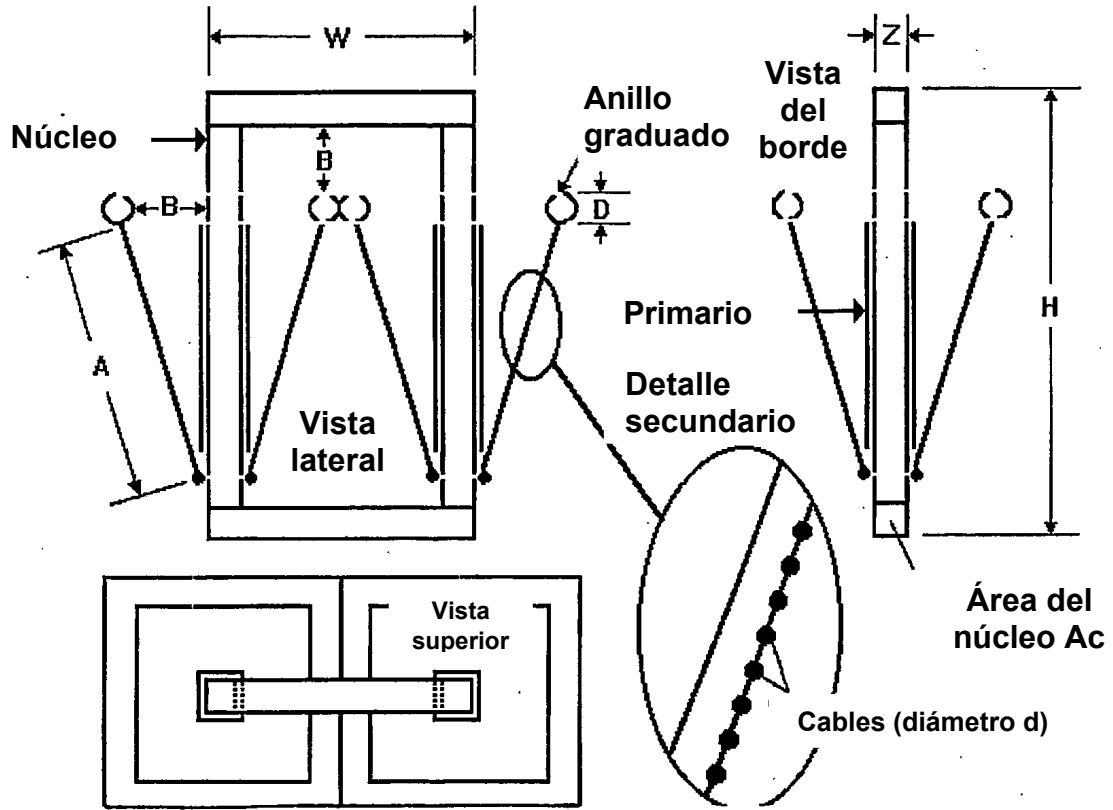


Figura 7

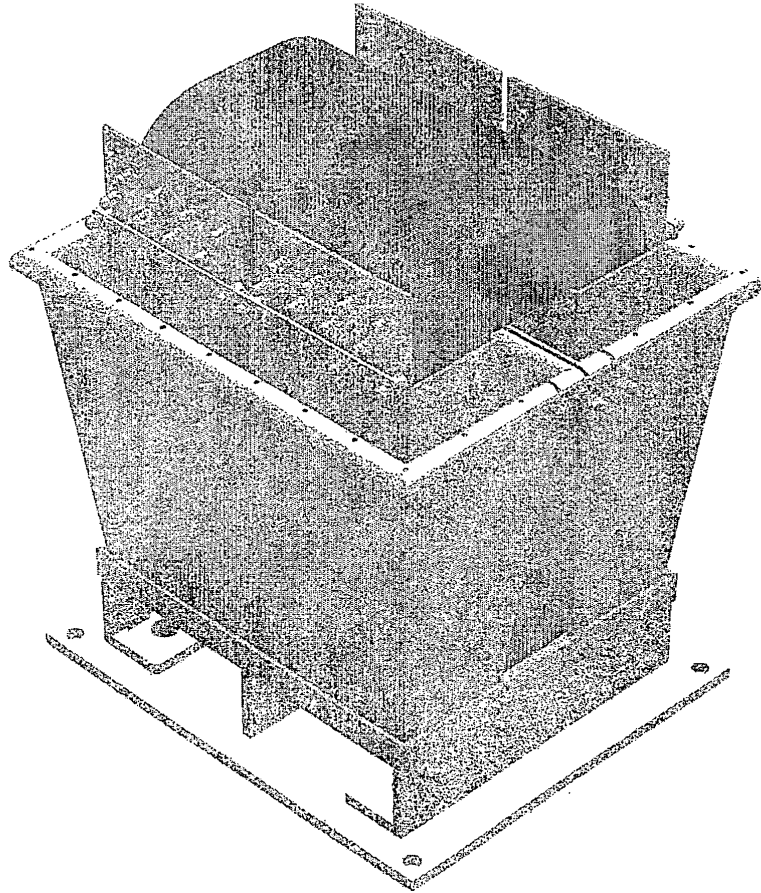


Figura 8