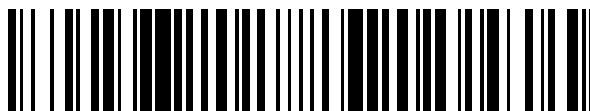


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 511 032**

51 Int. Cl.:

**H03F 3/217** (2006.01)

**H03K 3/78** (2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.01.2009** **E 09405018 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.08.2014** **EP 2099127**

54 Título: **Modulador de alta tensión con transformador**

30 Prioridad:

**05.03.2008 CH 3282008**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**22.10.2014**

73 Titular/es:

**AMPEGON AG (100.0%)  
Spinnereistrasse 5  
5300 Turgi, CH**

72 Inventor/es:

**ALEX, JÜRGEN**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 511 032 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 alta tensión con transformador

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un dispositivo de alimentación de alta tensión pulsado que comprende un modulador de alta tensión en forma de un denominado modulador de pasos de impulsos así como un transformador.

10 **Estado de la técnica**

Dispositivos de alimentación de alta tensión pulsados se utilizan para una serie de aplicaciones, por ejemplo, en aceleradores de partículas para la física de alta energía, en sistemas de radar o en sistemas para la generación de rayos para aplicaciones médicas, en la preparación de agua potable o en la fabricación de semiconductores.

Por J. Alex *et al.*, "A New Klystron Modulator for XFEL Based on PSM Technology", Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, EEUU (2007), páginas 2200-2202 se conoce un dispositivo de alimentación de alta tensión que se basa en un modulador de alta tensión en forma de un modulador de pasos de impulsos (PSM, *Pulse Step Modulator*) con un transformador conectado aguas abajo.

En la figura 1 se representa un diagrama de bloques esquemático de un dispositivo de alimentación de alta tensión de este tipo. El modulador de alta tensión 1 está configurado a partir de veinticuatro módulos de conmutación idénticos conectados en serie, generando cada uno de los módulos en el estado activo una tensión continua predeterminada en su salida. En el estado pasivo, cada módulo permite un flujo de corriente unidireccional a través de un diodo de libre circulación sin que esté aplicada una tensión considerable entre las salidas del módulo. Las disposiciones de este tipo están muy extendidas en sí como amplificadores de conmutación PSM, por ejemplo, para activar el tubo de emisión de emisoras de radio AM.

El modulador de alta tensión 1 se alimenta por una tensión de alimentación  $U_S$  y genera una tensión inicial pulsada  $U_A$ . Ésta se transmite a través de una línea coaxial 2 a un transformador de impulsos 5 cuyo devanado primario 51 cierra el circuito de carga para el modulador de alta tensión 1 (circuito primario) junto con un elemento RC con una resistencia 3 y una capacitancia 4. Un devanado secundario 52 está acoplado de forma inductora con el devanado primario 51 a través de un núcleo de transformador 53. De este modo, los impulsos de tensión generados por el modulador de alta tensión 1 se transforman de forma ascendente en el circuito primario para formar impulsos de tensión con una tensión mayor en el circuito secundario y se proporcionan a una carga 6 en forma de un clístron.

Un posible desarrollo de la tensión  $U$  en la salida del modulador de alta tensión 1 y el desarrollo que resulta de ello de la corriente  $I$  en el devanado primario 51 se ilustran de forma muy simplificada y esquemática en la figura 2. El modulador de alta tensión emite una secuencia periódica de impulsos de tensión positivos 31 con una tensión de impulso  $U_P$ , una duración de impulso  $T_P$  y una duración de periodo  $T_{cyc}$  o un intervalo de impulso  $T_0$ . Estos impulsos de tensión provocan un flujo de magnetización en el devanado primario. Durante cada impulso, esta corriente de magnetización aumenta desde cero hasta un valor  $I_P$  y genera a este respecto un campo magnético en el devanado primario y en el núcleo de transformador, cuya intensidad de campo es proporcional a la corriente de magnetización (curva inferior en el diagrama de corriente). Mediante la densidad de flujo temporalmente variable provocada de este modo en el devanado secundario se produce una tensión secundaria que lleva a un flujo de corriente a través de la carga 6. Esta corriente de carga en el circuito secundario lleva a una corriente de carga retransformada de manera correspondiente en el circuito primario que está solapada a la corriente de magnetización. En la figura 2, la corriente de carga se supone como temporalmente constante. La corriente global resultante en el circuito primario, es decir, la suma de la corriente de magnetización y la corriente de carga, se representa como curva superior en el diagrama de corriente. La corriente global también aumenta temporalmente hasta un valor  $I_P'$ . Tras el final del impulso 31, la tensión secundaria, y, con ello, también la corriente de carga, vuelven a ascender a cero. Sin embargo, la corriente de magnetización en primer lugar sigue fluyendo en el circuito primario y se tiene que disminuir, desmagnetizándose de nuevo el núcleo. Esto se puede realizar en principio de forma meramente pasiva al disiparse energía magnética almacenada en el circuito primario a través de una red de resistencia. Sin embargo, una desmagnetización meramente pasiva de este tipo es dado el caso demasiado lenta, en particular cuando la relación de palpaado  $T_P/T_{cyc}$  se vuelve grande.

Para acelerar y controlar de forma dirigida la desmagnetización, se propuso en el documento de Alex *et al.* realizar una desmagnetización activa. Para ello, el modulador de alta tensión 1 se diseña de modo que permite generar una tensión negativa con un flujo de corriente unidireccional en su salida (funcionamiento de dos cuadrantes). Para poder generar una tensión de desmagnetización negativa, en Alex *et al.* se conectaron aguas abajo de algunos de los módulos de conmutación unos denominados módulos inversos que permiten invertir de forma selectiva la tensión generada por el respectivo módulo de conmutación asociado.

De este modo se vuelve posible generar un impulso de desmagnetización negativo 32 con una tensión de desmagnetización  $U_D$  y una duración de impulso de desmagnetización  $T_D$  tras el final del impulso de tensión positivo

31. Debido a este impulso de desmagnetización, la corriente en el circuito primario vuelve a disminuir hasta que alcance el valor cero. Debido al carácter de diodo de la carga en el circuito secundario que sólo permite un flujo de corriente unidireccional, no fluye una corriente de carga durante el impulso de desmagnetización. Valores negativos de la corriente en el circuito primario no son posibles en el modulador de alta tensión de Alex *et al.* debido al tipo constructivo, de modo que, incluso en caso de una duración prolongada del impulso de desmagnetización, la corriente permanece en el circuito primario en el valor cero.

La energía máxima que se puede transmitir durante un impulso individual a través del transformador de impulsos está limitada en particular por la magnetización de saturación del núcleo de transformador. Para aprovechar lo mejor posible la zona de magnetización disponible del núcleo entre los límites de saturación negativo y positivo es conocido básicamente premagnetizar de forma negativa el núcleo de un transformador de impulsos antes de un impulso de tensión en contra de la densidad de flujo positiva inducida por el impulso de tensión (polarización negativa).

El documento de J. Biela *et al.*, "*Reset Circuits with Energy Recovery for Solid State Modulators*", Proceedings of the Pulsed Power and Plasma Science Conference, Albuquerque (NM), EEUU, 17 a 22 de junio, páginas 1309-1312 (2007) da a conocer diferentes posibilidades de conseguir una premagnetización negativa de este tipo. En particular, es conocido por este documento prever en el transformador un devanado auxiliar que está conectado con una fuente de tensión continua y que de este modo premagnetiza de forma negativa el núcleo de transformador. Además, en este documento se dan a conocer otras disposiciones diferentes para generar una premagnetización negativa que en parte no requieren un devanado auxiliar en el transformador. Sin embargo, estas disposiciones son relativamente complicadas y no se pueden utilizar sin más junto con un modulador de alta tensión modular en la tecnología PSM debido a su funcionamiento.

Por el documento WO 95/10881 se conoce un amplificador de conmutación en forma de un modulador de pasos de impulsos que es adecuado para proporcionar una tensión inicial con cualquier signo y cualquier sentido de corriente. Este amplificador de conmutación sirve para generar tensiones de carga positivas y negativas en aplicaciones como emisoras de radio sin tubo, generadores de funciones de alta potencia, acoplamientos de red, emisores para una comunicación alámbrica, etc. Como ventaja especial de este amplificador de conmutación se señala en dicho documento el hecho de que se puede prescindir de un transformador en la salida. Por tanto, precisamente no está previsto un uso en conexión con un transformador en este documento.

### Exposición de la invención

Un objetivo de la presente invención es mostrar un dispositivo de alimentación de alta tensión pulsado con un transformador que aproveche de la mejor forma posible la zona de magnetización del núcleo de transformador y que esté configurado de forma sencilla y con un funcionamiento seguro.

Este objetivo se consigue mediante un dispositivo de alimentación de alta tensión con las características de la reivindicación 1.

Un objetivo adicional de la presente invención es mostrar un procedimiento para generar una alta tensión pulsada en el que se utilice un modulador de alta tensión con un transformador conectado aguas abajo y en el que la zona de magnetización del núcleo de transformador se aproveche de la mejor forma posible.

Este objetivo se consigue mediante un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10.

Configuraciones ventajosas se indican en las reivindicaciones dependientes.

La presente invención proporciona por tanto un dispositivo de alimentación de alta tensión pulsado de acuerdo con un primer aspecto. Éste presenta un modulador de alta tensión (preferiblemente controlado por semiconductor) en forma de un modulador de pasos de impulsos con una pluralidad de etapas de conmutación. Las etapas de conmutación comprenden respectivamente una fuente de tensión para generar una tensión continua y al menos un elemento de conmutación activable, en particular un elemento de conmutación de semiconductor con un electrodo de control, por ejemplo, un IGBT, para proporcionar de forma selectiva (es decir, de manera que se puede controlar de forma dirigida) la tensión continua como tensión inicial en las conexiones de salida de la etapa de conmutación. Al menos una parte de las etapas de conmutación están configuradas a este respecto para proporcionar de forma selectiva la tensión inicial con un signo positivo o negativo (inversión selectiva de la tensión). Las etapas de conmutación están conectadas en serie de modo que las tensiones iniciales de las etapas de conmutación individuales se suman durante el funcionamiento, y la tensión de suma así formada está aplicada en una carga formando un circuito de carga. El dispositivo comprende además un transformador con al menos un devanado primario y al menos un devanado secundario que está acoplado magnéticamente con el devanado primario a través de un núcleo de transformador. A este respecto, el devanado primario está dispuesto en el circuito de carga del modulador de alta tensión. Un dispositivo de control para el modulador de alta tensión está conectado de modo que actúa conjuntamente con los elementos de conmutación y controla los elementos de conmutación durante el funcionamiento de modo que el modulador de alta tensión genera en el devanado primario al menos un impulso de

tensión positivo ("impulso de transmisión") para la transmisión de energía a la carga del circuito secundario que lleva a un flujo de corriente positivo en el devanado primario. A este respecto, el modulador de alta tensión está configurado de modo que permite un flujo de corriente a través del circuito de carga tanto en un sentido positivo como en un sentido negativo contrario al mismo. Por tanto se vuelve posible en total un control de cuatro cuadrantes. El dispositivo de control controla los elementos de conmutación durante el funcionamiento de modo que el modulador de alta tensión emite una tensión de premagnetización negativa antes del impulso de tensión positivo, en particular en la forma de al menos un impulso para premagnetizar de forma negativa el núcleo de transformador a través de un flujo de corriente negativo.

De este modo se vuelve posible mediante una modificación sencilla del modulador de alta tensión aprovechar óptimamente las propiedades magnéticas del núcleo de transformador, en particular aprovechar toda la zona de densidad de flujo entre la saturación negativa y la saturación positiva sin que sea necesario para ello un circuito de premagnetización independiente. Además, mediante la estructura con varias etapas de conmutación en una disposición en serie se puede conseguir de manera sencilla una redundancia al preverse más etapas de conmutación de lo que serían realmente necesarias para generar el impulso de tensión y/o el impulso de premagnetización. Si falla una etapa de conmutación, entonces otra etapa de conmutación puede adoptar la función de ésta.

El modulador de alta tensión está configurado de forma modular al comprender cada etapa de conmutación un primer módulo de etapa de conmutación que está configurado para emitir una tensión inicial unipolar. Al menos una parte de las etapas de conmutación comprende además un segundo módulo de etapa de conmutación (módulo inverso), que está configurado para invertir de forma selectiva la tensión inicial del primer módulo de etapa de conmutación asociado. Los primeros módulos de etapa de conmutación y los segundos módulos de etapa de conmutación presentan preferiblemente una disposición de circuito idéntica y sólo se diferencian en cuanto a su equipamiento, es decir, por la presencia o la omisión de determinados elementos eléctricos. De este modo se puede conseguir una estructura muy sencilla mecánica y eléctricamente con módulos con dimensiones idénticas y conexiones eléctricas idénticas. En caso de una modificación de los requisitos con respecto a la tensión inicial se puede adaptar ligeramente el número de los módulos necesarios sin que los propios módulos se tengan que modificar fundamentalmente.

Las etapas de conmutación están configuradas en forma de circuitos de semipunto, estando el semipunto complementado de modo que forma un puente H completo en las etapas de conmutación con una inversión de tensión. Cada etapa de conmutación presenta por tanto un primer semipunto que está conectado con la fuente de tensión y que comprende unos elementos de conmutación primero y segundo, estando los elementos de conmutación primero y segundo conectados en serie a través de un punto de nodo común (contacto central). El punto de nodo común está conectado de forma directa o indirecta (a través de elementos constructivos pasivos como bobinas, resistencias, etc.) con una primera conexión de salida de la etapa de conmutación. Cuando no sigue un módulo inverso, entonces la otra conexión de salida puede estar conectada, según la necesidad, por ejemplo, con el potencial positivo o el potencial negativo de la fuente de tensión. Los elementos de conmutación primero y segundo con sus electrodos de control están conectados con el dispositivo de control de modo que se pueden llevar de forma controlada a un estado conductor o a un estado no conductor a través del dispositivo de control.

Las etapas de conmutación con la inversión de tensión comprenden de manera correspondiente un segundo semipunto que está conectado, en paralelo al primer semipunto, con la fuente de tensión y que comprende unos elementos de conmutación tercero y cuarto, estando los elementos de conmutación tercero y cuarto conectados en serie a través de un segundo punto de nodo común (contacto central). El segundo punto de nodo está conectado entonces de forma directa o indirecta con una segunda conexión de salida de la etapa de conmutación. Asimismo, los elementos tercero y cuarto de conmutación están conectados de manera correspondiente con el dispositivo de control de modo que se pueden llevar de forma controlada a un estado conductor o a un estado no conductor a través del dispositivo de control.

En paralelo a al menos una parte de los elementos de conmutación pueden estar dispuestos diodos de libre circulación para proteger los elementos de conmutación correspondientes frente a tensiones no deseadas y para asegurar un flujo de corriente incluso cuando falle uno de los elementos de conmutación o el dispositivo de control.

Además, tal como ya es conocido en sí por el estado de la técnica, el dispositivo de control puede controlar los elementos de conmutación tras el impulso de tensión positivo de modo que el modulador de alta tensión emite una tensión de desmagnetización negativa tras el impulso de tensión positivo para desmagnetizar al menos en parte el núcleo de transformador.

Preferiblemente, la suma del cambio de densidad de flujo negativo debido a la tensión de premagnetización y debido a la tensión de desmagnetización se corresponde, con respecto a su importe, de manera fundamental precisamente con el cambio de densidad de flujo positivo debido al impulso de transmisión. Dicho de otro modo, a ser posible, todo el cambio de densidad de flujo se realiza de forma controlada mediante una aplicación de tensiones y sólo en una medida secundaria, por ejemplo, mediante una disipación en resistencias óhmicas o mediante otras pérdidas. Con respecto a las tensiones, esto significa que la suma de la integral temporal de la tensión de premagnetización y de la

tensión de desmagnetización se corresponde, con respecto a su importe, fundamentalmente con la integral temporal del impulso de tensión.

Además, es ventajoso cuando la densidad de flujo negativa del núcleo se corresponda, con respecto a su importe, fundamentalmente con la densidad de flujo positiva al final del impulso de tensión tras la premagnetización, esto es, cuando el cambio de densidad de flujo se realice "simétricamente" alrededor del valor cero. En este caso, esto lleva a la exigencia de que la integral temporal de la tensión de premagnetización se corresponda, con respecto a su importe, fundamentalmente con la mitad de la integral temporal del impulso de tensión.

De acuerdo con un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento para generar una alta tensión pulsada de acuerdo con las reivindicaciones 10 y 11.

El control de los elementos de conmutación del modulador de alta tensión para generar la secuencia de impulsos puede estar implementado en hardware y/o software. Preferiblemente existe un software (es decir, un producto de programa informático con medios de programa informático para controlar uno o varios procesadores del dispositivo de control) que en su realización controla el dispositivo de control y, con ello, los elementos de conmutación de modo que se genera dicha secuencia de tensiones.

### Breve descripción de los dibujos

Formas de realización preferidas de la invención se describen a continuación mediante los dibujos en los que

- La figura 1 muestra un diagrama de bloques esquemático de un dispositivo de alimentación de alta tensión del estado de la técnica;
- La figura 2 muestra un diagrama esquemático que representa el desarrollo de la corriente y de la tensión para el dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con el estado de la técnica;
- La figura 3 muestra de forma esquemática una curva de histéresis de un núcleo de transformador magnético suave;
- La figura 4 muestra un diagrama esquemático que representa el desarrollo de la corriente y de la tensión para un dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con la invención;
- La figura 5 muestra un diagrama de conexión esquemático simplificado de un modulador de alta tensión de acuerdo con un ejemplo de realización preferido de la presente invención;
- La figura 6 muestra un diagrama de conexión simplificado de un módulo de una etapa de conmutación de acuerdo con un ejemplo de realización preferido de la presente invención;
- y
- La figura 7 muestra un diagrama de conexión simplificado de una etapa de conmutación completa con un módulo inverso.

### Descripción detallada de formas de realización preferidas

Los principios en los que se basa la presente invención se pueden explicar mejor partiendo del dispositivo de alimentación de alta tensión del estado de la técnica, tal como se indica en el documento anteriormente analizado de J. Alex *et al.* y tal como se explicó anteriormente en relación con las figuras 1 y 2. En este dispositivo de alimentación de alta tensión conocido, el modulador de alta tensión 1 que activa el devanado primario del transformador de impulsos permite un funcionamiento de dos cuadrantes (unas tensiones iniciales positiva y negativa con un sentido de corriente unidireccional). El modulador de alta tensión emite una secuencia de impulsos de tensión positivos 31 que provocan un flujo de corriente positivo a través del devanado primario. A cada impulso de tensión sigue un impulso de desmagnetización negativo hasta que la corriente (positiva) en el devanado primario se haya vuelto a disminuir hasta el valor cero. No son posibles corrientes negativas debido al tipo constructivo.

La energía de impulso máxima que se puede transmitir en este funcionamiento a través del transformador de impulsos está limitada en particular por la magnetización de saturación del núcleo de transformador. Esto se ilustra en la figura 3 que representa de forma esquemática una curva de histéresis típica, es decir, el desarrollo de la densidad de flujo magnética  $B$  en función de la intensidad de campo magnética  $H$  de un material magnético suave, tal como se utiliza a menudo en núcleos de transformador. Al inicio del impulso de tensión 31, la densidad de flujo magnética  $B$  en el núcleo se corresponde con la densidad de flujo de remanencia (positiva)  $B_{rem}$ . Durante el impulso de tensión 31, la densidad de flujo magnética  $B$  aumenta de manera correspondiente a la rama 21 de la curva de histéresis de la figura 2. El aumento  $dB/dH$  disminuye a medida que aumenta la intensidad de campo  $H$  hasta que el núcleo llegue a saturarse magnéticamente y la permeabilidad del núcleo haya bajado casi al valor 1. Durante el siguiente impulso de desmagnetización, la densidad de flujo  $B$  a lo largo de la rama 22 de la curva de histéresis vuelve de nuevo al valor  $B_{rem}$ . De manera conveniente, la duración de impulso  $T_P$  del impulso de tensión 31 se elige lo suficientemente corta de modo que no se alcanza el límite de saturación del núcleo, ya que las propiedades de transmisión del transformador más allá del límite de saturación empeoran mucho. Por tanto, sólo la amplitud  $\Delta B_i$  de la densidad de flujo, que fundamentalmente se corresponde con la diferencia entre el límite de saturación (positivo)  $B_{sat}$  y la remanencia (positiva)  $B_{rem}$ , se puede usar de manera eficaz para una transmisión de energía en el

transformador.

Sin embargo, la zona de densidad de flujo útil se puede ampliar mucho cuando el núcleo de transformador antes del impulso de tensión se premagnetiza de forma negativa. La premagnetización se puede realizar, por ejemplo, hasta casi el límite de saturación negativo  $-B_{\text{sat}}$ . Durante la premagnetización, la densidad de flujo sigue a la rama 24 de la curva de histéresis. En el siguiente impulso de tensión está disponible ahora la zona de densidad de flujo  $\Delta B_2$  para la transmisión de energía en el transformador que se extiende desde  $-B_{\text{sat}}$  hasta  $+B_{\text{sat}}$ . A este respecto, la densidad de flujo sigue a la rama 23 de la curva de histéresis. Las propiedades magnéticas del núcleo se pueden usar de este modo de manera mucho más eficaz. De este modo se puede utilizar de forma eficaz un núcleo con aproximadamente sólo medio volumen con la misma potencia de transmisión.

Si en la disposición de Alex *et al.* se debe realizar una premagnetización de este tipo, entonces sería necesario prever para ello un circuito de conmutación independiente que magnetiza el núcleo, por ejemplo, a través de un devanado auxiliar. La presente invención propone en su lugar utilizar para ello el propio modulador de alta tensión. Para ello, el modulador de alta tensión se modifica en el sentido en que se posibilitan corrientes negativas (funcionamiento de cuatro cuadrantes). El modulador de alta tensión se opera entonces de modo que antes del verdadero impulso de tensión 31 se genera una tensión de premagnetización negativa que provoca una corriente de premagnetización negativa en el devanado primario.

Un posible desarrollo de tensión y corriente correspondiente se ilustra en la figura 4. Antes del impulso de tensión positivo 31 se genera por el amplificador de conmutación un impulso de premagnetización negativo 33 con una tensión de premagnetización negativa (tensión de polarización)  $U_B$  y una duración de impulso  $T_B$ . Éste provoca una corriente de magnetización negativa en el circuito primario cuyo importe aumenta a medida que aumenta la duración de impulso. Al final del impulso de premagnetización, la corriente ha alcanzado un valor negativo  $I_B$ . En esta fase no fluye corriente de carga. Esto se puede deber al carácter de la carga cuando la carga sólo permite un flujo de corriente unidireccional, tal como, por ejemplo, en un tubo de clístrón. En otros tipos de carga, la carga también puede estar desconectada de forma activa en esta fase. En el siguiente tiempo de espera  $T_H$ , esta corriente se mantiene en gran parte (no teniendo en cuenta pérdidas óhmicas). En el siguiente impulso de tensión positivo 31 aumenta ahora la corriente de magnetización, partiendo del valor negativo  $I_B$ , en el sentido positivo hasta que haya alcanzado un valor positivo  $I_P$  al final del impulso de tensión 31. En la misma medida aumenta la intensidad de campo magnética en el núcleo de transformador desde un valor inicial negativo hasta un valor final positivo. Durante este aumento está solapada ahora a la corriente de magnetización una corriente de carga (transformada), tal como se describe en relación con la figura 2. Tras el final del impulso de tensión, la corriente de carga se omite de nuevo, mientras que la corriente de magnetización se mantiene en gran parte durante un tiempo de espera  $T_H$  (no teniendo en cuenta pérdidas óhmicas) y a continuación, tal como se describe en relación con la figura 3, disminuye hasta el valor cero bajo la influencia de un impulso de desmagnetización 32 antes de que empiece un nuevo ciclo de impulsos.

Para aprovechar de la mejor forma posible las propiedades magnéticas del núcleo, el impulso de premagnetización y el impulso de desmagnetización se eligen preferiblemente de modo que la intensidad de campo magnética o la densidad de flujo en el núcleo al inicio del impulso de tensión positivo se corresponde, con respecto a su importe, fundamentalmente con la intensidad de campo o la densidad de flujo al final del impulso de tensión positivo, aunque con un signo invertido. Dicho de otro modo, la intensidad de campo o la densidad de flujo durante el impulso de tensión positivo preferiblemente cambia de un valor negativo a un valor positivo de un importe absoluto fundamentalmente idéntico. Dado que, en el presente ejemplo, la intensidad de campo magnética sólo se determina por la corriente de magnetización en el devanado primario, es válido por tanto de manera conveniente  $I_B \approx -I_P$ , o para las tensiones  $U$ :

$$\int_{T_B} U dt \approx -\frac{1}{2} \int_{T_P} U dt \approx \int_{T_D} U dt. \quad (\text{ecuación 1})$$

Expresado en palabras, de manera conveniente, la integral de la tensión en el devanado primario durante el impulso de premagnetización (en la figura 4, la superficie por debajo del impulso de premagnetización 33) se corresponde, con respecto a su importe, fundamentalmente con la mitad de la integral de la tensión durante el impulso de tensión positivo (en la figura 4, por tanto, con la mitad de la superficie por debajo del impulso de tensión 32). Para conseguir a continuación una desmagnetización completa, de manera conveniente la integral de la tensión durante el impulso de desmagnetización ascenderá, con respecto a su importe, también fundamentalmente a la mitad de la integral del impulso de tensión positivo. En estos planteamientos no se han tenido en cuenta pérdidas óhmicas. Al existir pérdidas óhmicas, el impulso de premagnetización se puede prolongar de manera correspondiente o se puede aumentar la tensión del mismo para compensar estas pérdidas, y el impulso de desmagnetización se puede acortar de manera correspondiente. El término "fundamentalmente" significa por tanto en el presente caso "aproximadamente y no teniendo en cuenta pérdidas óhmicas".

En la práctica no es posible a menudo predeterminedar exactamente la tensión del impulso de premagnetización. El

final del impulso de premagnetización se determina entonces durante el funcionamiento preferiblemente mediante una medición de la superficie de tensión-tiempo (es decir, de la integral de la tensión a lo largo del tiempo). El impulso de premagnetización debería empezar en este caso tan temprano que incluso con la menor tensión de premagnetización a esperar se consigue una premagnetización negativa suficiente antes de que empiece el impulso de tensión positivo. Por regla general, el valor deseado de la premagnetización se alcanza antes. En este caso, el devanado primario se mantiene fundamentalmente sin tensión durante un tiempo de mantenimiento  $T_H$  hasta que empiece el impulso de tensión positivo. Tras el final del impulso de tensión positivo puede estar previsto un tiempo de mantenimiento adicional sin tensión  $T_H$  que sin embargo puede estar elegido muy corto y que en la práctica, por ejemplo, sólo estará limitado por la velocidad de cálculo del control.

Sin embargo, dado el caso, también se puede prescindir de estos tiempos de espera. Igualmente es concebible unir los impulsos para la desmagnetización y para la premagnetización negativa para formar un único impulso. Sin embargo, evidentemente, la desmagnetización y la premagnetización también se pueden conseguir mediante una secuencia de varios impulsos discretos en lugar de respectivamente mediante un único impulso continuo. Evidentemente, la tensión durante los impulsos no tiene que ser constante. En particular la tensión del impulso de tensión positivo 31 se puede variar, por ejemplo, de modo que se minimizan transitorios y de modo que en la salida del dispositivo de alimentación de alta tensión se consigue un máximo de impulso lo más plano posible tras un tiempo de oscilación transitoria lo más breve posible.

En las figuras 5 a 7 se ilustra a modo de ejemplo una posible implementación de un modulador de alta tensión adecuado. Tal como se ilustra en particular en la representación muy simplificada de la figura 5, el modulador de alta tensión está configurado a partir de una pluralidad de etapas de conmutación  $S_1, \dots, S_{n-1}, S_n$  que están dispuestas en serie de modo que se suman las tensiones iniciales de las etapas de conmutación en la salida del modulador de alta tensión. Cada etapa de conmutación comprende a este respecto un módulo de conmutación  $M_1, \dots, M_{n-1}, M_n$  que en sus conexiones de salida genera de forma selectiva una tensión inicial positiva o puentea de forma conductora las conexiones de salida sin generar de forma activa una tensión. A este respecto es posible un flujo de corriente bidireccional entre las conexiones de salida. Además, a algunos de los módulos de conmutación está conectado aguas abajo un módulo inverso que permite invertir de forma selectiva la tensión inicial del módulo de conmutación en cuestión. En la figura 5 se muestra para ello a modo de ejemplo el módulo inverso  $M'_{n-1}$  para el módulo de conmutación  $M_{n-1}$ .

Cada uno de los módulos de conmutación comprende una fuente de tensión continua  $Q$ . Con ésta están conectados dos elementos de conmutación de semiconductor en forma de IGBT (IGBT = *Insulated-Gate Bipolar Transistor*, transistor bipolar de puerta aislada)  $V_1, V_2$  que están conectados en serie. De manera paralela a cada IGBT está conectado un diodo de libre circulación  $D_1, D_2$  dispuesto en la dirección de bloqueo con respecto a la fuente de tensión continua. La disposición de los IGBT y de los diodos se puede considerar como un primer semipunto  $A$  de un circuito de puente. El nodo común (contacto central)  $N$  de los IGBT y de los diodos está conectado a través de un estrangulador  $L_1$  con una resistencia óhmica  $R_1$  conectada en paralelo con una conexión  $P_1$ .

En las etapas de conmutación en las que aguas abajo del módulo de conmutación no está conectado un módulo inverso, la conexión  $P_1$  forma la primera conexión de salida de la etapa de conmutación que lleva a la etapa de conmutación anterior. La segunda conexión de salida que lleva a la siguiente etapa de conmutación es una conexión  $P_2$  en la que está aplicado permanentemente el mayor potencial de la fuente de tensión  $Q$ . Cuando la etapa de conmutación correspondiente debe emitir una tensión inicial positiva, entonces un dispositivo de control 7 controla los IGBT  $V_1, V_2$  de esta etapa de conmutación de modo que IGBT  $V_1$  es conductor (está cerrado) e IGBT  $V_2$  no es conductor (está abierto). En cambio, siempre que la etapa de conmutación correspondiente sólo deba puentear sus conexiones de salida, la unidad de control 7 abre el IGBT  $V_1$  y cierra el IGBT  $V_2$ . Las conexiones de salida  $P_1$  y  $P_2$  están puenteadas ahora fundamentalmente mediante el estrangulador  $L_1$  y la resistencia  $R_1$ .

Los diodos de libre circulación  $D_1, D_2$ , por un lado, protegen los IGBT frente a tensiones colector-emisor negativas y, por otro lado, aseguran que un flujo de corriente a través del módulo en cuestión ni siquiera se interrumpe cuando ambos IGBT se abran debido a un funcionamiento erróneo. En caso de un sentido de corriente positivo, una corriente entre las conexiones  $P_1$  y  $P_2$  puede fluir en cualquier momento a través del diodo  $D_2$ , en caso de un sentido de corriente negativo, ésta puede fluir a través del diodo  $D_1$  y a través de la fuente de tensión  $Q$ .

Cada módulo inverso comprende un segundo semipunto  $A'$  que fundamentalmente es idéntico al primer semipunto  $A$  del módulo de conmutación asociado y que también está compuesto por dos conmutadores de semiconductor dispuestos en serie en forma de unos IGBT  $V_1', V_2'$  y diodos de libre circulación  $D_1', D_2'$  dispuestos en paralelo a cada IGBT. Este segundo semipunto está conectado a través de líneas  $P_2-P_2'$  y  $P_3-P_3'$  con la fuente de tensión  $Q$  del módulo de conmutación asociado. En total, en la etapa de conmutación  $S$  en cuestión, que está compuesta por el módulo de conmutación  $M$  y el módulo inverso  $M'$  conectado aguas abajo, están disponibles por tanto dos semipuntos idénticos dispuestos en paralelo que ambos están conectados con la fuente de tensión  $Q$ . Los nodos comunes de los IGBT (los contactos centrales) de los dos semipuntos están conectados con las conexiones de salida del módulo de conmutación en cuestión, estando dispuesto entre uno de los contactos centrales y la conexión de salida en cuestión a su vez un estrangulador  $L_1$  con una resistencia óhmica  $R_1$  conectada en paralelo. En total está disponible por tanto en estas etapas de conmutación un puente  $H$  completo como

regulador de cuatro cuadrantes. Éste permite generar una tensión con un signo positivo o negativo con cualquier sentido de corriente. Un esquema para una posible activación de los IGBT de este puente H se indica en la siguiente tabla:

5 Tabla 1: Posible activación de los elementos de conmutación en una etapa de conmutación con un módulo inverso

| Tensión  | V1      | V2      | V1'     | V2'     |
|----------|---------|---------|---------|---------|
| negativa | abierto | cerrado | cerrado | abierto |
| positiva | cerrado | abierto | abierto | cerrado |

Entre el modulador de alta tensión configurado de este modo de forma modular a partir de etapas de conmutación  $S_1, \dots, S_{n-1}, S_n$  y la línea 2 o el conjunto de líneas que conecta el modulador de alta tensión con el devanado primario del transformador de impulsos está dispuesto un filtro de salida 8 indicado sólo de forma esquemática. Éste sirve para filtrar las frecuencias de conmutación del modulador de alta tensión. Estas frecuencias están situadas normalmente en el intervalo de algunos kHz cuando el modulador se opera de manera conocida en sí mediante una modulación de ancho de impulsos (PWM). En particular se puede tratar en el caso del filtro de un filtro paso bajo de cuarto orden, tal como se indica en la figura 4 de J. Alex *et al.* Se hace referencia expresa a la divulgación asociada de J. Alex *et al.*

En la figura 6 se representa a modo de ejemplo la estructura de un módulo de conmutación M individual. Una tensión de alimentación trifásica  $U_S$  de una red de alimentación se alimenta a través de fusibles F1, F2 y contactadores K1, K2 a un rectificador de puente a partir de diodos D10, D11, D12, D13, D14 y D15. Un convertidor ascendente (Boost Converter) con una inductancia L3, un IGBT V3 que actúa como conmutador de semiconductor y un diodo de libre circulación D3 alimenta un banco de condensador que está configurado a partir de condensadores C11, C12, ..., C17, C18, estando conectados respectivamente dos condensadores en serie entre sí y en paralelo a un divisor de tensión a partir de pares de resistencia R11, R12, ..., R17, R18. Un contactador K3 con una resistencia en serie R3 posibilita una descarga controlada del banco de condensador.

El convertidor ascendente alimenta el banco de condensador y convierte así la tensión disponible en el rectificador en una tensión de circuito intermedio de módulo UM. Durante los impulsos de salida se recibe potencia sobre todo de los condensadores que se vuelven a cargar entre los impulsos desde la red de alimentación. Por tanto, la tensión de circuito intermedio disminuye algo durante los impulsos debido a la descarga de los condensadores y vuelve a aumentar con la carga. El IGBT V3 se controla en total de modo que la red de alimentación se carga con una potencia lo más constante posible. Para simplificar el filtrado, el IGBT V3 se opera preferiblemente con una frecuencia de conmutación relativamente elevada de, por ejemplo, 20 kHz.

La combinación del rectificador y del convertidor ascendente constituye en total una fuente de tensión continua Q cuya tensión UM está aplicada en el semipunto B que ya se describió anteriormente.

Cada módulo M comprende en este caso su propia unidad de control 11 que se alimenta con corriente a través de fusibles F3, F4 y un transformador T1 y que controla de forma activa, por un lado, el IGBT V3 del convertidor ascendente, y, por otro lado, los IGBT V1, V2 del semipunto B. Las unidades de control 11 de los módulos individuales están conectadas con un control central no representado gráficamente que coordina las unidades de control 11 de los módulos. Junto con el control central, estas unidades de control forman el dispositivo de control 7 que se indica de forma esquemática en la figura 5.

En la figura 7 se representa una combinación de un módulo de conmutación M y un módulo inverso M' asociado. Ambos módulos están configurados básicamente de forma idéntica, es decir, tienen la misma disposición de circuito y están configurados sobre platinas base configuradas de forma idéntica. Los módulos se diferencian sólo en cuanto a su equipamiento, es decir, por la presencia o la omisión de determinados componentes eléctricos. Así, también el módulo inverso M' presenta una unidad de control 11'. Se omite la fuente de tensión Q a partir del rectificador y del convertidor ascendente. El módulo M' está compuesto por lo demás fundamentalmente sólo por el semipunto A' que está configurado de forma idéntica al semipunto A del módulo M y que se alimenta con tensión por el módulo M, tal como ya se explicó.

Para generar con el modulador de alta tensión configurado a partir de estos módulos un impulso de tensión positivo, todas o una parte de las etapas de conmutación se activan de modo que emiten una tensión inicial positiva, de modo que las tensiones iniciales se suman para formar la tensión de impulso  $U_P$ . A la inversa, cuando se debe generar un impulso de tensión negativo (en particular para la premagnetización y/o la desmagnetización del núcleo de transformador), se activan una o varias de las etapas de conmutación que presentan un módulo inverso. Éstas se operan entonces de modo que respectivamente emiten una tensión inicial negativa, sumándose estas tensiones iniciales entonces para formar la tensión  $U_B$  o  $U_D$ .

Es ventajoso cuando no todas las etapas de conmutación sean necesarias para generar la tensión inicial respectivamente deseada del amplificador de conmutación, sino sólo una parte de las etapas de conmutación tengan que estar activas al mismo tiempo. De este modo, el sistema se vuelve redundante y, con ello, tolerante

frente a errores: si falla una etapa de conmutación, entonces otra etapa de conmutación puede adoptar la función de ésta. Al mismo tiempo se puede conseguir mediante una conexión y desconexión controladas de etapas de conmutación una distribución de carga uniforme por las etapas de conmutación y, con ello, una menor carga de las etapas de conmutación individuales.

En lugar de la manera descrita en este caso, el modulador de alta tensión también puede estar configurado de otra manera. Así, como modulador de alta tensión se puede utilizar, por ejemplo, el amplificador de conmutación del documento WO 95/10881 ya mencionado. En el amplificador de conmutación descrito en el mismo, cada etapa de conmutación presenta un circuito de puente H completo, y los contactos centrales de estos puentes H forman las salidas de la respectiva etapa de conmutación.

Mientras que en la forma de realización anterior cada módulo de conmutación y cada módulo inverso presentan su propia unidad de control 11, puede estar previsto también un único dispositivo de control central que controla de forma directa y central los elementos de conmutación.

La invención se define mediante las reivindicaciones siguientes.

#### Lista de números de referencia

|                                                            |                                                       |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1                                                          | Modulador de alta tensión/amplificador de conmutación |
| 2                                                          | Línea coaxial                                         |
| 3                                                          | Resistencia                                           |
| 4                                                          | Condensador                                           |
| 5                                                          | Transformador de impulsos                             |
| 6                                                          | Carga (clístron)                                      |
| 7                                                          | Dispositivo de control                                |
| 8                                                          | Filtro de salida                                      |
| 11, 11'                                                    | Unidad de control                                     |
| 21, 22, 23, 24                                             | Ramas de la curva de histéresis                       |
| 31                                                         | Impulso de tensión (impulso de transmisión)           |
| 32                                                         | Impulso de desmagnetización                           |
| 33                                                         | Impulso de premagnetización                           |
| 51                                                         | Devanado primario                                     |
| 52                                                         | Devanado secundario                                   |
| 53                                                         | Núcleo                                                |
| $U_S$                                                      | Tensión de alimentación                               |
| $U_A$                                                      | Tensión inicial                                       |
| $U_P$                                                      | Tensión de impulso                                    |
| $U_B$                                                      | Tensión de premagnetización                           |
| $U_B$                                                      | Tensión de desmagnetización                           |
| $I_P$                                                      | Corriente de impulso máxima                           |
| $I_P'$                                                     |                                                       |
| $I_B$                                                      | Corriente de premagnetización                         |
| $T_P$                                                      | Duración de impulso del impulso de transmisión        |
| $T_H, T_H'$                                                | Tiempo de mantenimiento                               |
| $T_D$                                                      | Duración de impulso del impulso de desmagnetización   |
| $T_0$                                                      | Intervalo de impulsos                                 |
| $T_{cyc}$                                                  | Duración de periodo                                   |
| H                                                          | Intensidad de campo magnética                         |
| B                                                          | Densidad de flujo magnética                           |
| $B_{sat}$                                                  | Densidad de flujo de saturación                       |
| $B_{rem}$                                                  | Densidad de flujo de remanencia                       |
| $\Delta B_1, \Delta B_2$                                   | Zona de densidad de flujo útil                        |
| P1, P2, P3, P1', P2', P3'                                  | Conexiones                                            |
| Q                                                          | Fuente de tensión                                     |
| S, S <sub>1</sub> , ..., S <sub>n-1</sub> , S <sub>n</sub> | Etapas de conmutación                                 |
| M, M <sub>1</sub> , ..., M <sub>n-1</sub> , M <sub>n</sub> | Módulo de conmutación                                 |
| M', M' <sub>n-1</sub>                                      | Módulo inverso                                        |
| A, A'                                                      | Semipunto                                             |
| N, N'                                                      | Nodo común/contacto central                           |
| V1, V2, V3, V1', V2', V3'                                  | Elemento de conmutación (IBGT)                        |
| D1, D2, D1', D2', D3, D10, D11, D12, D13, D14, D15         | Diodo                                                 |
| L1, L3                                                     | Inductancia/bobina/estrangulador                      |
| C1, C11, C12, ..., C17, C18                                | Capacidad/condensador                                 |
| R1, R3, R11, R12, ..., R17, R18                            | Resistencia óhmica                                    |
| K1, K2, K3                                                 | Contactador                                           |

## ES 2 511 032 T3

F1, F2, F3, F4  
T1

Fusible  
Transformador

## REIVINDICACIONES

## 1. Dispositivo de alimentación de alta tensión, que comprende

- 5                   - un modulador de alta tensión (1) con una pluralidad de etapas de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) que comprenden cada una una fuente de tensión (Q) para generar una tensión continua ( $U_M$ ) así como al menos un elemento de conmutación ( $V_1, V_2; V_1', V_2'$ ) activable para proporcionar la tensión continua de forma selectiva como tensión inicial, estando al menos una parte de las etapas de conmutación ( $S_{n-1}$ ) configuradas para proporcionar la tensión inicial de forma selectiva con un signo positivo o negativo, estando las etapas de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) conectadas en serie de modo que las tensiones iniciales de las etapas de conmutación individuales se suman durante el funcionamiento, y estando aplicada la tensión de suma ( $U_A, U_P, U_D, U_B$ ) así formada en una carga formando un circuito de carga,
- 10                   - un transformador (5) con al menos un devanado primario (51) y al menos un devanado secundario (52) que está acoplado magnéticamente con el devanado primario a través de un núcleo de transformador (53), estando el devanado primario (51) dispuesto en el circuito de carga del modulador de alta tensión (1), así como
- 15                   - un dispositivo de control (7, 11, 11') para el modulador de alta tensión con el que están conectados los elementos de conmutación ( $V_1, V_2; V_1', V_2'$ ) de forma que actúan conjuntamente y que durante el funcionamiento activa los elementos de conmutación ( $V_1, V_2; V_1', V_2'$ ) de modo que el modulador de alta tensión genera en el devanado primario (51) al menos un impulso de tensión positivo ( $U_P$ ),
- 20                   **caracterizado**
- **por que** el modulador de alta tensión (1) está configurado de modo que permite un flujo de corriente a través del circuito de carga tanto en un sentido positivo como en un sentido negativo contrario al mismo, y
- 25                   - **por que** el dispositivo de control (7, 11, 11') controla durante el funcionamiento los elementos de conmutación ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ) de modo que el modulador de alta tensión emite una tensión de premagnetización negativa ( $U_M$ ) antes del impulso de tensión positivo ( $U_P$ ) para premagnetizar de forma negativa el núcleo de transformador (53).
- 30                   2. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con la reivindicación 1, estando el modulador de alta tensión (1) configurado de forma modular, al comprender cada etapa de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) un primer módulo de etapa de conmutación (M), que está configurado para emitir una tensión inicial unipolar, y en el que al menos una parte de las etapas de conmutación ( $S_{n-1}$ ) comprende un segundo módulo de etapa de conmutación (M') que está configurado para invertir de forma selectiva la tensión inicial del primer módulo de etapa de conmutación (M) asociado.
- 35                   3. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con la reivindicación 2, presentando los primeros módulos de etapa de conmutación (M) y los segundos módulos de etapa de conmutación (M') una disposición de circuito idéntica y sólo se diferencian por la existencia o la omisión de elementos eléctricos predeterminados.
- 40                   4. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, presentando cada etapa de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) un primer semipunto (A) que está conectado con la fuente de tensión (Q) y que comprende unos elementos de conmutación primero y segundo ( $V_1, V_2$ ), estando los elementos de conmutación primero y segundo conectados en serie a través de un punto de nodo común (N), estando el punto de nodo común (N) conectado de forma directa o indirecta con una primera conexión de salida (P1) de la etapa de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ), y estando los elementos de conmutación primero y segundo ( $V_1, V_2$ ) conectados con el dispositivo de control (7, 11, 11') de modo que se pueden llevar de forma controlada a un estado conductor o a un estado no conductor a través del dispositivo de control.
- 45                   5. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con la reivindicación 4, presentando al menos una parte de las etapas de conmutación ( $S_{n-1}$ ) un segundo semipunto (A') que está conectado, en paralelo al primer semipunto (A), con la fuente de tensión (Q) y que comprende unos elementos de conmutación tercero y cuarto ( $V_1', V_2'$ ), estando los elementos de conmutación tercero y cuarto ( $V_1', V_2'$ ) conectados en serie a través de un segundo punto de nodo común (N'), estando el segundo punto de nodo (N') conectado de forma directa o indirecta con una segunda conexión de salida (P1') de la etapa de conmutación ( $S_{n-1}$ ), y estando los elementos de conmutación tercero y cuarto conectados con el dispositivo de control (7, 11, 11') de modo que se pueden llevar de forma controlada a un estado conductor o a un estado no conductor a través del dispositivo de control.
- 50                   6. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, controlando el dispositivo de control (11) durante el funcionamiento los elementos de conmutación ( $V_1, V_2, V_1', V_2'$ ) de modo que el modulador de alta tensión emite una tensión de desmagnetización negativa ( $U_D$ ) tras el impulso de tensión positivo ( $U_P$ ) para desmagnetizar al menos en parte el núcleo de transformador (53).
- 60                   7. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con la reivindicación 6, correspondiéndose la suma de la integral temporal de la tensión de premagnetización ( $U_B$ ) y de la tensión de desmagnetización ( $U_D$ ), con respecto a su importe, fundamentalmente con la integral temporal del impulso de tensión ( $U_P$ ).
- 65

8. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, correspondiéndose la integral temporal de la tensión de premagnetización ( $U_B$ ), con respecto a su importe, fundamentalmente con la mitad de la integral temporal del impulso de tensión ( $U_P$ ).

9. Dispositivo de alimentación de alta tensión de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que además presenta una carga secundaria (6) que está conectada con el devanado secundario (52) y que está configurada de modo que permite un flujo de corriente fundamentalmente sólo durante el impulso de tensión positivo ( $U_P$ ).

10. Procedimiento para generar una alta tensión pulsada que comprende:

(a) proporcionar un dispositivo de alimentación de alta tensión que comprende:

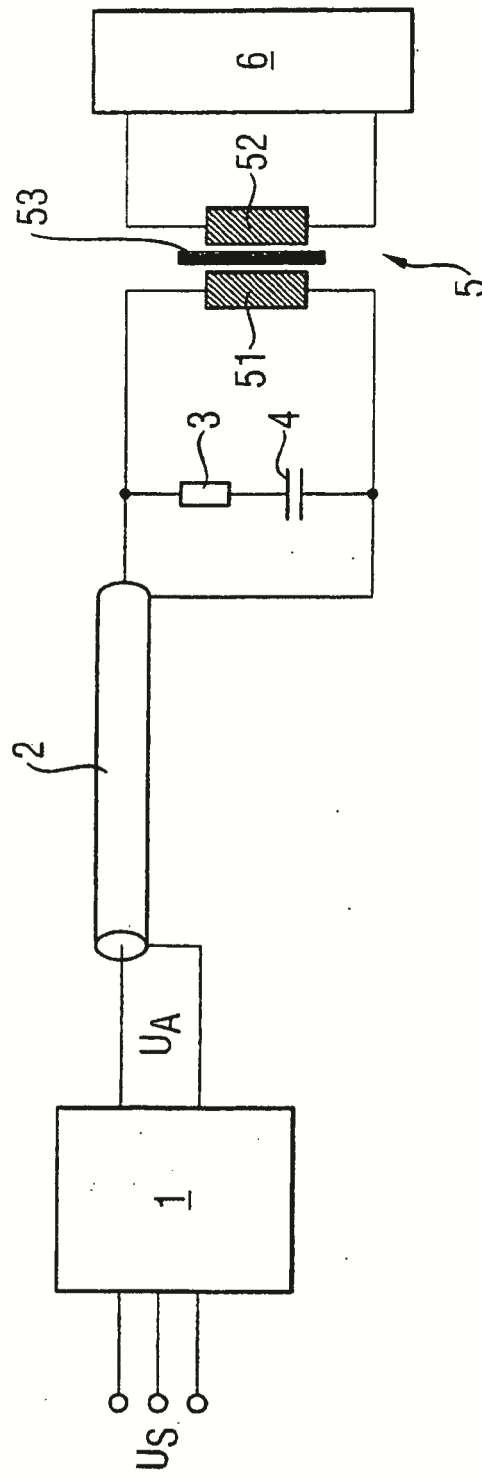
- un modulador de alta tensión (1) con una pluralidad de etapas de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) que están configuradas para proporcionar durante el funcionamiento una tensión inicial, estando al menos una parte de las etapas de conmutación ( $S_{n-1}$ ) configuradas para proporcionar opcionalmente una tensión inicial positiva o negativa, estando las etapas de conmutación ( $S_1, \dots, S_n$ ) conectadas en serie de modo que las tensiones iniciales de las etapas de conmutación individuales se suman durante el funcionamiento, estando la tensión de suma ( $U_M, U_D, U_B$ ) así formada aplicada en una carga formando un circuito de carga, y estando el modulador de alta tensión configurado de modo que permite un flujo de corriente en el circuito de carga tanto en un sentido positivo como en un sentido negativo contrario al mismo, así como
- un transformador (5) con al menos un devanado primario (51) y al menos un devanado secundario (52) que está acoplado magnéticamente con el devanado primario a través de un núcleo de transformador (53), estando el devanado primario (51) dispuesto en el circuito de carga del modulador de alta tensión (1);

(b) activar el modulador de alta tensión (1) de modo que genera una tensión de premagnetización negativa ( $U_B$ ) en el devanado primario para establecer una premagnetización negativa del núcleo de transformador (53);

(c) activar el modulador de alta tensión (1) de modo que genera un impulso de tensión positivo ( $U_P$ ) en el devanado primario tras la generación de la tensión de premagnetización.

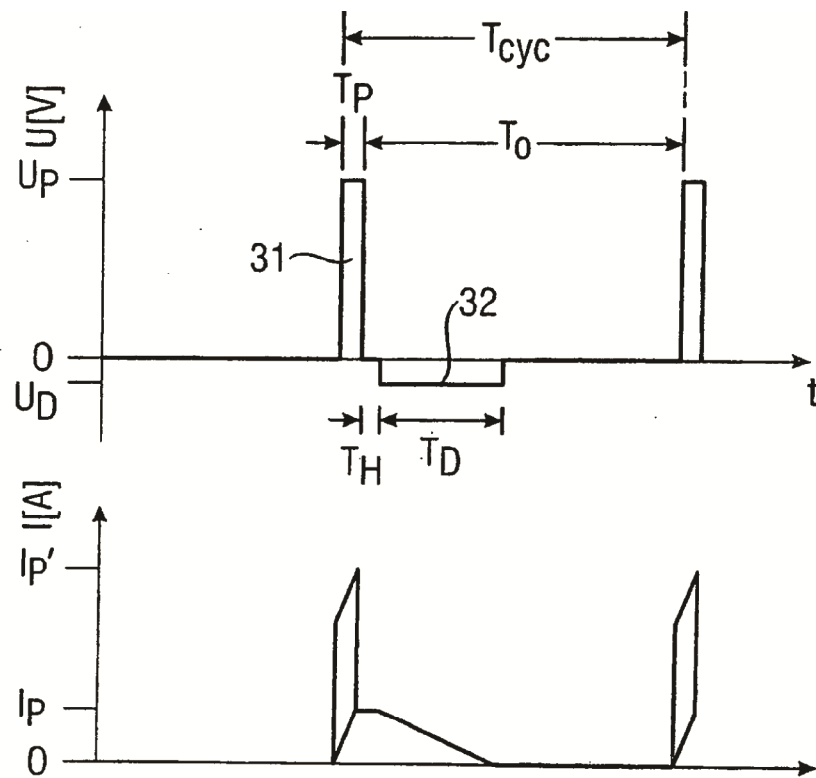
11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10 que comprende además:

(d) activar el modulador de alta tensión (1) de modo que emite en su salida una tensión de desmagnetización negativa ( $U_D$ ) tras el impulso de tensión positivo para desmagnetizar al menos en parte el núcleo de transformador.



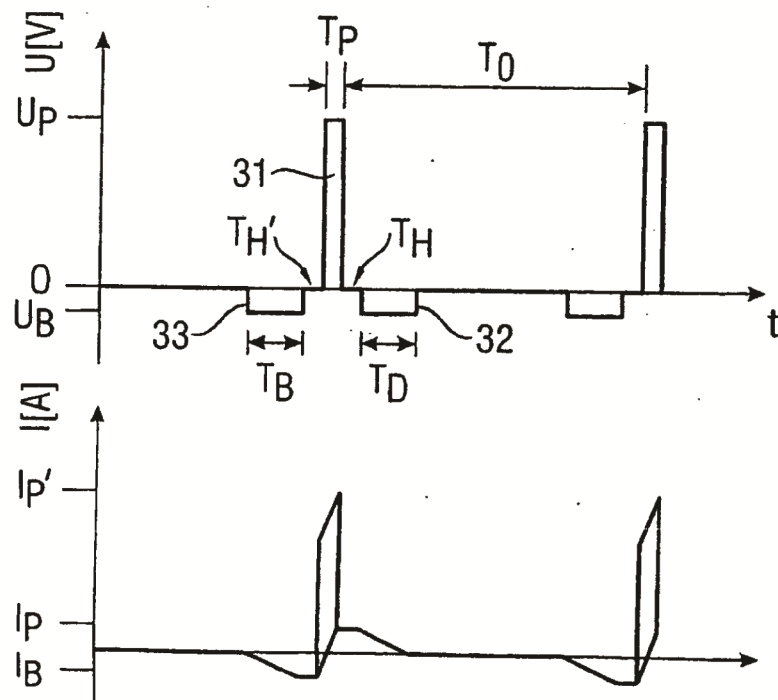
**Fig. 1**

Estado de la técnica

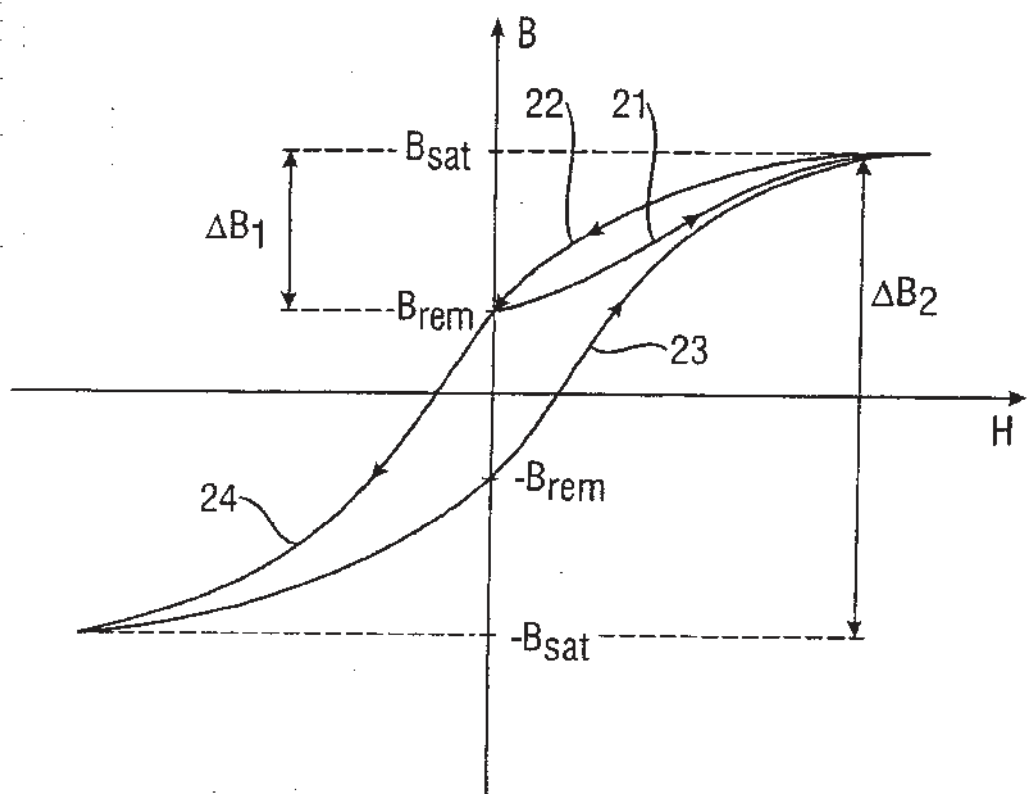


**Fig. 2**

Estado de la técnica



**Fig. 4**



**Fig. 3**

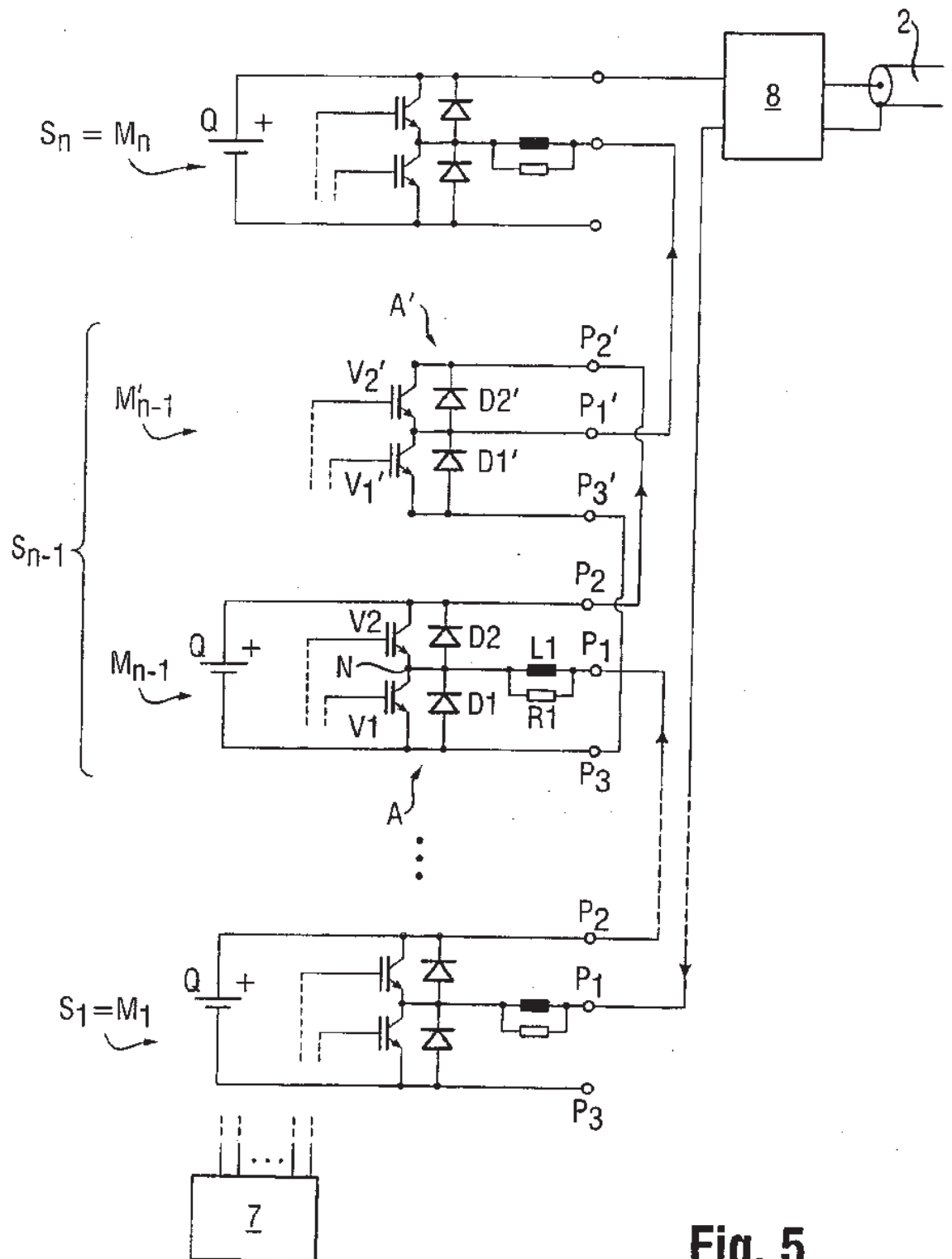
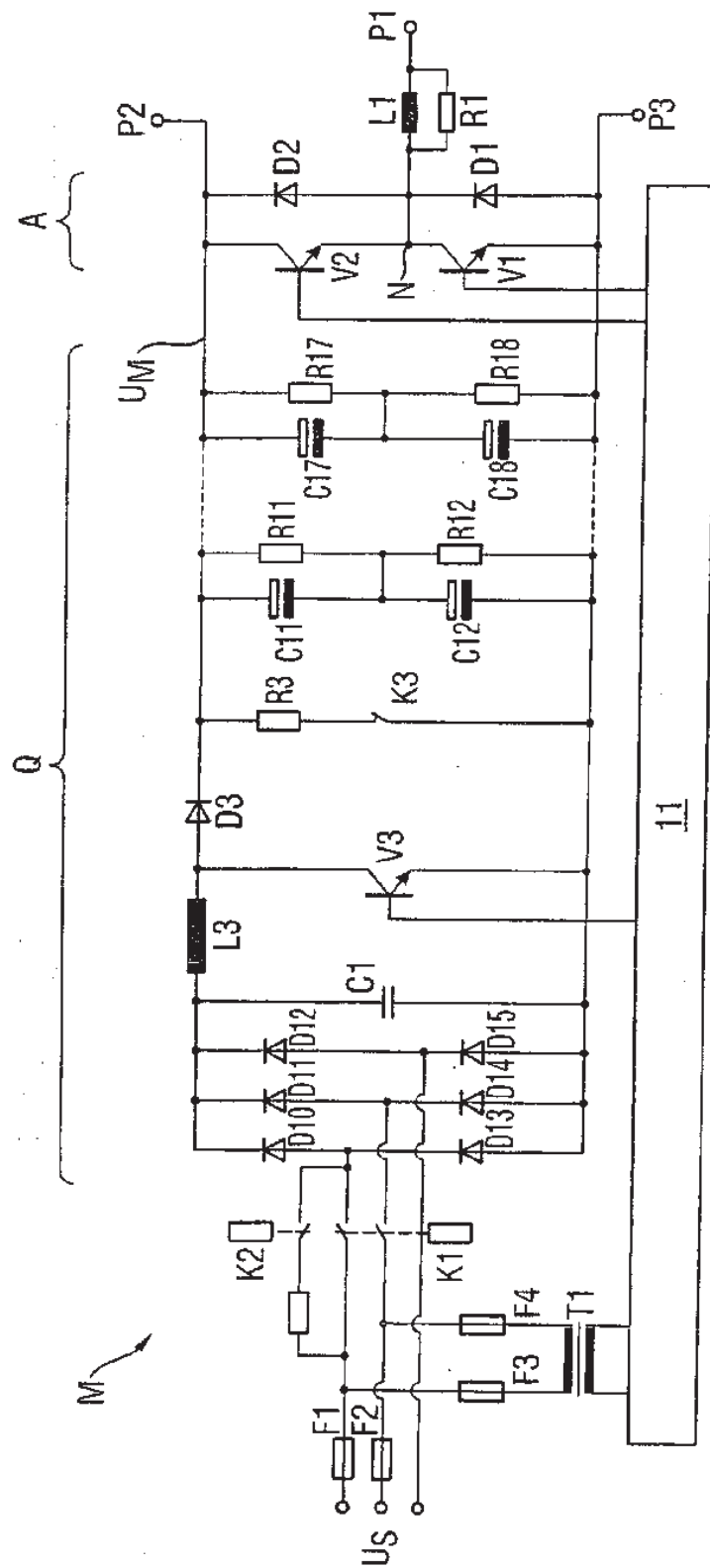


Fig. 5



**Fig. 6**

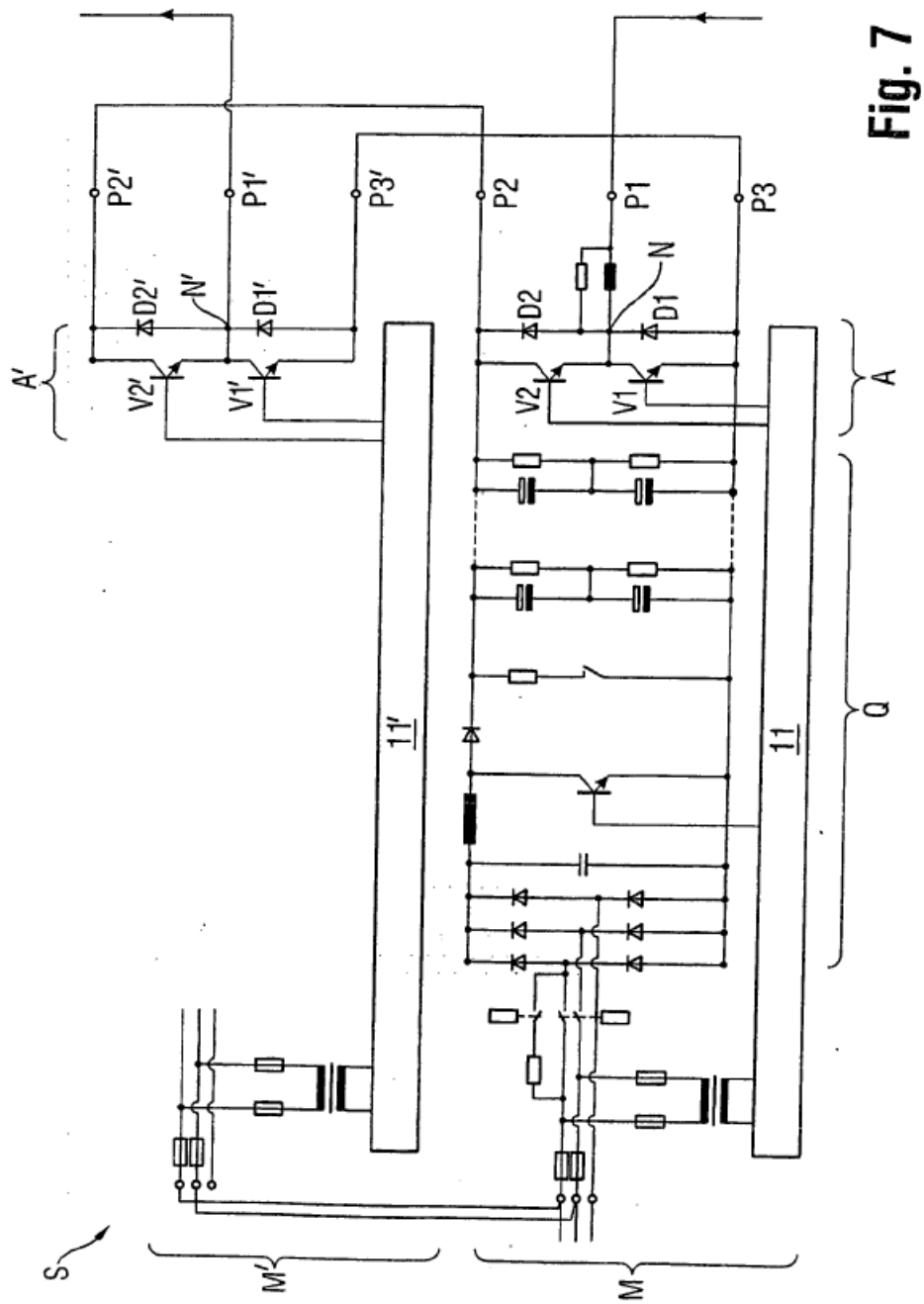


Fig. 7