

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 391 644**

51 Int. Cl.:
H02P 25/18 (2006.01)
H02K 3/28 (2006.01)
H02P 25/22 (2006.01)
H02P 27/08 (2006.01)
H02P 27/12 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06026147 .6**
96 Fecha de presentación: **18.12.2006**
97 Número de publicación de la solicitud: **1808958**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.07.2007**

54 Título: **Circuitos de excitación**

30 Prioridad:
14.01.2006 GB 0600837

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
28.11.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
28.11.2012

73 Titular/es:
CONVERTEAM UK LTD (100.0%)
BOUGHTON ROAD
RUGBY WARWICKSHIRE CV21 1BU, GB

72 Inventor/es:
LEWIS, ERIC ANTHONY

74 Agente/Representante:
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 391 644 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

Circuitos de excitación

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a circuitos de excitación, y, en particular, a circuitos de excitación para máquinas eléctricas de múltiples fases que incluyen convertidores de potencia de modulación por ancho de pulso (PWM).

Antecedentes de la técnica

Las máquinas eléctricas se han desarrollado durante muchas décadas y un ejemplo particular de tal máquina eléctrica es la así llamada máquina LCI (inversor conmutado de carga) de devanado de estátor dual, un esquema de la cual se muestra en la figura 1.

10 La máquina 2 eléctrica de la figura 1 se suministra con potencia de una fuente 4 de corriente alterna y un par de transformadores 6 y 8. Cada uno de los transformadores 6 y 8 está conectado a un convertidor de potencia por tiristor mostrados como 10 y 12 respectivamente, distribuidos para convertir la corriente alterna de los transformadores en corriente continua. A continuación, la corriente continua se suministra a través de las conexiones que tienen los inductores 14, 16, 18 y 20 hacia los convertidores 22 y 24 de potencia por tiristor, que a su vez están
15 conectados a los devanados 26 y 28 de estátor de la máquina 2 eléctrica. Se apreciará fácilmente que es deseable para el circuito de excitación tener dos rutas de excitación en paralelo separadas conectadas entre la fuente 4 de corriente alterna y la máquina 2 eléctrica ya que esto proporciona una manera de reducir la ondulación del par en la salida de la máquina 2 eléctrica. También proporciona un cierto grado de redundancia de modo que el sistema puede continuar funcionando si una de las rutas de excitación falla. Los devanados 26 y 28 de estátor usan una
20 construcción convencional que se muestra en la figura 5, que usa dos bobinas de estátor por ranura 506 de estátor y son, de este modo, devanados de dos capas. Cada bobina de estátor tiene un extremo en la parte superior de una ranura de estátor y el otro extremo en la parte inferior de una ranura de estátor diferente. Las bobinas de estátor del devanado 26 de estátor deben estar, inherentemente, en ranuras de estátor diferentes que las bobinas de estátor del devanado 28 de estátor. Prácticamente todas las máquinas eléctricas usan este tipo de construcción de devanado
25 debido a que cada bobina de estátor es idéntica y puede fabricarse fácilmente en masa mediante un equipo automático a bajo coste.

Las ventajas proporcionadas por los dispositivos de conmutación semiconductores tales como los transistores de efecto de campo (FET) y similares, significa que la tendencia actual en el diseño de los circuitos de excitación es
30 usar convertidores de potencia de modulación por ancho de pulso (PWM) en lugar de los convertidores 22 y 24 de potencia por tiristor mostrados en la figura 1. En la figura 2 se muestra una distribución equivalente a la mostrada en la figura 1, pero usando convertidores 200 y 202 de potencia de PWM. Además de reemplazar los convertidores 22 y 24 de potencia por tiristor, se han reemplazado los inductores 14, 16, 18 y 20 por los enlaces 204 y 206 de corriente continua para permitir que la corriente fluctúe como requieren las formas de onda de PWM. Se ha encontrado que
35 tratando de excitar una máquina 2 eléctrica con el circuito mostrado en la figura 2 no funciona como tal vez sería de esperar debido a la alta magnitud inesperada de armónicos de corriente de frecuencia de PWM en las corrientes que fluyen en los devanados 208 y 210 de estátor. La figura 3a muestra un ejemplo de los flujos de corriente que tal vez serían predichos. Esto debe ser contrastado con los flujos de corriente registrados actuales mostrados en la figura 3b. La alta magnitud esperada de armónicos de corriente de frecuencia de PWM es indeseable; causan pérdidas de máquina extra significativas, un calentamiento de máquina extra significativo, una reducción en la calificación de la
40 máquina, un aumento de las vibraciones mecánicas de la máquina y el aumento de las emisiones de ruido acústico audible.

Se verá que los flujos de corriente actuales mostrados en la figura 3b incluyen un alto grado de armónicos de corriente de frecuencia de PWM cuando se comparan con los flujos de corriente predichos mostrados en la figura 3a. Este grado de armónicos de corriente de frecuencia de PWM surge de la proximidad física de las bobinas de
45 estátor dentro de cada uno de los devanados de estátor.

Con el fin de superar este problema, el circuito de excitación de la máquina 2 eléctrica puede modificarse como se muestra en la figura 4 para incluir los inductores 400, 402, 404, 406, 408 y 410 entre los convertidores 200 y 202 de potencia de PWM y la máquina 2 eléctrica. El uso de los inductores 400 a 410 reduce significativamente los armónicos de corriente de frecuencia de PWM en los devanados 208 y 210 de estátor para permitir que la máquina 2
50 eléctrica funcione como se predijo. Sin embargo, en los niveles de potencia requeridos para algunas aplicaciones (propulsión de un barco, tren o similar, o para la generación de potencia, etc.) el coste de los inductores 400 a 410 puede ser alto y es probable que requieran un espacio sustancial para alojarlos.

Una forma diferente de superar este problema es tener las bobinas de estátor de ambos devanados 208 y 210 de estátor situadas en las mismas ranuras de estátor. Sin embargo, esto requeriría una construcción no convencional
55 usando cuatro bobinas de estátor por ranura. En otras palabras, los devanados 208 y 210 de estátor tendrían que ser devanados de cuatro capas. Estos son, significativamente, más difíciles, complejos y costosos de fabricar.

De este manera, es deseable ser capaz de fabricar máquinas eléctricas con unas bajas formas de onda de corriente

de frecuencia de PWM (es decir, teniendo los flujos de corriente predichos mostrados en la figura 3a) que pueden usar el circuito de excitación de la figura 2 y en la que los devanados 208 y 210 de estátor son devanados de dos capas convencionales.

5 Los documentos JP 09-182394, JP 63-305793 y JP 63-305792 desvelan todos ellos un circuito de excitación para la interconexión de un motor a una fuente de corriente continua. El circuito de excitación incluye una primera y segunda unidad de convertidores 21, 22 de potencia que están conectados en paralelo a una fuente de corriente continua. Las unidades de convertidores de potencia pueden ser de cualquier tipo adecuado y pueden funcionar de acuerdo a una estrategia de PWM. Un primer grupo de devanado U1, V1, W1 que tiene una pluralidad de bobinas de estátor está conectado a una primera unidad de convertidor 21 de potencia y un segundo grupo de devanado U2, V2, W2
10 que tiene una pluralidad de bobinas de estátor está conectado a una segunda unidad de convertidor 22 de potencia. Los grupos primero y segundo de devanado están localizados en polos diferentes entre sí y esta separación física de los grupos de devanado conduce a una reducción en el acoplamiento mutuo entre ellos.

Sumario de la invención

15 La presente invención proporciona una máquina eléctrica que tiene un estátor con una pluralidad de ranuras y un circuito de excitación para interconectar la máquina eléctrica a una red de corriente alterna, comprendiendo el circuito de excitación:

un primer y segundo rectificadores/inversores de red conectados a la red de corriente alterna en paralelo;
un primer rectificador/inversor de PWM conectado al primer rectificador/inversor de red a través de un primer enlace de corriente continua;
20 un segundo rectificador/inversor de PWM conectado al segundo rectificador/inversor de red a través de un segundo enlace de corriente continua;
un primer devanado de estátor de dos capas que tiene una pluralidad de bobinas de estátor conectadas al primer rectificador/inversor de PWM; y
un segundo devanado de estátor de dos capas que tiene una pluralidad de bobinas de estátor conectadas a la
25 segundo rectificador/inversor de PWM;
en el que cada par adyacente de ranuras acoge al menos una bobina de estátor del primer devanado de estátor y al menos una bobina de estátor del segundo devanado de estátor, el primer y segundo devanados de estátor están en proximidad física el uno del otro de tal modo que están en acoplamiento mutuo;
en el que las bobinas de estátor del primer devanado de estátor y las bobinas de estátor del segundo devanado
30 de estátor están interconectadas de tal modo que, en uso, la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor en el primer devanado de estátor es sustancialmente igual a, y está en fase con, la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor en el segundo devanado de estátor con el fin de reducir los armónicos de corriente de frecuencia de PWM que fluyen en el primer y segundo devanados de estátor; y
35 en el que el primer y segundo rectificadores/inversores de PWM proporcionan, sustancialmente, las mismas tensiones de salida y, sustancialmente, las mismas formas de onda de tensión de PWM de salida.

40 Cuando las sumas vectoriales de las tensiones a través de las bobinas de estátor del primer y segundo devanados de estátor son iguales y están en fase entonces, el primer y segundo rectificadores/inversores de PWM tendrán, esencialmente, las mismas tensiones de salida y, esencialmente, las mismas formas de onda de tensión de PWM de salida. Entonces, esto actúa para reducir o incluso eliminar los efectos del acoplamiento mutuo del primer y segundo devanados de estátor y por lo tanto reducir o incluso eliminar los armónicos de corriente de frecuencia de PWM que fluyen en el primer y segundo devanados de estátor. Esta interconexión es posible debido a que, con el uso de la tecnología de PWM, ya no es necesario proporcionar un cambio de fase entre el primer y segundo devanados de estátor para reducir la ondulación del par en la salida de la máquina eléctrica.

45 Una de las principales ventajas de la interconexión de las bobinas de estátor del primer y segundo devanados de estátor de dos capas para reducir los armónicos de corriente de frecuencia de PWM es que los inductores mostrados en la figura 4 ya no son necesarios. Esto simplifica la estructura del circuito de excitación y conduce a reducciones significativas en coste y tamaño físico. Se apreciará fácilmente que las bobinas de estátor pueden interconectarse usando cualquier distribución adecuada que resulte en la suma vectorial de tensiones a través de las
50 bobinas de estátor en el primer y segundo devanados de estátor siendo sustancialmente iguales, pero los ejemplos específicos se exponen a continuación con más detalle.

Otra ventaja de la presente invención es que conserva el bajo coste tradicional de la fabricación del devanado de estátor de dos capas.

55 Se apreciará fácilmente que el primer y segundo rectificadores/inversores de red (es decir, el primer y segundo rectificadores/inversores conectados entre la red de corriente alterna y los enlaces de corriente continua) pueden tener una amplia variedad de configuraciones diferentes. Por ejemplo, el primer y segundo rectificadores/inversores de red pueden usar diodos de rectificación sólo para suministrar potencia a los enlaces de corriente continua sin controlar las tensiones de enlace de corriente continua. Si se usan los tiristores en lugar de los diodos entonces pueden controlarse las tensiones de enlace de corriente continua. Colocando los tiristores en no activación el primer

5 y segundo rectificadores/inversores funcionan tanto en modo rectificador como en modo inversor. En este caso, pueden usarse el primer y segundo rectificadores/inversores de red para suministrar potencia a los enlaces de corriente continua o exportar potencia desde los enlaces de corriente continua y también controlar las tensiones de enlace de corriente continua. También, el primer y segundo rectificadores/inversores de red pueden ser rectificadores/inversores de PWM tal como se define a continuación.

10 El término "rectificador/inversor de PWM" se usa en el presente documento para referirse a cualquier convertidor de potencia que incluya una pluralidad de dispositivos de conmutación de potencia semiconductores que se controlen usando señales de control de excitación de puerta obtenidas de acuerdo con una estrategia de modulación por ancho de pulso (PWM) convencional. Un ejemplo podría ser un convertidor de potencia MV3000, que es un inversor de PWM de dos niveles que usa diodos para la etapa de rectificador/inversor de red y transistores bipolares de puerta aislados (IGBT) para la etapa de rectificador/inversor de PWM. Otro ejemplo podría ser un convertidor de potencia MV7000, que es un inversor AFE-PWM de tres niveles que usa transistores bipolares de puerta mejorados de emisor aislados (IEGTs) tanto para la etapa de rectificador/inversor de red como para la etapa de rectificador/inversor de PWM. Ambos productos se suministran por Convertteam Ltd de Boughton Road, Rugby, Warwickshire, CV21 1BU, Reino Unido.

En el caso en el que la máquina eléctrica tenga una configuración mínima de 6 ranuras por polo y sin rutas paralelas, entonces, las bobinas de estátor del primer devanado de estátor pueden estar interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

20 la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (X+1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión, y en la que X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte. X puede tener un valor de 1, 3 o 5.

Las bobinas de estátor del segundo devanado de estátor pueden estar interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

25 la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (Y-1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión, y en la que Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte. Y puede tener un valor de 2, 4 o 6.

30 N puede ser cualquier número entero impar y S puede ser cualquier número entero par dependiendo de la distribución específica de la máquina eléctrica y sus propiedades deseadas.

Un conjunto similar de ecuaciones pueden aplicarse si los polos norte y sur de la máquina eléctrica tienen un orden inverso.

Por ejemplo, las bobinas de estátor para una máquina eléctrica de dos polos con 6 ranuras por polo pueden estar conectadas como sigue:

35 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 1 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 2;
 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 3 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 4;
 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 5 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 6;
 40 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 2 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 1;
 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 4 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 3; y
 45 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 6 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 4.

Se apreciará fácilmente que el ejemplo anterior puede extenderse fácilmente a máquinas eléctricas con más de dos polos, con los polos norte y sur conectados en orden inverso, con devanados de estátor conectados en orden inverso o con conjuntos de conexiones en serie y/o en paralelo.

50 En el caso en que la máquina eléctrica tenga más de 6 bobinas de estátor por polo, entonces las bobinas de estátor del primer devanado de estátor pueden estar interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

55 la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura (X+Q-1)) que a continuación se conecta a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (X+Q)), esta bobina de estátor se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura (X+2Q-1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión de la misma ruta paralela, en la que Q es el número de ranuras de estátor usadas

ES 2 391 644 T3

por polo y por fase, y en la que X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte. X puede tener los valores enteros de 1, $2Q+1$ o $4Q+1$.

Las bobinas de estátor del segundo devanado de estátor pueden estar interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

- 5 la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura $(Y+Q-1)$) que a continuación se conectan a las bobinas de estátor en (polo S, ranura $(Y-Q)$), esta bobina de estátor se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura $(Y-1)$), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión de la misma ruta paralela, en la que Q es el número de ranuras de estátor usadas por polo y por fase, y en la que Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte. Y puede tener los valores enteros de $Q+1$, $3Q+1$ o $5Q+1$.

N puede ser cualquier número entero impar, S puede ser cualquier número entero par y Q puede ser cualquier número entero dependiendo de la distribución específica de la máquina eléctrica y sus propiedades deseadas.

- 15 Por ejemplo, las bobinas de estátor para una máquina eléctrica de dos polos con 12 ranuras por polo pueden estar conectadas como sigue:

- primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 1 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 2;
primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 2 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 3;
20 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, ranura 3 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 4;
primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 5 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 6;
primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 6 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 7;
25 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, la ranura 7 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 8;
primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 9 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 10;
30 primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 10 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 11;
primer devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, la ranura 11 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 12;
segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 3 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 4;
35 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 4 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 1;
segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, ranura 1 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 2;
40 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 7 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 8;
segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 8 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 5;
segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, la ranura 5 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 6;
45 segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 11 está conectada a la bobina de estátor en el polo norte, ranura 12;
segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo norte, la ranura 12 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 9; y
50 Segundo devanado de estátor: la bobina de estátor en el polo sur, la ranura 9 está conectada a la bobina de estátor en el polo sur, ranura 10.

Se apreciará fácilmente que el ejemplo anterior puede extenderse fácilmente a las máquinas eléctricas con más de dos polos, con los polos norte y sur conectados en orden inverso, con devanados de estátor conectados en orden inverso o con conjuntos de conexiones en serie y/o en paralelo.

- 55 La máquina eléctrica puede funcionar como un motor (en cuyo caso la red de corriente alterna actúa como un suministro de corriente alterna, el primer y segundo rectificadores/inversores actúan como rectificadores para suministrar corriente continua a los enlaces de corriente continua y el primer y segundo rectificadores/inversores de PWM actúan como inversores de corriente alterna para suministrar corriente al primer y segundo devanados de estátor, respectivamente) o como un generador (en cuyo caso el primer y segundo rectificadores/inversores de PWM

actúan como rectificadores para suministrar corriente continua a los enlaces de corriente continua y el primer y segundo rectificadores/inversores de red actúan como inversores para suministrar corriente alterna a la red de corriente alterna).

- 5 El circuito de excitación puede usarse por una máquina eléctrica que tenga cualquier número de fases (cada fase teniendo dos o más devanados de estátor de dos capas), cualquier número de polos y con cualquier número de ranuras por polo que permitan implementarse a las conexiones de devanado descritas anteriormente.

Dibujos

- 10 la figura 1 es un diagrama esquemático de un primer circuito de excitación de la técnica anterior de una máquina eléctrica LCI de devanado de estátor dual, en el que el circuito de excitación incluye convertidores de potencia por tiristor;
- la figura 2 es un diagrama esquemático de un segundo circuito de excitación de la técnica anterior de una máquina eléctrica de devanado de estátor dual, en el que el circuito de excitación incluye convertidores de potencia por tiristor y convertidores de potencia de PWM;
- 15 las figuras 3a y 3b muestran formas de onda de corriente de la máquina eléctrica de la figura 2;
- la figura 4 es un diagrama esquemático de un tercer circuito de excitación de la técnica anterior de una máquina eléctrica de devanado de estátor dual, en el que el circuito de excitación incluye inductores entre los convertidores de potencia de PWM y los devanados de estátor de la máquina eléctrica para reducir los armónicos de corriente de frecuencia de PWM;
- 20 la figura 5 es un diagrama esquemático con el propósito de explicar la terminología usada para describir los devanados de estátor de una máquina eléctrica;
- la figura 6 es un diagrama esquemático que muestra cómo el devanado de estátor de la figura 5 puede estar interconectado a una máquina eléctrica con un devanado de estátor que comprende tres fases;
- la figura 7 es un diagrama esquemático que muestra cómo los dos devanados de estátor están interconectados al primer circuito de excitación de la técnica anterior de la figura 1;
- 25 la figura 8 es un diagrama esquemático que muestra los primeros devanados de estátor interconectados usados en un circuito de excitación de la presente invención;
- las figuras 9a y 9b muestran los vectores de tensión resultantes de la corriente que fluye a través del devanado de estátor interconectado de la figura 8; y
- 30 la figura 10 es un diagrama esquemático que muestra los segundos devanados de estátor interconectados usados en un circuito de excitación de la presente invención en el que la máquina eléctrica tiene cuatro polos y $Q=2$ ranuras por polo y por fase más dos rutas paralelas.

- 35 La figura 5 muestra una distribución típica para el devanado de estátor de una máquina 500 eléctrica que tiene un rotor 502 y un estátor 504 (se muestran sólo partes de los mismos). El estátor 504 tiene una serie de ranuras 506 y 508 para acoger las bobinas 510 y 512 de estátor de un devanado de estátor. Una bobina de estátor típica (por ejemplo, la bobina 512 de estátor) abarca varias ranuras. Más particularmente, la bobina 512 de estátor se inicia en la ranura 506 y termina en la ranura 508 cruzando cuatro ranuras entre las mismas. También una bobina de estátor tiene típicamente un extremo en una región inferior de una ranura (como se muestra en la ranura 506) y el otro extremo en una región superior de una ranura (como se muestra en la ranura 508).

- 40 Una distribución común es instalar dos bobinas de estátor en cada ranura. Tal distribución se denomina habitualmente como un devanado de estátor de dos capas ya que hay dos bobinas de estátor dentro de cada ranura.

- Como se muestra en la figura 5, cada uno de los polos del rotor cubre seis ranuras en el estátor 504 y tal distribución se denomina habitualmente como un estátor de seis ranuras por polo. En otras realizaciones pueden ser cualquier otro número de ranuras por polo.

- 45 En una máquina eléctrica trifásica hay típicamente $3N$ ranuras por polo, en la que N es un número entero. En términos más generales, el número de ranuras por polo es, normalmente, un número entero de múltiplos del número de fases de la máquina eléctrica.

- 50 La figura 5 también ilustra la convención aceptada generalmente para nombrar o identificar las bobinas de estátor de un devanado de estátor. El devanado de estátor mostrado en la figura 5 es un devanado de estátor trifásico y tiene dos bobinas de estátor por ranura y por fase (es decir, el estátor 504 de la máquina eléctrica es un estátor de seis ranuras por polo como se discutió anteriormente). Observando las primeras bobinas de estátor de fase (mostradas en un color más oscuro en la figura 5), entonces la primera bobina 514 de estátor de fase se denomina como la bobina de estátor en el polo 1, ranura 1. La primera bobina 516 de estátor de fase se denomina como la bobina de estátor en el polo 1, ranura 2. La primera bobina 518 de estátor de fase se denomina como la bobina de estátor en el polo 2, ranura 1. La primera bobina 520 de estátor de fase se denomina como la bobina de estátor en el polo 2, ranura 2. Los devanados de estátor para las fases segunda y tercera (mostrados en un color más claro en la figura 5) tienen un conjunto similar de bobinas de estátor.

Se apreciará fácilmente que las bobinas de estátor individuales pueden estar conectadas en una variedad de

maneras diferentes; serie, paralelo o una combinación de serie y paralelo. Cada distribución de conexión proporciona a la máquina eléctrica con conocidas capacidades de carga de tensión y corriente y por lo tanto características de rendimiento. De este modo, la interconexión de las bobinas de estátor de cada devanado de estátor se selecciona para dar a la máquina eléctrica las propiedades deseadas.

5 Una interconexión típica de bobinas de estátor se muestra esquemáticamente en la figura 6. Se verá que en esta distribución particular de las bobinas de estátor de cada fase están conectadas entre sí en serie. En otras palabras, los devanados 600, 602 y 604 de estátor están asociados con cada fase de la máquina eléctrica, cada uno contiene una pluralidad de bobinas de estátor en serie unas con otras. Si cualquiera de las bobinas de estátor fueran a estar conectadas entre sí en paralelo entonces podrían estar conectadas con las conexiones 900 y 902 mostradas en las
10 figuras 6, 7 y 8.

El devanado 600 de estátor representa el devanado de estátor para la primera fase e incluye las bobinas de estátor en el polo 1, ranura 1 (es decir, la bobina 514 de estátor); polo 1, ranura 2 (es decir, la bobina 516 de estátor); polo 2, ranura 1 (es decir, la bobina 518 de estátor), y polo 2, ranura 2 (es decir, la bobina 520 de estátor). Esto se repite para las N bobinas de estátor en una secuencia similar. El devanado 602 de estátor representa el devanado de
15 estátor para la segunda fase e incluye las bobinas de estátor en el polo 1, ranura 3 (es decir, la bobina 510 de estátor); polo 1, ranura 4 (es decir, la bobina 512 de estátor); polo 2, ranura 3, y polo 2, ranura 4. Esto se repite para las N bobinas de estátor en una secuencia similar. El devanado 604 de estátor representa el devanado de estátor para la tercera fase e incluye las bobinas de estátor en el polo 1, ranura 5; polo 1, ranura 6; polo 2, ranura 5; y polo 2, ranura 6. Esto se repite para las N bobinas de estátor en una secuencia similar.

20 Para que la máquina 500 eléctrica funcione correctamente, las bobinas de estátor para un par de polos norte y sur están conectadas de tal modo que las tensiones inducidas en ellas se suman; se apreciará fácilmente que las tensiones inducidas serán de naturaleza opuesta. En la figura 6, la posición de los puntos más próximos a cada una de las bobinas de estátor refleja esta conexión con la inversión de la conexión de los polos norte y sur.

La máquina eléctrica de la figura 1 es una máquina LCI (inversor conmutado de carga) de devanado de estátor dual que tiene un primer y segundo devanados 26 y 28 de estátor. Tal máquina eléctrica tiene dos devanados de estátor separados y la interconexión de las bobinas de estátor en cada devanado de estátor se muestra esquemáticamente en la figura 7. Las bobinas de estátor del primer devanado 26 de estátor están desplazadas físicamente de las bobinas de estátor del segundo devanado 28 de estátor y esto ayuda a asegurarse de que las fuerzas generadas por el estátor en el rotor se distribuyen uniformemente alrededor de la circunferencia del estátor.

30 Para cualquier máquina eléctrica es normal definir un ángulo eléctrico, en el estátor y en el rotor, de un par de polos norte y sur, que es igual a 360 grados eléctricos. Este no es el mismo que el ángulo físico ocupado por el mismo par de polos norte y sur que dependerá del número de polos del estátor.

Como un ejemplo de diseño del estátor, puede haber 12 bobinas de estátor en cada devanado de estátor. Para un par de polos norte y sur, el ángulo eléctrico entre las bobinas de estátor adyacentes se denomina ángulo de
35 diferencia, que en este ejemplo es igual a $360/12 = 30$ grados eléctricos. Con el fin de que tal estátor (es decir, que tiene los devanados de estátor, como se muestran en la figura 7) funcione correctamente, las tensiones y corrientes en el convertidor 22 de potencia por tiristor deberían compensarse mediante el mismo ángulo de diferencia que las tensiones y corrientes en el convertidor 24 de potencia por tiristor. El uso de este ángulo de diferencia puede proporcionar beneficio adicional ayudando a cancelar los armónicos de par en los devanados de estátor.

40 El circuito de excitación alternativo mostrado en la figura 2 (es decir, cuando los convertidores 22 y 24 de potencia por tiristor se sustituyen por convertidores 200 y 202 de potencia de modulación por ancho de pulso (PWM)) padece de armónicos de corriente de frecuencia de PWM significativos debido a la proximidad de las bobinas de estátor dentro del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor. Por ejemplo, puede ser el caso de que la bobina de estátor en el polo 1, ranura 1 del primer devanado 208 de estátor esté en proximidad física con la bobina de estátor
45 en el polo 1, ranura 2 del segundo devanado 210 de estátor. Esto significaría que hay un alto grado de acoplamiento mutuo entre estas dos bobinas de estátor, y puede producirse una acción de transformador con una corriente que se induce en una de las bobinas de estátor cuando una corriente fluye a través de la otra. Es este acoplamiento mutuo entre las bobinas de estátor del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor el que conduce a los armónicos de corriente de frecuencia de PWM significativos.

50 En la figura 4 se muestra una solución al problema de los armónicos de corriente de frecuencia de PWM y a lo discutido anteriormente. Sin embargo, se explicará a continuación una solución alternativa basada en la interconexión de las bobinas de estátor individuales del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor del circuito de excitación de la figura 2 con referencia a las figuras 8 a 10.

La figura 8 muestra cómo las bobinas de estátor en el primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor pueden estar interconectadas y usarse en un circuito de excitación de la presente invención. Se verá que la interconexión de las bobinas de estátor del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor es diferente a la que se muestra en la figura 7, y es importante observar que el patrón de interconexión de las bobinas de estátor del primer devanado 208 de estátor es diferente al patrón de interconexión de las bobinas de estátor del segundo devanado 210 de estátor.

ES 2 391 644 T3

La interconexión de las bobinas de estátor del primer devanado 208 de estátor puede resumirse mediante la fórmula siguiente que se aplica para una máquina eléctrica con la configuración mínima de 6 ranuras por polo y sin rutas paralelas:

la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura $(X+1)$),

5 en la que:

N es el número de cualquier polo norte, y puede ser cualquier número entero impar,
S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión, y
será un número entero par, y

10 X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte, y puede tener los valores enteros de 1, 3 y 5.

La interconexión de las bobinas de estátor del primer devanado 210 de estátor puede resumirse mediante la fórmula siguiente que se aplica para una máquina eléctrica con la configuración mínima de 6 ranuras por polo y sin rutas paralelas:

la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura $(Y-1)$),

15 en la que:

Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte, y puede tener los valores enteros de 2, 4 y 6.

20 En el caso de ambas interconexiones de devanado de estátor, la numeración permite la conexión inversa de la bobina en los polos norte frente a los polos sur. Se aplicaría un conjunto similar de ecuaciones si los polos norte y sur tuviesen un orden inverso.

Cuando la máquina eléctrica tiene más de 6 ranuras por polo y/o se usan rutas paralelas de las bobinas de estátor, entonces son posibles una amplia gama de patrones de interconexión. Se muestra un ejemplo de un patrón de interconexión posible en la figura 10 para una máquina eléctrica que tiene 4 polos, Q ranuras por polo y por fase y dos rutas paralelas. Esto da un total 6Q ranuras por polo.

25 Para el patrón de interconexión de la figura 10 con $Q=2$ o para patrones de interconexión con otros valores de Q, la interconexión de las bobinas de estátor en el primer devanado 208 de estátor puede resumirse mediante la fórmula siguiente:

30 la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura $(X+Q-1)$) que a continuación se conecta a las bobinas de estátor en (polo S, ranura $(X+Q)$), esta bobina se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura $(X+2Q-1)$),

en la que:

N es el número de cualquier polo norte, y puede ser cualquier número entero impar,
S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión de la misma ruta paralela, y será un número entero par,

35 Q es el número de ranuras de estátor usadas por polo y por fase, y será cualquier número entero, y
X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte, y puede tener los valores enteros de 1, $2Q+1$ y $4Q+1$.

La interconexión de las bobinas de estátor en el segundo devanado 210 de estátor puede resumirse mediante la fórmula siguiente:

40 la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura $(Y+Q-1)$) que a continuación se conecta a las bobinas de estátor en (polo S, ranura $(Y-Q)$), esta bobina se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura $(Y-1)$),

en la que:

45 Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte, y puede tener los valores enteros de $Q+1$, $3Q+1$ y $5Q+1$.

En el caso de ambas interconexiones de devanado de estátor, la numeración permite la conexión inversa de la bobina en los polos norte frente a los polos sur. Un conjunto similar de ecuaciones se aplicaría si los polos norte y sur tuviesen un orden inverso.

50 Una ventaja de la interconexión de las bobinas de estátor del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor de esta manera es que las tensiones que fluyen en las bobinas de estátor vecinas alrededor del estátor están obligadas

a ser, sustancialmente, las mismas en cualquier punto en el tiempo. Esto significa que no hay diferencia de tensión entre las bobinas de estátor del primer y segundo devanados de estátor que están en proximidad física las unas de las otras y no se produce la acción de transformador. No se inducen corrientes y los armónicos de corriente de frecuencia de PWM se reducen correspondientemente.

- 5 Esto elimina la necesidad de los inductores 400 a 410 de la figura 4, lo que simplifica el circuito de excitación general y conserva el uso de un devanado de dos capas.

La ventaja del circuito de excitación de la presente invención sobre el circuito de excitación de la figura 4 puede explicarse además considerando la suma vectorial de las tensiones que fluyen en las bobinas de estátor del primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor.

- 10 Los vectores de tensión mostrados en la figura 9a para el primer y segundo devanados 208 y 210 de estátor se resumen en la siguiente tabla:

Posición vectorial (Grados eléctricos)	Bobina de estátor
0	Primer devanado 208 de estátor (polo 1, ranura 1)
30	Segundo devanado 210 de estátor (polo 1, ranura 2)
60	Primer devanado 208 de estátor (polo 1, ranura 3)
90	Segundo devanado 210 de estátor (polo 1, ranura 4)
120	Primer devanado 208 de estátor (polo 1, ranura 5)
150	Segundo devanado 210 de estátor (polo 1, ranura 6)
180	Segundo devanado 210 de estátor (polo 2, ranura 1)
210	Primer devanado 208 de estátor (polo 2, ranura 2)
240	Segundo devanado 210 de estátor (polo 2, ranura 3)
270	Primer devanado 208 de estátor (polo 2, ranura 4)
300	Segundo devanado 210 de estátor (polo 2, ranura 5)
330	Primer devanado 208 de estátor (polo 2, ranura 6)

- 15 Haciendo referencia a la figura 9b, puede verse que la suma vectorial de las tensiones a través de la bobina de estátor en el polo 1, ranura 2 y en la bobina de estátor en el polo 2, ranura 2 del primer devanado 208 de estátor es la misma que la suma vectorial de las tensiones a través de la bobina de estátor en el polo 1, ranura 2 y en la bobina de estátor en el polo 2, ranura 1 del segundo devanado 210 de estátor.

- 20 Se apreciará fácilmente desde la posición de los puntos en la figura 8 que algunas de las bobinas de estátor han tenido su polaridad invertida y esto se refleja en la forma en que están conectadas para dar la suma vectorial de la figura 9a. La suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor del primer devanado 208 de estátor es, sustancialmente, igual a la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor de cada uno de los otros devanados de estátor. Esto permite a las tres tensiones de fase y a las corrientes estar en la fase de tiempo.

- 25 Las ranuras a las que se hace referencia en la figura 9a están en proximidad física la una de la otra de tal modo que si las tensiones a través de las bobinas de estátor fueran diferentes entonces las corrientes se inducirían y darían lugar a los problemas de armónicos de corriente de frecuencia PWM. Sin embargo, se verá desde la suma vectorial de la figura 9a que las tensiones a través de estas bobinas de estátor son sustancialmente las mismas y no se produce la acción de transformador.

- 30 La figura 9B muestra cómo la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor en los primeros devanados de estátor de cada fase tendría sumas vectoriales iguales a las tensiones a través de las bobinas de estátor en el segundo devanado de estátor de cada fase. En otras palabras, para una máquina eléctrica trifásica (en la que cada fase puede denominarse como "roja", " amarilla " y "azul") entonces el equilibrio de tensiones existiría mediante el primer y segundo devanados de estátor de la fase "roja", el primer y segundo devanados de estátor de la fase "amarilla" y el primer y segundo devanados de estátor de la fase "azul".

La interconexión de las bobinas de estátor puede aplicarse a cualquier número de fases y a situaciones en las que cada fase incluye más de dos devanados de estátor. En el caso en el que el estátor tiene más de dos devanados de estátor entonces las bobinas de estátor se interconectarían de tal modo que las sumas vectoriales de las tensiones a través de las bobinas de estátor dentro de cada uno de los devanados de estátor serían sustancialmente iguales.

REIVINDICACIONES

1. Una máquina eléctrica que tiene un estátor con una pluralidad de ranuras y un circuito de excitación para la interconexión de la máquina eléctrica a una red de corriente alterna, comprendiendo el circuito de excitación:

5 un primer y segundo rectificadores/inversores de red conectados a la red de corriente alterna en paralelo;
 un primer rectificador/inversor (200) de PWM conectado al primer rectificador/inversor (10) de red a través de un primer enlace (204) de corriente continua;
 un segundo rectificador/inversor (202) de PWM conectado al segundo rectificador/inversor (12) de red a través de un segundo enlace (206) de corriente continua;
 10 un primer devanado (208) de estátor de dos capas que tiene una pluralidad de bobinas de estátor conectadas al primer rectificador/inversor (200) de PWM; y
 un segundo devanado (210) de estátor de dos capas que tiene una pluralidad de bobinas de estátor conectadas al segundo rectificador/inversor (202) de PWM;
 en la que cada par adyacente de ranuras acoge al menos una bobina de estátor del primer devanado (208) de estátor y al menos una bobina de estátor del segundo devanado (210) de estátor, estando el primer y el
 15 segundo devanados (208, 210) de estátor en proximidad física el uno del otro, de tal modo que están en acoplamiento mutuo;
 en la que las bobinas de estátor del primer devanado (208) de estátor y las bobinas de estátor del segundo devanado (210) de estátor están interconectadas de tal modo que, en uso, la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor en el primer devanado (208) de estátor es sustancialmente igual a, y está en fase con, la suma vectorial de las tensiones a través de las bobinas de estátor en el segundo devanado (210) de estátor con el fin de reducir los armónicos de corriente de frecuencia de PWM que fluyen en el primer y
 20 segundo devanados (208, 210) de estátor; y
 en la que el primer y segundo rectificador/inversor (200, 202) de PWM proporcionan sustancialmente las mismas tensiones de salida y sustancialmente las mismas formas de onda de tensión de PWM de salida.

25 2. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 1, en la que las bobinas de estátor del primer devanado (208) de estátor están interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (X+1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión, y en la que X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte.
 30

3. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 2, en la que X tiene un valor de 1, 3 o 5.

4. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 2 o la reivindicación 3, en la que las bobinas de estátor del segundo devanado (210) de estátor están interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (Y-1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión, y en la que Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte.
 35

5. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 4, en la que Y tiene un valor de 2, 4 o 6.

6. Una máquina eléctrica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en la que N es cualquier número entero impar.
 40

7. Una máquina eléctrica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, en la que S es cualquier número entero par.

8. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 1, en la que las bobinas de estátor del primer devanado (208) de estátor están interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

la bobina de estátor en (polo N, ranura X) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura (X+Q-1)) que a continuación se conecta a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (X+Q)), esta bobina de estátor se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura (X+2Q-1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión de la misma ruta paralela, en la que Q es el número de ranuras de estátor usadas por polo y por fase, y en la que X es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte.
 45
 50

9. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 8, en la que X tiene los valores enteros de 1, 2Q+1 o 4Q+1.

10. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 8 o la reivindicación 9, en la que las bobinas de estátor

del segundo devanado (210) de estátor están interconectadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

- 5 la bobina de estátor en (polo N, ranura Y) está conectada a las bobinas de estátor en serie hasta (polo N, ranura (Y+Q-1)) que a continuación se conecta a las bobinas de estátor en (polo S, ranura (Y-Q)), esta bobina de estátor se conecta a continuación a las bobinas de estátor en serie hasta (polo S, ranura (Y-1)), en la que N es el número de cualquier polo norte, en la que S es el número del siguiente polo sur después del polo N en la secuencia de conexión de la misma ruta paralela, en la que Q es el número de ranuras de estátor usadas por polo y por fase, y en la que Y es el número de secuencia de conexión de la primera bobina de estátor dentro de un conjunto determinado dentro del polo norte.
- 10 11. Una máquina eléctrica de acuerdo con la reivindicación 10, en la que Y tiene los valores enteros de Q+1, 3Q+1 o 5Q+1.
12. Una máquina eléctrica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, en la que N es cualquier número entero impar.
13. Una máquina eléctrica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 12, en la que S es cualquier número entero par.
- 15 14. Una máquina eléctrica de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 13, en la que Q es cualquier número entero.

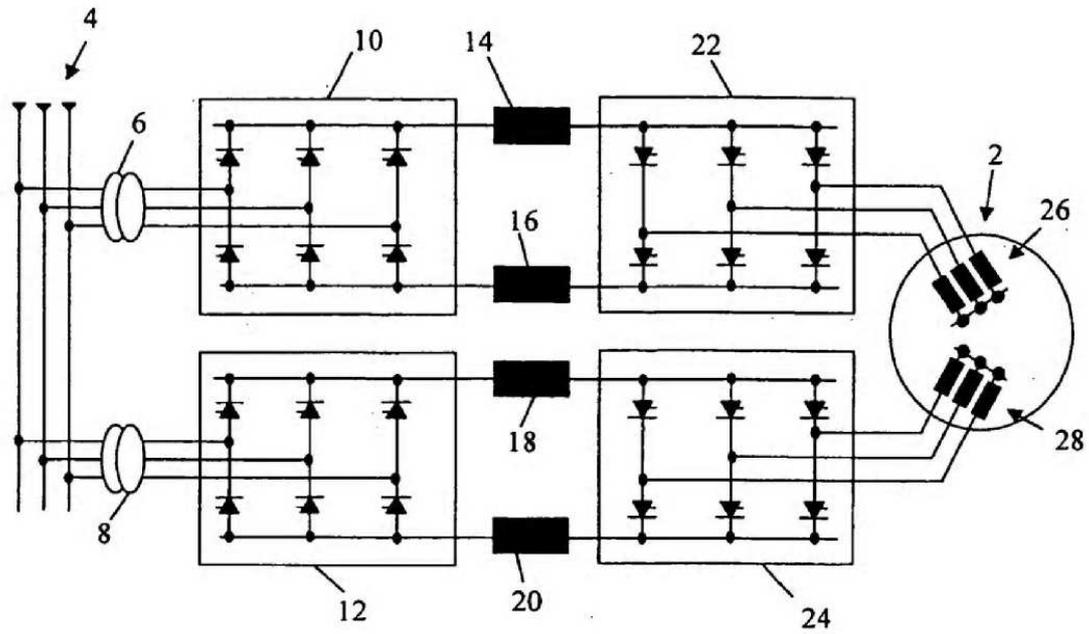


Figura 1

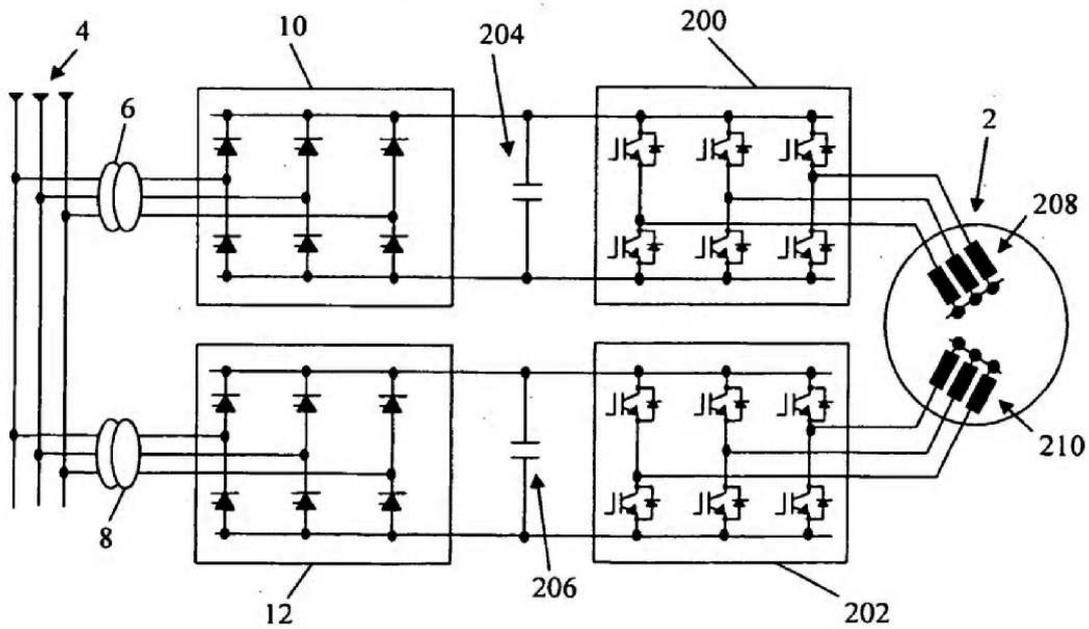


Figura 2

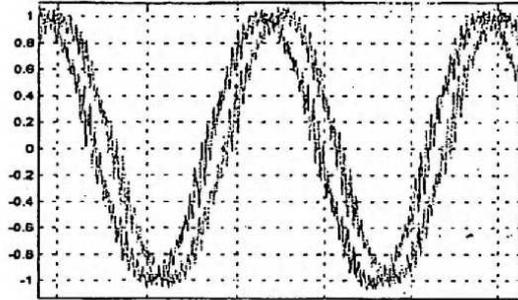


Figura 3a

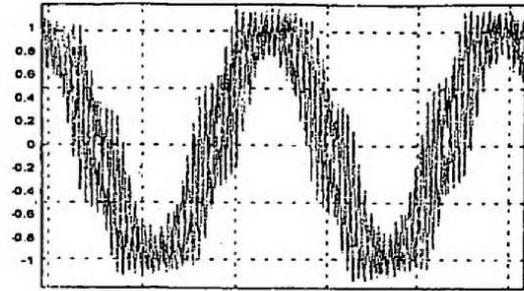


Figura 3b

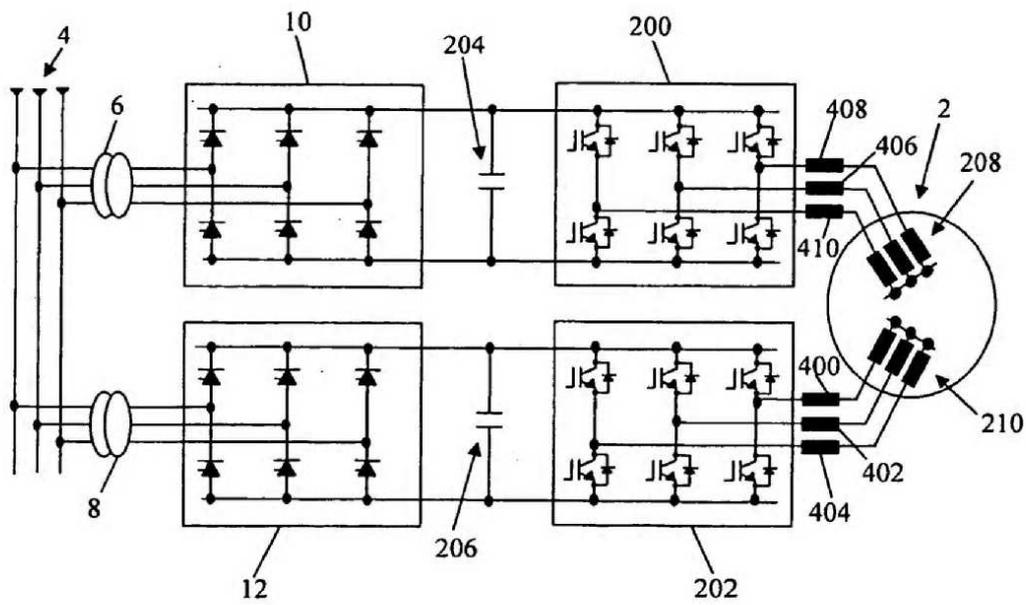


Figura 4

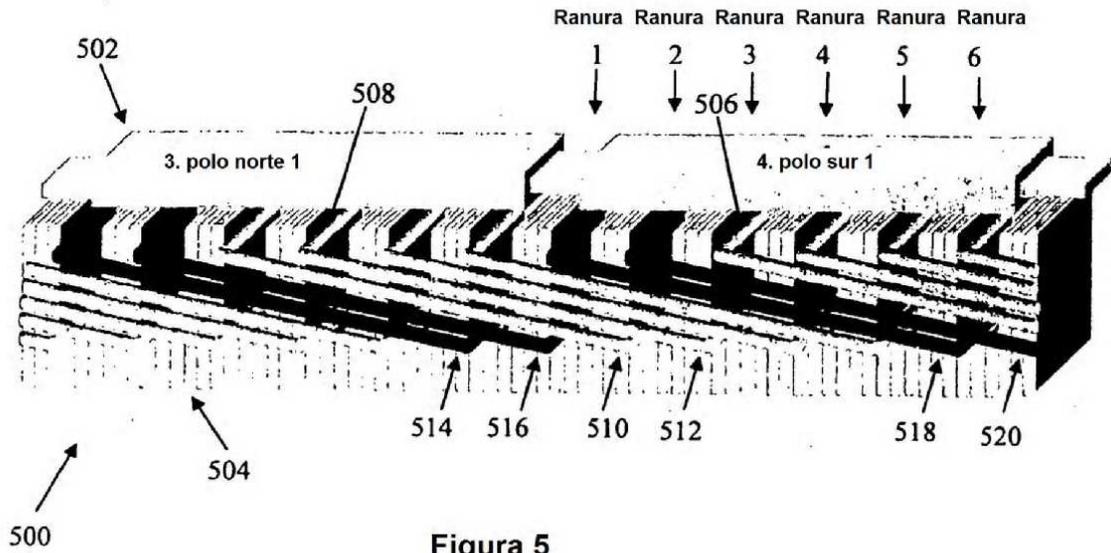


Figura 5

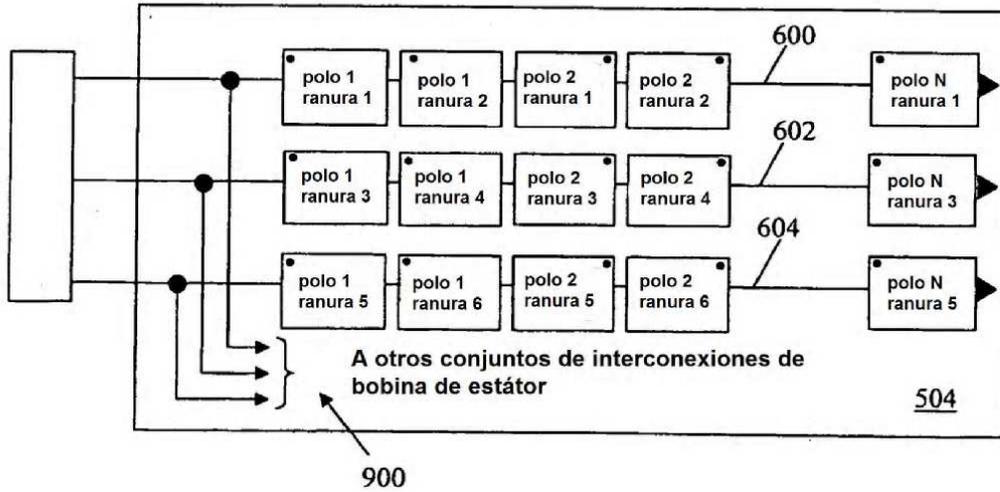


Figura 6

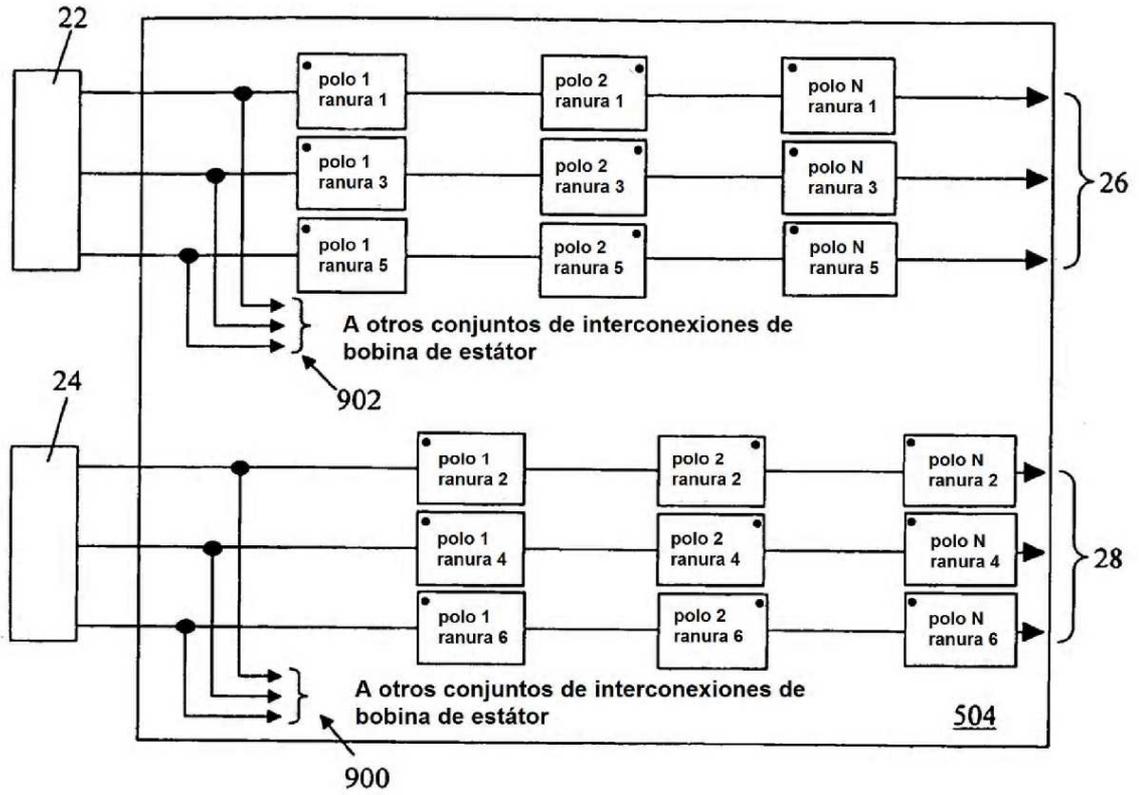


Figura 7

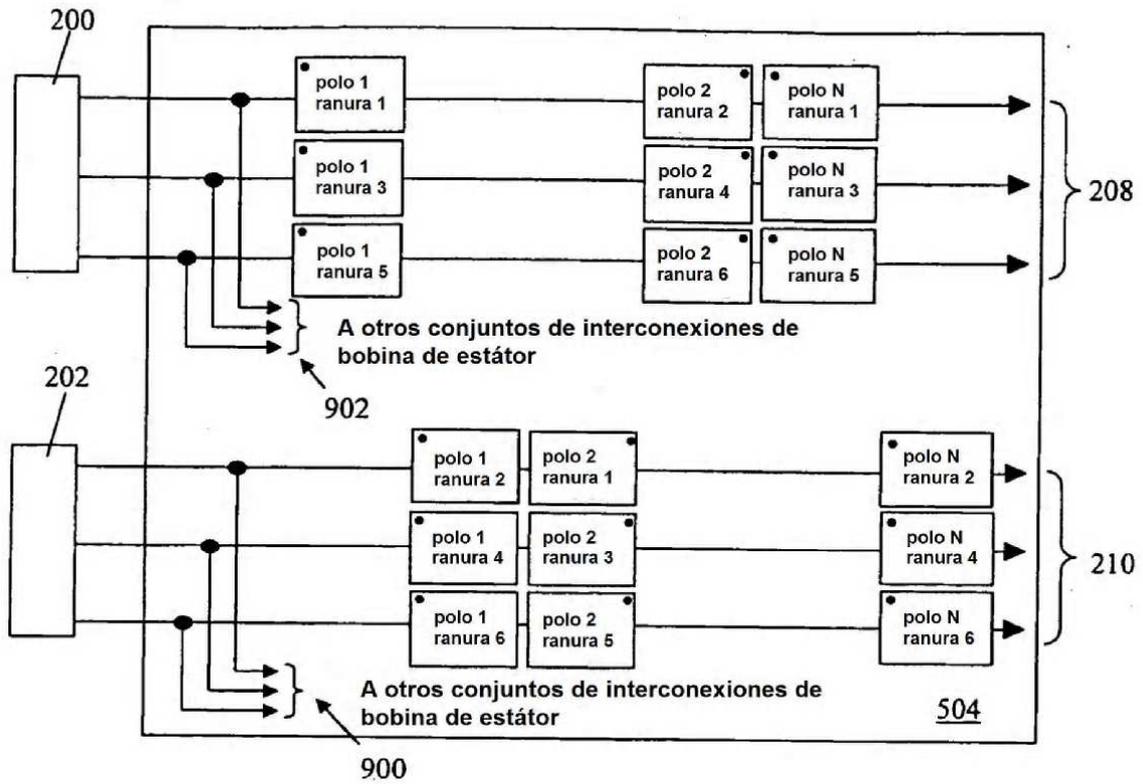


Figura 8

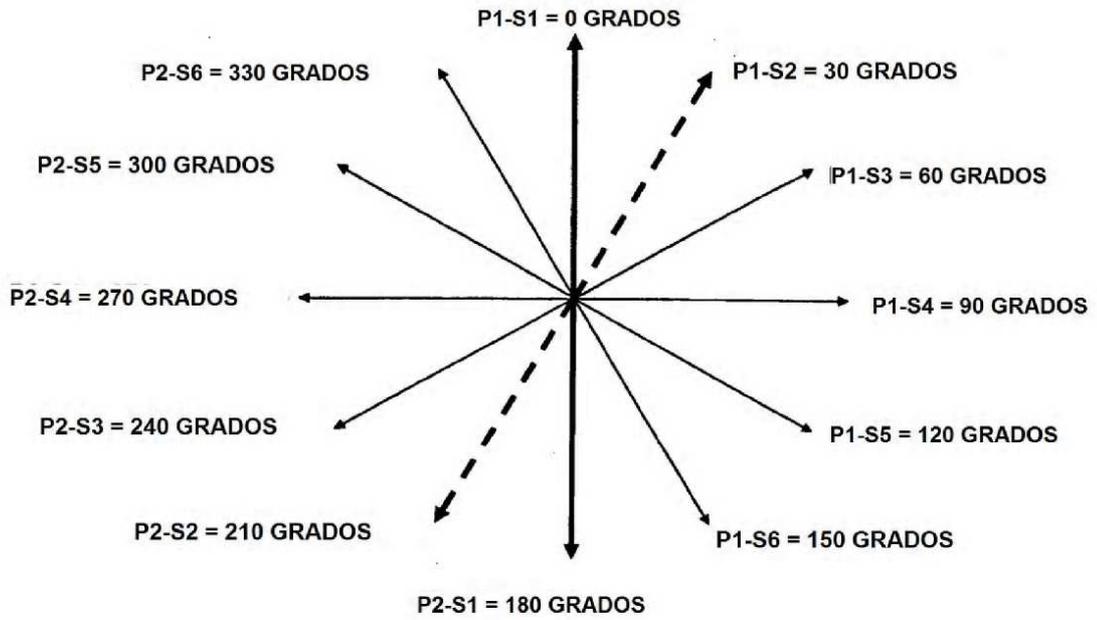


Figura 9a

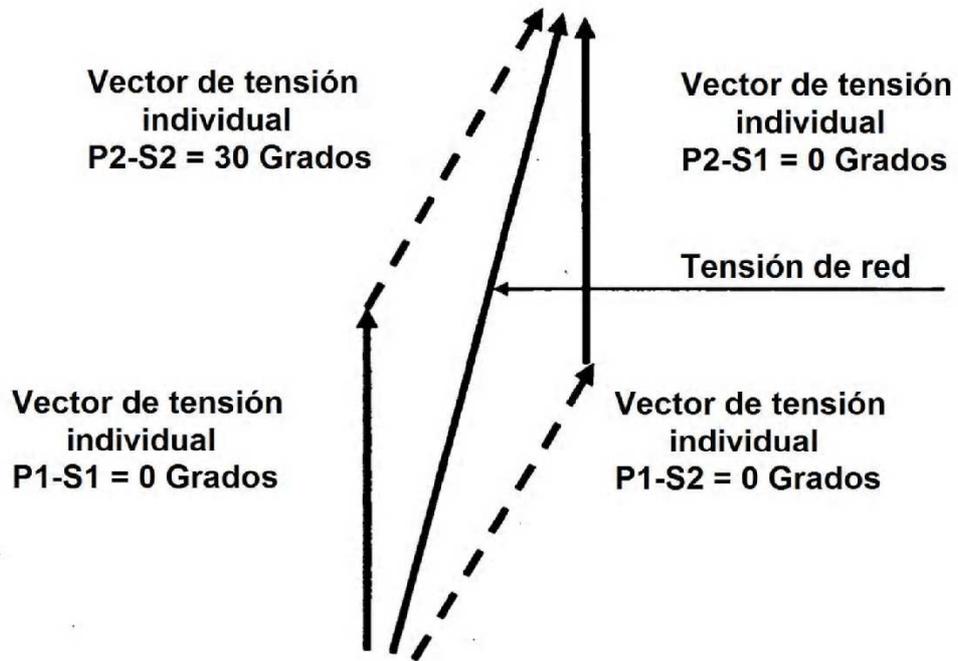


Figura 9b

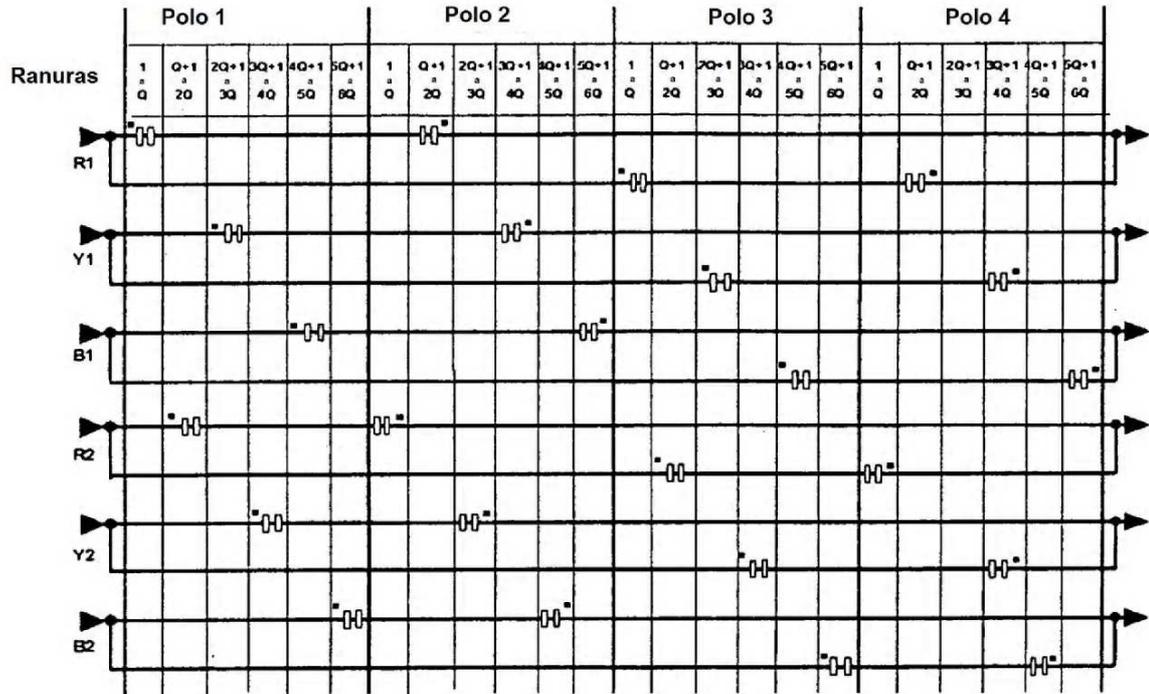


Figura 10