

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 371 803**

51 Int. Cl.:
H02P 21/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08865335 .7**
96 Fecha de presentación: **12.11.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2223426**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **01.09.2010**

54 Título: **PROCEDIMIENTO DE CONTROL DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA ROTATIVA.**

30 Prioridad:
20.12.2007 EP 07150189

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
10.01.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
10.01.2012

73 Titular/es:
**ABB RESEARCH LTD.
AFFOLTERNSTRASSE 44
8050 ZÜRICH, CH**

72 Inventor/es:
**PAPAFOTIOU, Georgios y
ZURFLUH, Franz**

74 Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 371 803 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

Procedimiento de control del funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa

5 **Sector de la técnica**

La invención se refiere al campo de los procedimientos de control del funcionamiento de máquinas eléctricas rotativas. Se parte de un procedimiento para el funcionamiento de una máquina eléctrica de acuerdo con el preámbulo de las reivindicaciones independientes.

10

Estado de la técnica

Hoy se emplean en muchas aplicaciones interruptores convertidores de tensión de alta potencia. Un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna conmuta habitualmente entre tres niveles de tensión y se emplea con frecuencia para controlar el funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa, en particular de máquinas asíncronas o síncronas, y dichas máquinas eléctricas rotativas presentan habitualmente tres arrollamientos del estator. En un procedimiento habitual de control del funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa ésta está conectada por fases con un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna que presenta un circuito de tensión continua para conmutar en general entre m niveles de tensión siendo $m \geq 2$. El circuito de tensión continua del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna para conmutar típicamente entre tres niveles de tensión está constituido por un primer condensador y por un segundo condensador conectado en serie con el primer condensador, presentando el circuito de tensión continua además una primera toma principal del primer condensador, una segunda toma principal del segundo condensador y una toma intermedia entre los dos condensadores que están conectados en serie. Además el circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna comprende para conmutar entre tres niveles de tensión interruptores electrónicos de potencia que están cableados de la forma habitual.

En la figura 1 se muestra una forma de realización de un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna habitual de tres fases para conmutar entre tres niveles de tensión. Según el procedimiento las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna en general se conectan con el circuito de tensión continua según una combinación de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna. En un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre tres niveles de tensión las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna se conectan acodidamente con la primera toma principal, con la segunda toma principal o con la toma intermedia de acuerdo con una combinación de estados de conmutación elegida de los estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna. En el diagrama de estados que se muestra en la figura 2 las combinaciones de estados de conmutación, las transiciones entre ellos representando el signo "+" una conexión de la fase correspondiente con la primera toma principal, el signo "-" una conexión de la fase correspondiente con la segunda toma principal y "0" una conexión de la fase correspondiente con la toma intermedia.

La selección de las combinaciones de estados de conmutación correspondientes se hace, por ejemplo, de acuerdo con el conocido control directo de par (DTC- Direct Torque Control) en el que se comparan el valor real actual del par de la máquina eléctrica rotativa, del flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa y de la tensión en la toma intermedia, en primer lugar, respectivamente con el intervalo de valores prefijados asociado. Los intervalos de valores prefijados respectivamente varían o pueden variar con el tiempo y se determinan habitualmente por un circuito de regulación maestro a partir de valores de referencia del par de la máquina eléctrica rotativa, del flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa y de la tensión en la toma intermedia. Si ahora un valor real actual supera su intervalo de valores prefijado asociado se elige una combinación de estados de conmutación dependiendo de la combinación de estados de conmutación previa elegida a partir de una tabla de modo que el valor actual que resulta para esta combinación de estados de conmutación con suerte podría volver a quedar dentro de los límites del intervalo de valores asociado, aunque no hay ninguna garantía de ello. Además una combinación de estados de conmutación se elige tan sólo o en relación con el valor actual real del par, del flujo magnético del estator o de la tensión si se sobrepasa el intervalo de valores asociado. No se hace una consideración conjunta del valor actual real del par, del flujo magnético del estator y de la tensión.

Lo problemático de un procedimiento como el que se ha descrito para el control del funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa por medio del control directo de par conocido es que entre la combinación de estados de conmutación elegida previa y la combinación de estados de conmutación elegida actual hay típicamente varias transiciones que se representan en la figura 2 mediante líneas entre las combinaciones de estados de conmutación. Las combinaciones de estados de conmutación y las transiciones de una combinación de estados de conmutación a otra están registradas, en general, fijas en la tabla, no estando en la tabla típicamente todas las combinaciones posibles de estados de conmutación de la figura 2. Además, en el control directo de par, se elige sólo una combinación de estados de conmutación dependiendo de la combinación de estados de conmutación elegida previa con la transición asociada que está en la tabla y que devuelve el valor actual, que resulta para la combinación de estados de conmutación elegida, al intervalo de valores asociado. Otras combinaciones de estados de conmutación

- a elegir, en particular, eventualmente suponiendo un menor número de transiciones hasta la combinación de estados de conmutación elegida previa no se guardan en la tabla. Varias transiciones entre las combinaciones de estados de conmutación generan sin embargo una multiplicidad de acciones de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna aumentando la frecuencia de las conmutaciones del interruptor electrónico de potencia. Una frecuencia de conmutaciones tan alta genera sin embargo en el interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna pérdidas por calor (mayor consumo de energía) que hacen que los interruptores electrónicos de potencia puedan gastarse antes, quedar dañados o incluso inservibles.
- 5 En el documento DE 1670135 A1, teniendo esto en cuenta, se expone un procedimiento de control de funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa mediante el que se reduce la frecuencia de conmutaciones de los interruptores electrónicos de potencia de un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna para la conmutación entre m niveles de tensión, siendo $m \geq 2$, que está conectado por fases a la máquina eléctrica rotativa. De acuerdo con el procedimiento en el paso (a) las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna se conectan con el circuito de tensión continua de acuerdo con una combinación de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna. La selección de esta combinación de estados de conmutación se hace en los siguientes pasos adicionales:
- 10 (b) empezar en un instante k de muestreo inicial y para un número arbitrario N de instantes de muestreo:
- determinar todas las combinaciones de estados de conmutación para cada uno de los instantes de muestreo N siendo $N \geq 1$
- 25 (c) construir las secuencias de estados de conmutación para cada combinación de estados de conmutación determinada en el instante k de muestreo inicial siendo cada secuencia estados de conmutación una lista de combinaciones de estados de conmutación determinadas asociadas a la combinación de estados de conmutación respectiva del instante k de muestreo inicial, de los N instantes de muestreo.
- 30 (d) para cada una de las secuencias de estados de conmutación calcular la curva del par de la máquina eléctrica rotativa y la curva del flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa a partir de los conjuntos de valores de estado obtenidos de la máquina eléctrica rotativa y del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante $k+N$ de muestreo
- 35 (e) elegir una secuencia de estados de conmutación en la que la curva del par y la curva del flujo magnético del estator asociadas en el instante $k+N$ de muestreo respectivamente quede dentro de los límites de un intervalo de valores prefijado e imponer esta secuencia de estados de conmutación elegida
- (f) repetición de los pasos (a) hasta (d) siendo $k=k+1$

En el procedimiento de control de funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa de acuerdo con el documento EP 1670135 A1 se ejecutan los pasos (b) a (e) de procedimiento típicamente en un procesador de señal digital formando parte los pasos (b) a (e) entonces, por ejemplo, de un programa de ordenador que se puede cargar en él. La multiplicidad de pasos de cálculo del procedimiento de acuerdo con el documento EP 1670135 A1 presenta sin embargo un problema relativo a la potencia de cómputo de un procesador de señal digital y por ello resultan unos tiempos de cálculo del procesador de señal digital muy altos y por tanto no admisibles y como consecuencia también tiempos de ejecución altos de los pasos del procedimiento, y entonces no puede conseguirse una conexión a tiempo de las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna con el circuito de tensión continua de acuerdo con la combinación de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia. Además resulta posible que según el procedimiento de acuerdo con el documento EP 1670135 A1 la curva del par o la curva del flujo magnético del estator de cada combinación de estados de conmutación asociada ya quede fuera del intervalo de valores prefijado en el instante k o $k+1$ de muestreo no pudiendo gestionar el procedimiento de control de funcionamiento de la máquina eléctrica rotativa, de acuerdo con el documento EP 1670135 A1, un estado así. Por tanto sólo resulta posible un control limitado del funcionamiento de la máquina eléctrica rotativa. Para aliviar de cálculos a la unidad de cálculo principal cuando manipula las secuencias de datos derivados de altas frecuencias de muestreo se propone la utilización de un FPGA en la publicación "Switching frequency imposition and ripple reduction in DTC Ornes by using a multilevel converter", IEEE 2002.

Exposición de la invención

El objetivo de la invención resulta por tanto perfeccionar un procedimiento de control del funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa de tal manera que el tiempo de cómputo sea el mínimo posible y por tanto el tiempo de ejecución de los pasos de procedimiento, y dicho procedimiento que pueda manejar las combinaciones de estados de conmutación y respectivamente su curva del par y su curva del flujo magnético del estator asociadas, dichas curva de par o curva de flujo magnético del estator estando fuera del intervalo de valores prefijado. Este objetivo se consigue gracias a las características de la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se indican perfeccionamientos ventajosos de la invención.

- En el procedimiento según la invención de control del funcionamiento de una máquina eléctrica rotativa, la máquina eléctrica rotativa se conecta por fases con un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna que tiene un circuito de tensión continua para conmutar entre m niveles de tensión, siendo $m \geq 2$. De acuerdo con el procedimiento según la invención en el paso (a) se conectan las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna con el circuito de tensión continua de acuerdo con una combinación de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna. Esta selección de esta combinación de estados de conmutación se hace en los siguientes pasos adicionales;
- 5
- 10 (b) empezar con un instante k de muestreo inicial de un número N arbitrario de instantes de muestreo y
- determinar todas las combinaciones de estados de conmutación admisibles para cada uno de los N instantes de muestreo siendo $N \geq 1$
- 15 (c) construir las secuencias de estados de conmutación para cada combinación de estados de conmutación determinada correspondiente para el instante k inicial de muestreo siendo cada secuencia de estados de conmutación una lista de las combinaciones de estados de conmutación determinadas asociadas a la combinación de estados de conmutación respectiva en el instante k de muestreo inicial, de los N instantes de muestreo. De acuerdo con la invención la selección de combinación estados de conmutación se hace en los siguientes pasos
- 20 adicionales:
- (d) determinación según el paso (b) y construcción según el paso (c) mediante un FPGA
- (e1) calcular los conjuntos de valores intermedios del estado de la máquina eléctrica rotativa y del conmutador convertidor de corriente continua a corriente alterna desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante $k+N$ de muestreo con un procesador de señal digital
- 25 (e2) cálculo de los conjuntos de valores de estado a partir de las secuencias de estados de conmutación y de los conjuntos de valores intermedios de estado calculados mediante el FPGA.
- (f) para cada secuencia de estados de conmutación calcular la curva de par de la máquina eléctrica rotativa y la curva de flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa mediante el FPGA a partir de los conjuntos de valores intermedios de estado desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante $k+N$ de muestreo
- 30 (f1) en caso de que la curva (M) del par en el instante k de muestreo no supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado de un intervalo o de que no quede por debajo de un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores y en caso de que la curva de flujo (Φ) magnético del estator en el instante k de muestreo no supere el valor ($y_{S,max}$) límite superior prefijado de un intervalo de valores o no quede por debajo del valor ($y_{S,min}$) límite inferior prefijado de un intervalo de valores elegir la combinación (SK_a) de estados de conmutación según los pasos (g) a (k),
- 35 (g) elegir la secuencia (SSK_a) de estados de conmutación mediante FPGA en la que la curva (M) de par asociada o la curva (Φ) del flujo magnético del estator en el instante $k+N$ de muestreo respectivamente dentro del intervalo de valores prefijado o en el que los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva de par y de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva de flujo magnético del estator asociados relativos a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante $k+N$ de muestreo se acerquen al intervalo de valores prefijado respectivo
- 40 (h) para cada secuencia (SSK_a) de estados de conmutación elegida determinar el número de instantes n por medio de un FPGA hasta que la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) de par o de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator asociados relativos a los instantes ($k+N-1$) y ($k+N$) de muestreo quede fuera del intervalo de valores prefijado respectivo
- 45 (i) para cada secuencia (SSK_a) de estados de conmutación elegida determinar el número s total de transiciones de conmutación de las combinaciones (SK_k, \dots, SK_{k+N}) de estados de conmutación determinadas asociadas por medio del FPGA
- (j) para cada una de las secuencias (SSK_a) de estados de conmutación elegida calcular un valor c de bondad a partir del número n de instantes y del número s total de transiciones de conmutación por medio del FPGA
- 50 (k) imponer las combinaciones (SK_k) de estados de conmutación determinadas en el instante k de muestreo inicial como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación, mediante el FPGA, en la que el valor c de bondad de la secuencia (SSK_a) de estados de conmutación elegida asociada sea mínima;
- (l) en caso de que la curva (M) de par en el instante k de muestreo supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o que quede por debajo de un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores calcular un valor ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par relativo a los valores ($y_{M,max}, y_{M,min}$) límites superior e inferior del
- 55 intervalo de valores por medio del FPGA para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante de muestreo $k+N$; en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator supere el valor ($y_{S,max}$) límite superior prefijado o quede por debajo del valor ($y_{S,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores en el instante k calcular un valor ($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo magnético del estator relativos a los valores ($y_{S,max}, y_{S,min}$) límites superior e inferior del intervalo de valores mediante el FPGA para cada instante de muestreo desde el
- 60 instante k de muestreo inicial hasta el instante de muestreo $k+N$; elegir la combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación en los siguientes pasos (m) a (o)
- (m) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación y para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante de muestreo $k+N$ determinar el valor (V_{max}) máximo a partir de los valores ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par y de los valores ($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo magnético por medio del FPGA
- 65 (n) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación construir la suma (S_{Vmax}) de los valores (V_{max}) máximos mediante el FPGA

(o) imponer la combinación (SK_k) de estados de conmutación determinada en el instante k de muestreo inicial como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida por medio del FPGA para la que la suma ($S_{V_{max}}$) de los valores (V_{max}) máximos sea mínima

(p) repetición de los pasos. (a) a (o) siendo $k=k+1$;

5 Como alternativa a los pasos (m) a (o) la elección de la combinación de estados de conmutación se puede hacer según los siguientes pasos adicionales:

(m) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación y para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante de muestreo $k+N$ determinar el valor (V_{max}) máximo de los valores ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par y los valores ($S_{M,k}, \dots, S_{M,k+N}$) de error del flujo del estator mediante el FPGA

(n) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación construir la suma ($S_{V_{max}}$) de los valores (V_{max}) máximos mediante el FPGA

(o) imponer la combinación (SK_k) de estados de conmutación determinada en el instante k muestreo inicial como combinación ($SK_{a,k}$) estados de conmutación elegida mediante el FPGA para la que suma ($S_{V_{max}}$) de los valores (V_{max}) máximos sea mínima.

Al utilizar el FPGA para los pasos (d) del procedimiento, es decir, para los pasos (b) y (c) del procedimiento y para los pasos (f) a (k) del procedimiento el procesador de señal digital empleado que se emplea para el paso (e1) del proceso, se emplea sólo para los pasos de cálculo que son necesarios para el paso (e1) del procedimiento de modo que el paso (e1) sólo necesita un tiempo de cálculo pequeño. Así están disponibles en el paso (e1) los conjuntos de valores intermedios de estado calculados en el paso (e1) ventajosamente después de un tiempo muy corto y se pueden seguir usando por el FPGA de forma inmediata, en particular, para los pasos (d) de procedimiento, es decir, para los pasos (b) y (c) del procedimiento y para los pasos (e2) a (k) de procedimiento, cubriendo el FPGA estos pasos del procedimiento igualmente en tiempos cortos, en particular, gracias a su capacidad de cálculo en paralelo de secuencias de cálculo en serie. En total mediante el empleo del FPGA y el procesador de señal digital se puede mantener el tiempo de cálculo de los pasos de cálculo del procedimiento ventajosamente bajo y asimismo el tiempo de ejecución de los pasos del procedimiento de modo que la conexión de las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna con el circuito de tensión continua se haga siempre a tiempo según la combinación de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia.

Gracias a los pasos (b) a (k) ventajosamente se elige siempre la combinación de estados de conmutación óptima partiendo de la combinación de estados de conmutación elegida previa y relativa al número de transiciones desde la combinación de estados de conmutación elegida previa hasta la combinación de estados de conmutación elegida y relativa a los intervalos de valores prefijados respectivos para el par de la máquina eléctrica rotativa y para el flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa. Así el número de operaciones de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna se puede reducir ventajosamente y con ello la frecuencia de conmutaciones del interruptor electrónico de potencia. La frecuencia de conmutaciones reducida deriva en que en los interruptores electrónicos de potencia se generan menos pérdidas por calor, gastándose más lentamente los interruptores electrónicos de potencia y quedando protegidos sobremanera de resultar dañados o quedar inservibles. Además se guardan mejor los intervalos de valores respectivos en su conjunto.

En general el procedimiento según la invención hace posible, por tanto, una predicción del comportamiento de la máquina eléctrica rotativa más allá de un instante de muestreo para las secuencias de estados de conmutación determinadas desplazándose el horizonte de N instantes de muestreo, después de la aplicación de los pasos (a) a (k), un instante de muestreo en el paso (p) y eligiéndose entonces tan sólo la primera combinación de estados de conmutación, en particular, la combinación k-sima de estados de conmutación de una secuencia de estados de conmutación. Un criterio de bondad aproxima o reproduce entonces la frecuencia de conmutaciones. Por último, en el procedimiento según la invención, además, las combinaciones de estados de conmutación relativas a todas las magnitudes relevantes, en particular, el par y el flujo magnético del estator se consideran conjuntamente si superan el intervalo de valores asociado.

En los pasos (l) a (o) se elige siempre ventajosamente la combinación de estados de conmutación óptima, para el caso en que respectivamente la curva del par o la curva del flujo magnético del estator asociadas estén fuera del intervalo de valores prefijado. Así el procedimiento según la invención es capaz de poder controlar las combinaciones de estados de conmutación y respectivamente la curva del par y la curva del flujo magnético del estator asociadas que estén fuera del intervalo de valores prefijado. Así, ahora es posible un control del funcionamiento de la máquina eléctrica rotativa sin limitaciones.

Estos y otros objetivos, ventajas y características de la presente invención se harán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de las formas de realización preferida de la invención y junto con el dibujo

Breve descripción de los dibujos

Muestran:

la figura 1: una forma de realización de un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna de tres fases para conmutar entre tres niveles de tensión

5 la figura 2: un diagrama de estados de combinaciones de estados de conmutación de las fases del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna y

la figura 3: la evolución de las curvas de par calculadas para el caso de $N=2$ instantes de muestreo

10 Los números de referencia que se usan en el dibujo y su significado aparecen en una lista de números de referencia de forma resumida. En principio se les da los mismos números de referencia a las mismas partes en las figuras. Las formas de realización descritas representan, a modo de ejemplo, el objeto de la invención y no tienen ningún efecto limitativo.

15 **Vías de ejecución de la invención**

En la figura 1 se muestra una forma de realización de un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna de tres fases para conmutar entre tres niveles de tensión, estando conectada una máquina 1 eléctrica rotativa por fases con un circuito 3 de tensión continua del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna. En general la máquina 1 eléctrica rotativa puede estar conectada con el circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión siendo entonces $m \geq 2$. De acuerdo con la figura 1, el circuito 3 de tensión continua está constituido por un primer condensador C_1 y un segundo condensador C_2 que está conectado en serie con el primer condensador siendo la capacidad del condensador C_1 de aproximadamente el mismo valor que la del condensador C_2 . El circuito 3 de tensión continua de acuerdo con la forma de realización del ejemplo de un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre tres niveles de tensión presenta en el primer condensador C_1 una primera toma V_+ principal, en el segundo condensador C_2 una segunda toma V_2 principal y una toma NP intermedia entre los dos condensadores C_1 , C_2 conectados en serie. Además el circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna de la figura 1 comprende un sistema 4 convertidor parcial previsto para cada fase u , v , w constituido respectivamente por un primer grupo 5 de conmutación, un segundo grupo 6 de conmutación y un tercer grupo 7 de conmutación estando constituido cada uno de los grupos 5, 6, 7 de conmutación por dos interruptores electrónicos de potencia conectados en serie. Además en cada sistema 4 convertidor parcial el primer grupo 5 de conmutación está conectado con la primera toma V_+ principal y el segundo grupo 6 de conmutación con la segunda toma V_2 principal. Además el primer grupo 5 de conmutación está conectado en serie con el segundo grupo 6 de conmutación constituyendo el punto de conexión del primer grupo 5 de conmutación con el segundo grupo 6 de conmutación un punto de conexión de fase. El tercer grupo 7 de conmutación, que es un grupo de conmutación "crowbar", está conectado con el primer grupo 5 de conmutación, en particular, con el punto de conexión de los dos interruptores electrónicos de potencia conectados en serie del primer grupo 5 de conmutación. Además el tercer grupo 7 de conmutación está conectado con el segundo grupo 6 de conmutación, en particular, con el punto de conexión de los dos interruptores electrónicos de potencia conectados en serie del segundo grupo 6 de conmutación. Además el tercer grupo 7 de conmutación está conectado, en particular, el punto de conexión de los dos interruptores electrónicos de potencia conectados en serie, del tercer grupo 7 de conmutación con la toma NP intermedia. Los interruptores electrónicos de potencia del primer y segundo grupos 5, 6 de conmutación de la figura 1 son interruptores electrónicos de potencia que se pueden controlar bidireccionalmente siendo el interruptor electrónico de potencia del tercer grupo 7 de conmutación unidireccional y no controlable. Se puede concebir también que el interruptor electrónico de potencia del tercer grupo 7 de conmutación sea un interruptor electrónico de potencia bidireccional controlable.

De acuerdo con el procedimiento se conectan ahora las fases u , v , w del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna, que es en general un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión, en un primer paso (a) con el circuito 3 de tensión continua de acuerdo con una combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación elegida de estados de conmutación de los interruptores electrónicos de potencia del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna. Como se ha mencionado al principio en la figura 2 se muestra a modo de ejemplo un diagrama de estados de las combinaciones de estados de conmutación de un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre tres niveles de tensión, representando el símbolo "+" la conexión de la fase u , v , w correspondiente con la primera toma V_+ principal, el símbolo "-" representa una conexión de la fase u , v , w correspondiente con la segunda toma V_2 principal y el símbolo "0" una conexión de la fase u , v , w correspondiente con una toma NP intermedia y las líneas entre las combinaciones SK estados de conmutación representan transiciones permitidas entre las combinaciones SK de estados de conmutación. Se ha de mencionar que el diagrama de estados de las combinaciones de estados de conmutación de un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna, por ejemplo, para la conmutación de cinco niveles de tensión resultaría de otra manera. En particular el experto en la materia construiría un circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna en el que partiendo de una combinación SK de estados de conmutación se pudiera conmutar sin limitaciones entre todas las combinaciones SK estados de conmutación de este circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna.

65 La selección de las combinaciones $S_{a,k}$ de estados de conmutación mencionadas antes se hace en los siguientes

pasos adicionales:

5 en el paso (b) de se determinan empezando por un instante k inicial de muestreo para un número N a elegir de instantes de muestreo de todas las combinaciones $SK_k \dots SK_{k+N}$ de estados de conmutación permitidas para cada uno de los N instantes de muestreo preferentemente a partir de la combinación SK_{k-1} de estados de conmutación determinada previa respectiva siendo $N \geq 1$ y preferentemente siendo la primera combinación SK_{k-1} de estados de conmutación determinada previa la combinación $SK_{a,k-1}$ de estados de conmutación elegida, es decir, del instante $k-1$ de muestreo

10 en el paso (c) se construyen las secuencias SSK de estados de conmutación de cada combinación SK_k de estados de conmutación determinada correspondiente al instante k de muestreo inicial siendo cada secuencia SSK de estados de conmutación una lista de combinaciones SK_k, \dots, SK_{k+N} de estados de conmutación determinadas asociadas a la respectiva combinación SK_k de estados de conmutación correspondiente al instante k de muestreo inicial de los N instantes de muestreo. Visto llanamente cada secuencia de estados de conmutación representa, por ejemplo, una sucesión de combinaciones SK_k, \dots, SK_{k+N} de estados de combinación posibles de acuerdo con la figura 2, según las líneas asociadas a una de las posibles combinaciones SK_k de estados de conmutación correspondiente al instante k de muestreo inicial.

20 De acuerdo con la invención la selección de las combinaciones ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación se hace en los siguientes pasos adicionales:

25 en el paso (d) se hace la determinación según el paso (b) y la construcción según el paso (c) por medio de un FPGA. En el paso (e1) se hace el cómputo de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado de la máquina 1 eléctrica rotativa y del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante $k+N$ de muestreo por medio de un procesador digital de señal. En el paso (e2) se hace el cálculo de conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estado a partir de las secuencias SSK de estados de conmutación y de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado calculados con FPGA. En el paso (f) se calculan entonces para cada secuencia SSK de estados de conmutación una curva M de par de la máquina eléctrica rotativa y una curva e del flujo magnético del estator de la máquina eléctrica rotativa a partir de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estados determinados de la máquina eléctrica rotativa y del circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante $k+N$ de muestreo mediante el FPGA. La curva M del par de la máquina 1 eléctrica rotativa y la curva Φ de flujo magnético del estator contienen los valores $M_{T,k+2}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva respectivamente los valores de la curva $\Phi_{T,k+2}, \dots, \Phi_{T,k+N}$. Cada uno de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado mencionados antes contiene, por ejemplo, dos valores $\Phi_{eS1,k}, \dots, \Phi_{eS1,k+N}, \Phi_{eS2,k}, \dots, \Phi_{eS2,k+N}$ del flujo del estator dos valores $\Phi_{eR1,k}, \dots, \Phi_{eR1,k+N}, \Phi_{eR2,k}, \dots, \Phi_{eR2,k+N}$ del flujo del rotor y eventualmente un valor $V_{e,k}, \dots, V_{e,k+N}$ de velocidad. Para el cálculo de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado se estimarán ambos valores $\Phi_{eS1,k}, \dots, \Phi_{eS1,k+N}, \Phi_{eS2,k}, \dots, \Phi_{eS2,k+N}$ del flujo del estator, ambos valores $\Phi_{eR1,k}, \dots, \Phi_{eR1,k+N}, \Phi_{eR2,k}, \dots, \Phi_{eR2,k+N}$ del flujo del rotor y eventualmente el valor $V_{e,k}, \dots, V_{e,k+N}$ de velocidad por medio del procesador de señal digital a partir de los valores estimados u obtenidos de medidas de parámetros del motor, constituyendo estos valores calculados entonces los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado. A partir de ahí se hace el cálculo ya antes mencionado de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estados de acuerdo con un modelo de cálculo conocido para el experto en la materia a partir de las secuencias SSK de estados de conmutación y de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado calculados mediante el FPGA de acuerdo con el paso (e2). El cálculo de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores del estado es iterativo, es decir, por ejemplo, para el cálculo de un conjunto $X_{e,k+1}$ de valores de estado en el instante $k+1$ de muestreo se recurre al conjunto $Y_{e,k}$ de valores intermedios de estado previo para el instante k de muestreo y a las secuencias SSK de estados de conmutación para las combinaciones SK_k de estados de conmutación del instante k de muestreo.

55 El procesador de señal digital se empleará sólo para los pasos de cálculo necesarios para el paso (e1) del procedimiento, es decir, para el cálculo de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado. Así están disponibles ventajosamente ya tras un tiempo corto los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado calculados en el paso (e1) y entonces se pueden pasar a utilizar por el FPGA de forma inmediata para el cálculo de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estado y luego para el cálculo de la curva M del par y de la curva e del flujo magnético del estator. Si resultan necesarios, por ejemplo, para el cálculo de los valores de la curva M del par, varios pasos de cálculo como, por ejemplo, sumas, multiplicaciones o similares estos pasos de cálculo se procesan en serie ventajosamente con el FPGA de modo que resulte una secuencia de cálculo en serie la (llamada "pipeline").

60 El cálculo de un valor $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator se calcula con el FPGA de forma análoga pudiéndose ahorrar tiempo de cálculo de forma eficaz al transcurrir la secuencia de cálculo en serie para el cálculo de un valor $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva del par de forma ventajosa en paralelo con la secuencia de cálculo para el cálculo de un valor $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva de flujo magnético del estator.

65 Mediante el cálculo descrito antes de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}, \Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de las curvas resulta para cada secuencia SSK de estados de conmutación la curva M de par dicha de la máquina 1 eléctrica rotativa y la curva Φ de

flujo magnético del estator de la máquina 1 eléctrica rotativa mostrándose en la figura 3, a modo de ejemplo, la evolución esquemática de dichas curvas M de par calculadas de las secuencias SSK de conmutación de estados de conmutación asociadas para $N=2$ y los puntos de las curvas M par que corresponden a los valores $M_{T,k,\dots}, M_{T,k+N}$ de las curvas asociados calculados. Se ha de notar que también se pueden obtener en primer lugar los conjuntos $X_{e,k,\dots}, X_{e,k+N}$ de valores de estado para cada uno de los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con el método que se ha explicado antes y entonces a partir de ellos calcular los valores $M_{T,k,\dots}, M_{T,k+N}, \Phi_{T,k,\dots}, \Phi_{T,k+N}$ de la curva respectivo para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo para construir la curva M de par y la curva Φ de flujo magnético del estator de acuerdo a como se ha procedido antes.

En el paso (f1) adicional se hace la selección de combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación en los siguientes pasos (g) a (k) en caso de que la curva (M) de par en el instante k de muestreo no supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o quede por debajo del valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores y en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator para el instante k de muestreo no supere un valor ($y_{s,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o quede por debajo del valor ($y_{s,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores. En el siguiente paso (g) entonces se eligen las secuencias (SSK_a) de estados de conmutación mediante el FPGA para los que una curva M de par y una curva Φ de flujo magnético del estator asociadas para el instante k+N de muestreo respectivamente queden dentro del intervalo de valores prefijado. En relación con la curva M del par el intervalo queda determinado por un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores y un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores. En relación con la curva Φ del flujo del estator el intervalo de valores queda determinado por un valor ($y_{s,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores y un valor ($y_{s,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores. En relación con la curva M del par de la figura 3 esto afectaría a las dos curvas M de par superiores pero no a la curva M de par inferior indicándose en la figura 3 el intervalo de valores mediante dos líneas horizontales discontinuas. Se ha de mencionar que el intervalo de valores prefijado respectivamente varía con el tiempo y habitualmente se determina mediante un circuito de regulación maestro a partir de valores de referencia del par de la máquina 1 eléctrica rotativa y del flujo magnético del estator de la máquina eléctrica resultándole conocidos estos circuitos de control al experto en la materia. Preferentemente un circuito de regulación así se realiza en el procesador de señal digital, es decir, el intervalo de valores lo proporciona el procesador de señal digital. Alternativamente se eligen las secuencias SSK_a de estados de conmutación en las que los valores $M_{T,k,\dots}, M_{T,k+N}$ de una curva del par asociada y los valores $\Phi_{T,k,\dots}, \Phi_{T,k+N}$ de la curva de un flujo Φ magnético del estator asociado relativo a cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se aproximen al intervalo de valores prefijado respectivo.

En un paso (h) además para cada secuencia SSK_a de estados de conmutación se determina el número de instantes n hasta que para la extrapolación de valores $M_{T,k,\dots}, M_{T,k+N}$ de la curva M del par asociada o los valores $\Phi_{T,k,\dots}, \Phi_{T,k+N}$ de la curva del flujo Φ magnético del estator en el instante k+N-1 de muestreo y el instante k+N de muestreo queden fuera del intervalo de valores prefijado respectivo, es decir, hasta que una de las extrapolaciones, la que lo haga antes, salga del intervalo de valores prefijado respectivo o llegue a un valor límite del intervalo de valores prefijado respectivo. El cálculo mencionado antes se hace ventajosamente también en serie mediante el FPGA (el llamado "pipelining"). En la figura 3 la extrapolación respectiva para las curvas M de par relevantes superiores se marca con trazo discontinuo saliendo la extrapolación de una de las curvas M de par superior de la figura 3 del intervalo de valores prefijado ya en el instante k+3 y la extrapolación de la otra curva M de par relevante superior que se rodea de una línea de trazo discontinuo para que se note más, queda sin embargo todavía dentro del intervalo de valores prefijado en el instante k+3.

Además en el paso (i) para cada secuencia SSK_a de estados de conmutación elegida el número s total de transiciones de conmutación de las combinaciones SK_k,\dots,SK_{k+N} de estados de conmutación determinadas asociadas. Esto se determina también mediante el FPGA haciéndose ventajosamente en serie (el llamado "pipelining").

Además en el paso (j) se calcula un valor c de bondad para cada una de las secuencias SSK_a de estados de conmutación elegidos, a partir del número n de instantes y del número s total de transiciones de conmutación. Preferentemente se calcula el valor c de bondad mediante el FPGA dividiendo el número s total de transiciones de conmutación entre el número n de instantes. Este cálculo lo hace el FPGA ventajosamente en serie.

En un paso (k) del procedimiento se impone entonces la combinación SK_k de estados de conmutación determinada para el instante k de muestreo como combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación elegida mediante el FPGA para la que el valor c de bondad de la secuencia SSK_a de estados de conmutación elegida asociada sea mínima. La imposición mencionada la hace el FPGA ventajosamente en serie (el llamado "pipelining").

En el paso (l) adicional en caso de que al contrario que en el paso (f1) ahora la curva M de par en el instante k de muestreo supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o que quede por debajo de un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores, mediante el FPGA se calcula un valor de error $V_{M,k,\dots}, V_{M,k+N}$ del par con respecto a los valores ($y_{M,max}, y_{M,min}$) límites superior e inferior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo. En caso de que la curva Φ de flujo magnético del estator supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o quede por

debajo de un valor ($y_{M,\min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores en el instante k de muestreo se calcula mediante el FPGA un valor de error $V_{\Phi,k,\dots}, V_{\Phi,k+N}$ del flujo del estator con respecto a los valores ($y_{S,\max}, y_{S,\min}$) límite superior e inferior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo. En el paso (m) para cada secuencia SSK de estados de conmutación y para cada instante desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se calcula mediante el FPGA el valor v_{\max} máximo de los valores $V_{M,k,\dots}, V_{M,k+N}$ de error del par y los valores de error del $V_{S,k,\dots}, V_{S,k+N}$ flujo magnético del estator. En el paso (n) a continuación para cada secuencia estados de conmutación SSK se construye la suma $S_{v_{\max}}$ de valores v_{\max} máximos. En un paso (o) adicional la combinación estados de conmutación determinada cuyo valor de la suma $S_{v_{\max}}$ de valores v_{\max} máximos sea el mínimo, se elige mediante el FPGA como combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación para el instante k de muestreo inicial.

Como alternativas a los pasos (m) a (o) la selección de la combinación de estados de conmutación se puede hacer también según los siguientes pasos adicionales:

- 15 (m) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación y para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo determinar el valor (v_{\max}) máximo de los valores $V_{M,k,\dots}, V_{M,k+N}$ del error del par y los valores $V_{S,k,\dots}, V_{S,k+N}$ de error del flujo del estator por medio de un FPGA
- (n) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación construir la suma ($S_{v_{\max}}$) de los valores (v_{\max}) máximos mediante el FPGA
- 20 (o) imponer mediante el FPGA la combinación (SK_k) de estados de conmutación determinada para la que la suma ($S_{v_{\max}}$) de los valores (v_{\max}) máximos sea mínima como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida para el instante k de muestreo inicial

Finalmente en el paso (p) los pasos (a) a (o) se repiten, siendo $k=k+1$, es decir, se hace la selección de la combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación según la secuencia descrita antes de acuerdo con los pasos (a) a (k). N es constante para cada uno de los pasos (a) a (l)..

Al utilizar el FPGA para los pasos (d) del procedimiento, es decir para los pasos (b) y (c) del procedimiento, y para los pasos (f) a (k) del procedimiento, se emplea el procesador de señal digital utilizado, que se emplea para el paso (e1) del procedimiento, sólo para los pasos de cálculo necesarios para el paso (e1) del procedimiento de modo que el paso (e1) sólo necesita un tiempo de cálculo corto. Así los conjuntos $Y_{e,k,\dots}, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado calculados en el paso ventajosamente ya están disponibles después de un tiempo corto y pueden pasar a utilizarse por el FPGA inmediatamente, en particular, para los pasos (d) del procedimiento, es decir, para los pasos (b) y (c) de procedimiento y para los pasos (e2) a (k) del procedimiento terminando el FPGA estos pasos de procedimiento también en tiempo muy corto, en particular, por su capacidad de procesamiento en paralelo de secuencias de cálculo en serie. Ventajosamente la determinación de acuerdo con los pasos (h) a (k) por el FPGA se realiza en serie. En conjunto mediante la utilización del FPGA además del procesador de señal digital el tiempo de cálculo de los pasos de cálculo del procedimiento y así también el tiempo de ejecución de los pasos del procedimiento se mantiene ventajosamente bajo de modo que la conexión de las fases u, v, w del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna con el circuito 3 de tensión continua se hace siempre a tiempo de acuerdo con la combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación elegida de estados de conmutación del interruptor electrónico de potencia.

Mediante los pasos (b) a (h) y en particular mediante la extrapolación además resulta posible predecir el comportamiento futuro del sistema en su conjunto, es decir, de la máquina 1 eléctrica rotativa y del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna conectado con ella y entonces ventajosamente elegir siempre la combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación óptima partiendo de la combinación $SK_{a,k-1}$ de estados de conmutación elegida previa y relativa al número de transiciones desde la combinación $SK_{a,k-1}$ de estados de conmutación elegida previa a la combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación elegida y relativa el intervalo de valores prefijado respectivo para el par M de la máquina 1 eléctrica rotativa y para el flujo Φ magnético del estator de la máquina 1 eléctrica rotativa. Así se puede reducir el número de acciones de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna ventajosamente y con ello reducirse la frecuencia de conmutaciones del interruptor electrónico de potencia. Los interruptores electrónicos de potencia generan, debido a la frecuencia de conmutaciones reducida ventajosamente menos pérdidas por calor y tienen así un consumo de energía menor de modo que los interruptores electrónicos de potencia se gastan más lentamente y quedan protegidos sobremedida de quedar dañados o inservibles.

Por medio de los pasos (l) a (o) ventajosamente para el caso de que la curva M del par asociado o la curva Φ del flujo magnético del estator asociados queden fuera del intervalo de valores prefijado se elige siempre la combinación $SK_{a,k}$ de estados de conmutación óptima. Así se consigue que el procedimiento según la invención pueda gestionar las combinaciones de estados de conmutación y su curva M de par asociado y curva Φ de flujo del magnético del estator respectivas asociadas que queden fuera del intervalo de valores prefijado. Por tanto, resulta posible un control del funcionamiento de la máquina 1 eléctrica rotativa sin limitaciones.

Como ya se ha mencionado antes se muestra en la figura 1 un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre tres niveles de tensión, presentando el circuito 3 de tensión continua entonces

m-2 tomas NP intermedias, es decir, una única toma intermedia. Para el caso general de un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión, siendo $m \geq 3$ el circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna presenta en el circuito 3 de tensión continua m-2 tomas NP intermedias. En relación con el paso (f) del procedimiento según la invención esto significa que para cada secuencia SSK de estados de conmutación se calculan adicionalmente m-2 curvas U_{NP} de tensión para los tensiones en las m-2 tomas NP intermedias a partir de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estado de la máquina 1 eléctrica rotativa y del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para los instantes de muestreo desde el instante k inicial hasta el instante k+N de muestreo mediante el FPGA. Los cálculos a los que se hace referencia se hacen análogamente al cálculo ya mencionado de la curva M de par correspondiente de la máquina 1 eléctrica rotativa y la curva Φ de flujo magnético del estator de la máquina 1 eléctrica rotativa. Además se eligen para $m \geq 3$ en relación con el paso (g) las secuencias SSK_a de estados de conmutación por medio del FPGA en las que adicionalmente las curvas U_{NP} de tensión asociadas para el instante (k+N) de muestreo estén respectivamente dentro de un intervalo de valores prefijado o en las que adicionalmente los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las curvas de las m-2 curvas U_{NP} de potencial asociadas en relación con los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se aproximen al intervalo de valores prefijado respectivo. En relación con las curvas U_{NP} de tensión el intervalo de valores queda determinado por un valor $y_{NP,max}$ límite superior prefijado del intervalo de valores y por el valor $y_{NP,min}$ límite inferior prefijado del intervalo de valores. Además para $m \geq 3$, en relación con el paso (h) para cada secuencia SSK_a de estados de conmutación elegida el número n de instantes se determina mediante el FPGA, hasta que la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par asociada o de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator o de los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las m-2 curvas U_{NP} de tensión relativas al instante k+N-1 de muestreo y al instante k+N de muestreo estén fuera del intervalo de valores prefijado respectivo. Se entiende que para $m \geq 3$ los pasos (a) a (e2) e (i) a (k) se mantienen.

Para $m \geq 3$ ahora, con los pasos (b) a (k) y en particular por la extrapolación es posible predecir el comportamiento futuro del sistema en conjunto, es decir, de la máquina 1 eléctrica rotativa y del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna conectado con ella y entonces ventajosamente elegir la combinación SK_{a,k} de estados de conmutación óptima partiendo de la combinación SK_{a,k-1} de estados de conmutación elegida previa y relativo al número de transiciones desde la combinación SK_{a,k-1} estados de conmutación elegida previa hasta la combinación SK_{a,k} de estados de conmutación y relativo al intervalo de valores prefijado respectivo para el par M de la máquina 1 eléctrica rotativa y para el flujo Φ magnético del estator de la máquina 1 eléctrica rotativa y para las m-2 tomas NP intermedias de tensión. Así, como se ha mencionado antes, ventajosamente se puede reducir el número de acciones de conmutación del interruptor electrónico de potencia del circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna y con ello reducirse la frecuencia de conmutaciones del interruptor electrónico de potencia.

Ventajosamente en general en un paso (q) de procedimiento adicional se omiten los pasos (b) y (c) y se forma una secuencia SSK de estados de conmutación para la combinación SK_{a,k-1} de estados de conmutación elegida previa mediante el FPGA siendo la secuencia SSK de estados de conmutación entonces una lista de N combinaciones SK_{a,k-1} de estados de conmutación elegidas previas y además se impone la combinación SK_{a,k-1} de estados de conmutación previa elegida como combinación SK_{a,k} de estados de conmutación elegida mediante el FPGA y finalmente se aplica el paso (f) y los pasos (f1) a (o) se omiten, en caso de que los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par asociada y los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva del flujo magnético del estator asociada relativos a los instantes de muestreo desde el instante k hasta el instante k+N de muestreo queden dentro del intervalo de valores prefijado respectivo. Para $m \geq 3$ en el paso (q) adicional se omiten los pasos (b) y (c) y se forma una secuencia SSK de estados de conmutación para la combinación SK_{a,k-1} de estados de conmutación elegida previa mediante el FPGA y la secuencia SSK de estados de conmutación siendo entonces una lista de N combinaciones SK_{a,k-1} de estados de conmutación previos elegidos y además la combinación SK_{a,k-1} de estados de conmutación elegida previa se fija como la combinación SK_{a,k} de estados de conmutación elegida mediante el FPGA y finalmente el paso (f) se aplica y los pasos (f1) a (o) se omiten en caso de que los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par asociado, los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator asociado y los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las m-2 curvas U_{NP} de tensión asociadas relativas a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo estén dentro del intervalo de valores prefijados respectivo. De esta manera se ahorra tiempo de cálculo ya que los pasos (b) y (c) y los pasos (f) a (o) se omiten. Se entiende que los pasos (b) a (o) se aplican y el paso (q) no se aplica en caso de que los criterios mencionados antes para los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$, $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$, $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las curvas no se cumplan.

Se ha mostrado ventajoso que para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par se elija una extrapolación lineal y que para la extrapolación de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator se elija una extrapolación cuadrática. En este caso al elegir la extrapolación cuadrática para la curva Φ de flujo magnético del estator junto con la elección de una extrapolación lineal para la curva M del par se hace posible una predicción especialmente exacta del comportamiento del sistema en conjunto de modo que la selección de la combinación SK_{a,k} de estados de conmutación se puede precisar aún más y así resulta una reducción adicional de la frecuencia de conmutaciones del interruptor electrónico de potencia. Alternativamente para $m \geq 3$ para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par y los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las m-2 curvas U_{NP} de la tensión respectivamente se puede elegir una extrapolación lineal y para la extrapolación de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ de flujo magnético del estator una extrapolación cuadrática resultando las mismas ventajas mencionadas.

Además es concebible que para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par y de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator respectivamente se elija una extrapolación lineal eligiéndose para $m \geq 3$ para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par, de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ del flujo magnético del estator, adicionalmente para la extrapolación de los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las curvas m-2 U_{NP} de tensión respectivamente una extrapolación lineal.

Otra posibilidad más consiste en que para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M del par y los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva del flujo magnético del estator respectivamente se elija una extrapolación cuadrática, eligiéndose para $m \geq 3$ para la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva M de par y de los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva Φ de flujo magnético del estator respectivamente una extrapolación cuadrática y adicionalmente para la extrapolación de los valores $U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$ de las m-2 curvas U_{NP} de tensión una extrapolación lineal.

Para el caso general de un circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión, siendo $m \geq 3$ el circuito convertidor 2 de corriente continua a corriente alterna, como se ha mencionado antes, presenta en el circuito 3 de tensión continua m-2 tomas NP intermedias. En relación con el paso (f) del procedimiento según la invención esto significa que para cada secuencia SSK de estados de conmutación se calculan adicionalmente m-2 curvas U_{NP} de tensión de las m-2 tensiones en las tomas NP intermedias mediante el FPGA. Además en relación con el paso (l) en caso de que las m-2 curvas U_{NP} de tensión para el instante k de muestreo superen un valor $y_{NP,max}$ límite superior prefijado del intervalo de valores o queden por debajo de un valor $y_{NP,min}$ límite inferior prefijado del intervalo de valores se calcule un valor $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error relativo a los valores $y_{NP,min}, y_{NP,max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores mediante el FPGA para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo para cada curva U_{NP} de tensión y en relación con el paso (m) se determine para cada secuencia SSK de estados de conmutación y para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo el valor v_{max} máximo adicionalmente a partir de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ del error de la tensión mediante el FPGA

Alternativamente a esto para $m \geq 3$ en relación con el paso (m) para cada secuencia SSK de estados de conmutación y para cada instante k de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se calcula adicionalmente la suma $S_{NP,v}$ de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error de la tensión y en relación con el paso (n) se construye entonces para cada secuencia SSK de estados de conmutación el valor v_{max} máximo adicionalmente a partir de la suma $S_{NP,v}$ de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error de tensión.

A continuación se entrará más en el cálculo de los valores $V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$ de error del par, de los valores $V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$ de error del flujo del estator y de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error de la tensión. En caso de que la curva M del par para el instante k de muestreo supere el valor $y_{M,max}$ límite superior prefijado del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores $V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$ de error del par relativo a los valores $y_{M,min}, y_{M,max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo según la siguiente fórmula:

$$v_{M,k}, \dots, v_{M,k+N} = \frac{M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N} - y_{M,max}}{y_{M,max} - y_{M,min}}$$

Si la curva M del par por contra en el instante k de muestreo queda por debajo del valor $y_{M,min}$ límite inferior del intervalo de valores el cálculo se hace el cálculo de los valores $V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$ de error del par relativo a los valores $y_{M,min}, y_{M,max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$v_{M,k}, \dots, v_{M,k+N} = \frac{y_{M,min} - M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}}{y_{M,max} - y_{M,min}}$$

siendo $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ los valores de la curva M del par para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo

En caso de que la curva Φ del flujo magnético del estator para el instante k de muestreo supere el valor $y_{S,max}$ límite superior prefijado del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores $V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$ de error del flujo del estator relativo a los valores $y_{S,min}, y_{S,max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo según la siguiente fórmula

$$v_{S,k}, \dots, v_{S,k+N} = \frac{f_{T,k}, \dots, f_{T,k+N} - y_{S,max}}{y_{S,max} - y_{S,min}}$$

Si la curva Φ del flujo magnético del estator por contra en el instante k de muestreo queda por debajo del valor $y_{S,min}$ límite inferior del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores $V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$ de error del flujo del estator relativo a los valores $y_{S,min}, y_{S,max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores relativo para los instantes de

muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula

$$v_{S,k}, \dots, v_{S,k+N} = \frac{y_{S,\min} - f_{T,k}, \dots, f_{T,k+N}}{y_{S,\max} - y_{S,\min}}$$

- 5 siendo $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ los valores de la curva Φ del flujo magnético del estator para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo

En caso de que las m-2 curvas U_{NP} de la tensión para el instante k de muestreo superen el valor $y_{NP,\max}$ límite superior prefijado del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error de la tensión relativo a los valores $y_{NP,\min}, y_{NP,\max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo según la siguiente fórmula

- 10

$$v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N} = \frac{U_{T,k}, \dots, U_{T,k+N} - y_{NP,\max}}{y_{NP,\max} - y_{NP,\min}}$$

Si las m-2 curvas NP de la tensión por contra en el instante k de muestreo quedan por debajo del valor $y_{NP,\min}$ límite inferior del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores $v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$ de error de la tensión relativo a los valores $y_{NP,\min}, y_{NP,\max}$ límites inferior y superior del intervalo de valores asociados para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula:

- 15

$$v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N} = \frac{y_{NP,\min} - U_{T,k}, \dots, U_{T,k+N}}{y_{NP,\max} - y_{NP,\min}}$$

- 20 siendo $U_{k}, \dots, U_{T,k+N}$ los valores de la curva U_{NP} de la tensión para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo.

En aras de la completitud hay que mencionar que si en general las curvas respectivas en el instante k de muestreo están dentro de la franja constituida por los valores límites superior e inferior asociados del intervalo de valores, el valor de error asociado para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se pone a cero.

- 25

Lista de números de referencia

- 30 1: máquina eléctrica rotativa
 2: circuito convertidor de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre niveles de tensión
 3: circuito de tensión continua
 35 4: sistema convertidor parcial
 5: primer grupo de conmutación
 40 6: segundo grupo de conmutación
 7: tercer grupo de conmutación

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para el control del funcionamiento de una máquina (1) eléctrica rotativa estando conectada la máquina eléctrica rotativa por fases con un circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna que presenta un circuito (3) de tensión continua para conmutar entre m niveles de tensión, siendo $m \geq 2$ con los pasos:

(a) conectar las fases (u, v, w) del circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna con el circuito (3) de tensión continua de acuerdo con una combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida de estados de conmutación de interruptores electrónicos de potencia del circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna,

(b) empezando en el instante k de muestreo para un número N elegible de puntos de muestreo determinar todas las combinaciones (SK_k, \dots, SK_{k+N}) de estados de conmutación admisibles para cada uno de los N instantes de muestreo, siendo $N \geq 1$

(c) construir las secuencias (SSK) de estados de conmutación para cada combinación (SK_k) de estados de conmutación determinada para el instante k de muestreo inicial siendo cada secuencia (SSK) de estados de conmutación una lista de combinaciones (SK_k, \dots, SK_{k+N}) de estados de conmutación determinadas asociadas para el instante k de muestreo inicial de la combinación (SK_k) de estados de conmutación respectiva de los N instantes de muestreo

caracterizado por que la selección de la combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación se hace en los siguientes pasos adicionales:

(d) determinación según el paso (b) y construcción según el paso (c) mediante un FPGA

(e1) cálculo de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado de la máquina (1) eléctrica rotativa y del circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante k+N de muestreo por medio de un procesador de señal digital

(e2) cálculo de que los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estado a partir de las secuencias (SSK) de estados de conmutación y a partir de los conjuntos $Y_{e,k}, \dots, Y_{e,k+N}$ de valores intermedios de estado calculados por medio del FPGA

(f) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación calcular una curva (M) de par de la máquina (1) eléctrica rotativa y una curva (Φ) de flujo magnético del estator de la máquina (1) eléctrica rotativa por medio del FPGA a partir de los conjuntos $X_{e,k}, \dots, X_{e,k+N}$ de valores de estado calculados para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo inicial hasta el instante k+N de muestreo

(f1) en caso de que la curva (M) del par en el instante k de muestreo no supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o no quede por debajo de un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores y en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator en el instante k de muestreo no supere un valor ($y_{s,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o no quede por debajo de un valor ($y_{s,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores elegir la combinación de estados de conmutación en los siguientes pasos:

(g) selección de las secuencias (SSK_a) de estados de conmutación mediante el FPGA en las que la curva (M) del par y la curva (Φ) del flujo magnético del estator asociadas en un instante k+N de muestreo respectivamente queden dentro del intervalo de valores prefijado o en las que los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ asociados a la curva (M) del par asociado y los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ asociados a la curva (Φ) del flujo magnético del estator relativos a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se aproxime respectivamente al intervalo de valores prefijado

(h) para cada secuencia (SSK_a) estados de conmutación elegida determinar el número n de instantes mediante el FPGA hasta que la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva (M) del par asociado o los valores $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ de la curva del flujo magnético del estator relativa al instante (k+N-1) de muestreo y el instante (k+N) de muestreo quede fuera del intervalo de valores prefijado respectivo

(i) para cada secuencia (SSK_a) de estados de conmutación elegida determinar el número s total de transiciones de conmutación de las combinaciones (SK_k, \dots, SK_{k+N}) de estados de conmutación determinadas asociadas por medio del FPGA

(j) para cada secuencia (SSK_a) estados de conmutación elegida calcular un valor c de bondad a partir del número n de instantes y del número s total de transiciones de conmutación por medio del FPGA

(k) fijar la combinación (SK_k) estados de conmutación determinada en el instante k de muestreo inicial para la que el valor c de bondad de la secuencia (SSK) de estados de conmutación elegida sea mínimo como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida por medio del FPGA

(l) en caso de que la curva (M) de par en el instante de muestreo supere un valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado de un intervalo de valores o quede por debajo de un valor ($y_{M,min}$) límite inferior prefijado de un intervalo de valores calcular un valor ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par relativo a los valores ($y_{M,min}$ $y_{M,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores mediante el FPGA para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo, en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator en el instante k de muestreo supere un valor ($y_{s,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o quede por debajo del valor ($y_{s,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores calcular el valor

($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo magnético del estator relativo a los valores ($y_{S,\min}, y_{S,\max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores mediante el FPGA para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo, elegir la combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación en los siguientes pasos (m) a (o):

5 (m) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación y para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo determinar el valor (v_{\max}) máximo a partir de los valores ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par y de los valores ($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo magnético del estator por medio del FPGA

10 (n) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación hacer la suma (S) de los valores (v_{\max}) máximos mediante el FPGA

(o) imponer la combinación (SK_k) de estados de conmutación determinada para el instante k de muestreo inicial por medio del FPGA para la que la suma ($S_{v_{\max}}$) de los valores (v_{\max}) máximos sea mínima como combinación de estados de conmutación elegida

15 (p) repetición de los pasos (a) a (o), siendo $k=k+1$

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado por que** para $m \geq 3$ el circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión presenta m-2 tomas (NP) intermedias en el circuito (3) de tensión continua y en relación con el paso (f) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación se calculan adicionalmente m-2 curvas (U_{NP}) de las tensiones en las m-2 tomas (Np) intermedias por
 20 mediante el FPGA, y **por que** respecto al paso (g) las secuencias (SSK_a) de estados de conmutación se eligen mediante el FPGA en las que las m-2 curvas (U_{NP}) de tensión adicionalmente asociadas en el instante (k+N) de muestreo respectivamente queden dentro del intervalo de valores prefijado o en las que adicionalmente los valores ($U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$) de las m-2 curvas (U_{NP}) de tensión asociadas en relativos a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se aproxime al intervalo de valores prefijado respectivo y
 25 **por que** en relación con el paso (h) para cada secuencia (SSK_a) de estados de conmutación elegida el número n de puntos se determine mediante el FPGA hasta que la extrapolación de los valores $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ de la curva (M) del par asociado o los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator o los valores ($V_{NP,k}, \dots, V_{NP,k+N}$) de las m-2 curvas (U_{NP}) de la tensión relativos al instante (k+N-1) de muestreo y al instante (k+N) de muestreo queden fuera del intervalo de valores prefijado respectivo.

30

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado por** el paso (q) adicional

Omitir los pasos (b) y (c) y construir una secuencia (SSK) de estados de conmutación para la combinación ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegida previa por medio del FPGA siendo la secuencia (SSK) de estados de conmutación una lista de las N combinaciones ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegidas
 35 previas y fijar la combinación ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegida previa como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida por medio del FPGA y aplicar el paso (f) y omitir los pasos (f1) a (o) en caso de que los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par asociado y los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator asociados relativos a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo queden dentro del intervalo de valores prefijado respectivo

40

4. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2 **caracterizado por** el paso (q) adicional

Omitir el paso y los pasos (b) y (c) y construir la secuencia (SSK) de estados de conmutación para la combinación ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegida previa mediante el FPGA siendo la secuencia (SSK) de estados de conmutación una lista de N combinaciones ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegida previa y fijar la combinación ($SK_{a,k-1}$) de estados de conmutación elegida previa como combinación ($SK_{a,k}$) de estados de conmutación elegida mediante el FPGA y aplicar el paso (f) y omitir los pasos (f1) a
 45 (o) en caso de que los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par asociado o los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator asociado y los valores ($U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$) de las m-2 curvas de la tensión asociadas relativos a los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo queden dentro del intervalo de valores prefijado respectivo

50

5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 4 **caracterizado por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par y de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator se elige respectivamente una extrapolación lineal.

55

6. Procedimiento acuerdo con una de las reivindicaciones 2 a 4 **caracterizado por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par, de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator y de los valores ($U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$) de las m-2 curvas (U_{NP}) de tensión se elige respectivamente una extrapolación lineal.

60

7. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1-4 **caracterizado por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva del par y los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator se elige respectivamente una extrapolación cuadrática.

65

8. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 2-4 **caracterizada por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par y los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator se elige respectivamente una extrapolación cuadrática y para los valores ($U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$) de la curva (U_{NP}) de tensión se elige una extrapolación lineal.

5 9. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1-4 **caracterizado por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par se elige una extrapolación lineal y que para la extrapolación de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator se elige una extrapolación cuadrática.

10 10. Procedimiento acuerdo con una de las reivindicaciones 2-4 **caracterizado por que** para la extrapolación de los valores ($M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$) de la curva (M) del par y los valores ($U_{NP,k}, \dots, U_{NP,k+N}$) de la curva (U_{NP}) de la tensión se elige una extrapolación lineal y que para la extrapolación de los valores ($\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$) de la curva (Φ) del flujo magnético del estator se elige una extrapolación cuadrática.

15 11. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 10 **caracterizado por que** el valor c de bondad se calcula dividiendo el número s total de transiciones de conmutación entre el número n total de instantes.

12. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 **caracterizado por que** el circuito convertidor (2) de corriente continua a corriente alterna para conmutar entre m niveles de tensión presenta tomas (NP) intermedias en el circuito (3) de tensión continua y en relación con el paso (f) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación se calculan adicionalmente m-2 curvas (U_{NP}) de tensión en las tomas intermedias mediante el FPGA, y **por que** en relación con el paso (l) en caso de que las m-2 curvas (U_{NP}) de tensión en el instante k de muestreo superen un valor ($y_{NP,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores o queden por debajo de un valor ($y_{NP,min}$) límite inferior prefijado del intervalo de valores se calcula un valor ($V_{NP,k}, \dots, V_{NP,k+N}$) de error de tensión relativo a los valores ($y_{NP,min}, y_{NP,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores por medio del FPGA para los instantes de muestreo desde el instante k hasta el instante k+N de muestreo para cada curva (U_{NP}) de tensión y **por que** en relación con el paso (m) para cada secuencia (SSK) de estados de conmutación y para cada instante de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo se determina el valor (V_{max}) máximo adicionalmente a partir de los valores ($V_{NP,k}, \dots, V_{NP,k+N}$) de error de la tensión mediante el FPGA.

13. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 12 **caracterizado por que** la curva (M) del par en el instante k de muestreo si supera el valor ($y_{M,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores el cálculo del valor ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par relativo a los valores ($y_{M,min}, y_{M,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores se hace para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N} = \frac{M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N} - y_{M,max}}{y_{M,max} - y_{M,min}}$$

y que en caso de que la curva M del par en el instante k de muestreo quede por debajo del valor ($y_{M,min}$) límite inferior del intervalo de valores se hace el cálculo de valores ($V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N}$) de error del par relativo a los valores ($y_{M,min}, y_{M,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$V_{M,k}, \dots, V_{M,k+N} = \frac{y_{M,min} - M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}}{y_{M,max} - y_{M,min}}$$

siendo $M_{T,k}, \dots, M_{T,k+N}$ los valores de la curva (M) del par para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo.

14. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1, 12 ó 13 **caracterizado por que** en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator para el instante k de muestreo supere el valor ($y_{S,max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores ($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo del estator relativo a los valores ($y_{S,min}, y_{S,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo según la siguiente fórmula

$$V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N} = \frac{f_{T,k}, \dots, f_{T,k+N} - y_{S,max}}{y_{S,max} - y_{S,min}}$$

y que en caso de que la curva (Φ) del flujo magnético del estator en el instante k de muestreo quede por debajo del valor ($y_{S,min}$) límite inferior del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores ($V_{S,k}, \dots, V_{S,k+N}$) de error del flujo magnético del estator relativo a los valores ($y_{S,min}, y_{S,max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula

$$v_{S,k}, \dots, v_{S,k+N} = \frac{y_{S,\min} - f_{T,k}, \dots, f_{T,k+N}}{y_{S,\max} - y_{S,\min}}$$

siendo $\Phi_{T,k}, \dots, \Phi_{T,k+N}$ los valores de la curva (Φ) del flujo magnético del estator para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo.

5 15. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12 **caracterizado por que** en caso de que las m-2 curvas (U_{NP}) de la tensión para el instante k de muestreo supere el valor ($y_{NP,\max}$) límite superior prefijado del intervalo de valores se hace el cálculo de los valores ($v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$) de error de la tensión relativo a los valores ($y_{NP,\min}, y_{NP,\max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el
10 instante k+N de muestreo según la siguiente fórmula

$$v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N} = \frac{U_{T,k}, \dots, U_{T,k+N} - y_{NP,\max}}{y_{NP,\max} - y_{NP,\min}}$$

y que en caso de que las curvas (U_{NP}) de la tensión en el instante k de muestreo quede por debajo del valor ($y_{NP,\min}$) límite inferior del intervalo de valores se hace el cálculo de valores ($v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N}$) de error relativo a los valores
15 ($y_{NP,\min}, y_{NP,\max}$) límites inferior y superior del intervalo de valores para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$v_{NP,k}, \dots, v_{NP,k+N} = \frac{y_{NP,\min} - U_{T,k}, \dots, U_{T,k+N}}{y_{NP,\max} - y_{NP,\min}}$$

20 siendo $U_{T,k}, \dots, U_{T,k+N}$ los valores de la curva U_{NP} de la tensión para los instantes de muestreo desde el instante k de muestreo hasta el instante k+N de muestreo.

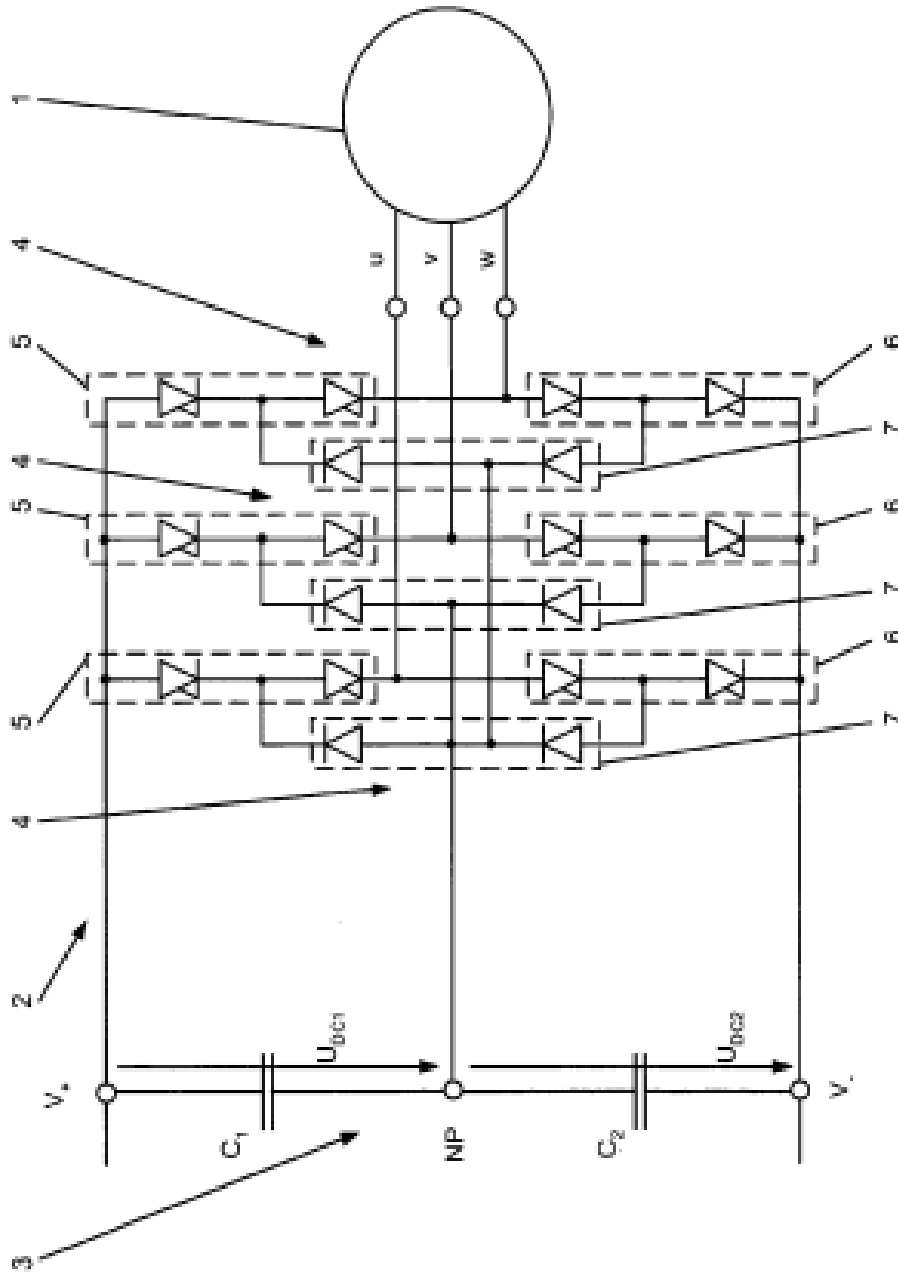


Fig. 1

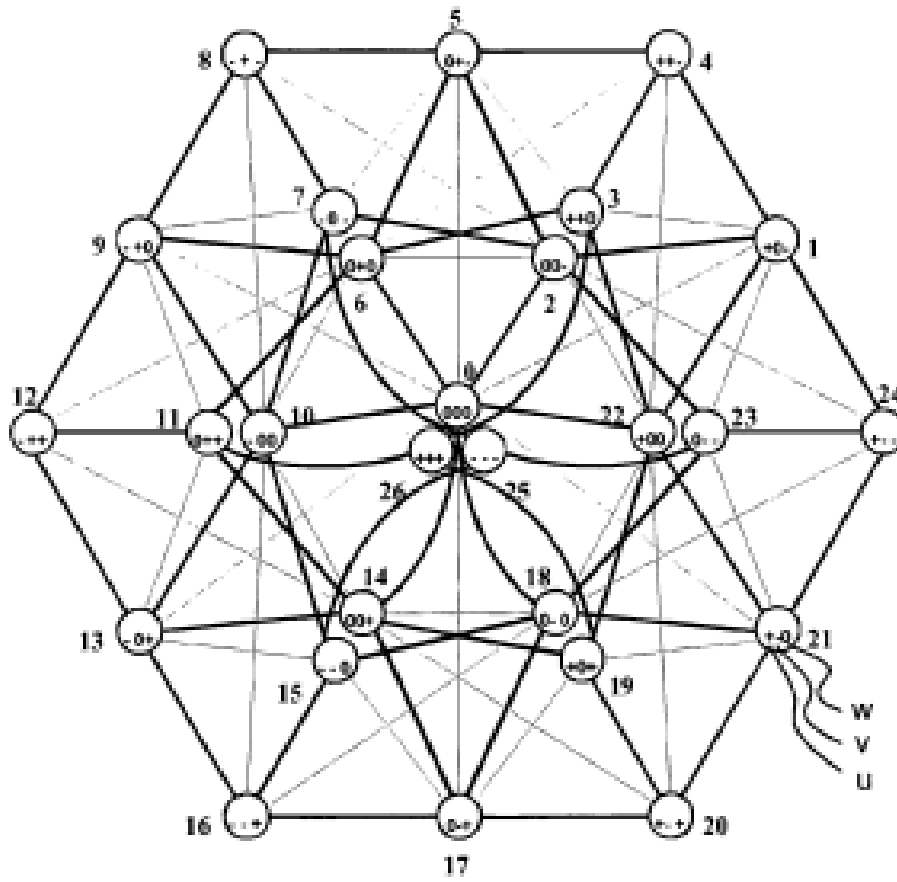


Fig. 2

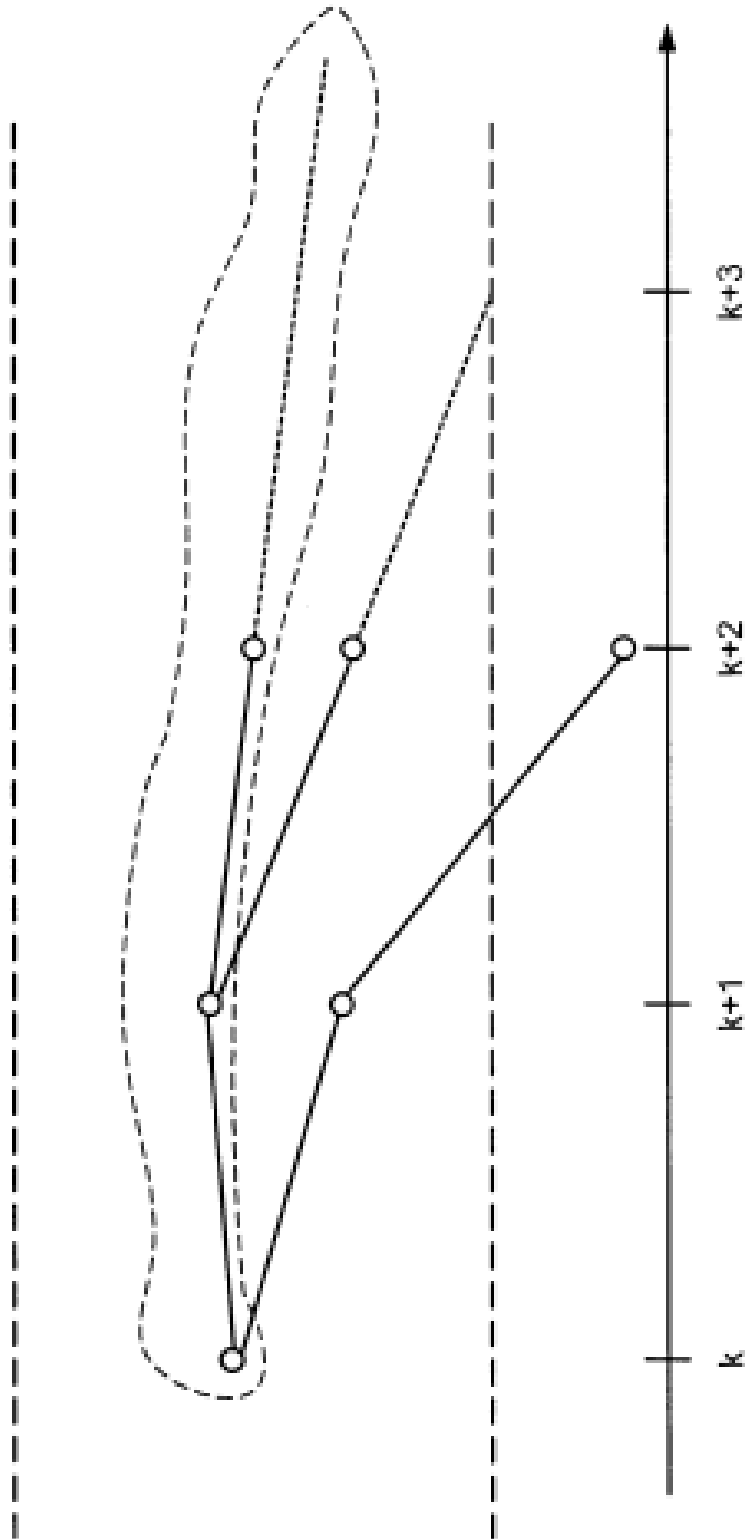


Fig. 3