

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 509**

51 Int. Cl.:

H02P 23/00 (2006.01)

H02P 27/12 (2006.01)

H02M 5/45 (2006.01)

H02P 27/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.01.2010 E 10151370 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **27.07.2011 EP 2348631**

54 Título: **Control de una máquina eléctrica giratoria**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.02.2013

73 Titular/es:

**ABB RESEARCH LTD. (100.0%)
Affolternstrasse 44
8050 Zürich, CH**

72 Inventor/es:

GEYER, TOBIAS

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 395 509 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

Control de una máquina eléctrica giratoria

Campo de la invención

5 Esta invención se refiere al campo de los procedimientos de funcionamiento de máquinas eléctricas giratorias. En particular, la invención se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una máquina eléctrica giratoria, a un control para un convertidor eléctrico, a un sistema de motor, a un programa de ordenador y a un medio legible por ordenador.

Antecedentes de la invención

10 El control directo del par motor (Direct Torque Control DTC) es un procedimiento para el control del par motor y del flujo electromagnético en máquinas electromagnéticas giratorias y motores, en particular en la zona de la tensión media. Un ejemplo típico de un control de este tipo se puede encontrar, por ejemplo, en el accionamiento del ACS 6000 de ABB. A través de los últimos 10 años, el DTC ha mostrado una alta fiabilidad, robustez y capacidad de potencia.

15 Sin embargo, las pérdidas de conmutación, que se producen a través de la conmutación de semiconductores a través del control y que representan una gran parte o incluso la parte principal de la pérdida general del accionamiento, en el DTC pueden ser considerables. Por lo tanto, se buscan caminos para reducir estas pérdidas de conmutación. Se sabe que se puede conseguir una reducción de este tipo de pérdidas de conmutación a través del llamado control directo de par motor predecible con modelo (Model Predictive Direct Torque Control, MPDTC), que se puede basar en un modelo (matemático) del accionamiento. Los documentos US 7.256.561 y EP 1 670 135 describen un procedimiento de este tipo.

Además de la reducción al mínimo de las pérdidas de conmutación de convertidores, el DTC y el MPDTC se pueden utilizar también para mantener las tres variables de partida o bien magnitudes de partida de la máquina eléctrica giratoria, a saber, el par motor electromagnético, la magnitud del flujo del estator y el potencial de punto neutro o bien potenciales del punto neutro, dentro de límites (de histéresis) predeterminadas.

25 El MPDTC se basa en un algoritmo de control, que puede comprender un modelo matemático, que está adaptado al convertidor a conectar y a la máquina o bien motor conectados en él. En este caso, se listan especialmente las secuencias de conmutación admisibles del convertidor sobre un horizonte de conmutación determinado y se calculan las trayectorias correspondientes del par motor, del flujo del estator y de los potenciales del punto medio del circuito intermedio utilizando un modelo interno del convertidor y de la máquina. Existen también convertidores con más de un punto neutro. También existen convertidores, que presentan otras magnitudes, que deben regularse en determinadas circunstancias, hasta que se ha alcanzado un límite para las magnitudes de partida respectivas. Las secuencias de conmutación admisibles se evalúan con la ayuda de un criterio de calidad previsto. Este criterio de calidad reproduce, por ejemplo, las pérdidas de conmutación o la frecuencia de conmutación del convertidor. En una última etapa se determina una secuencia de conmutación óptima, que reduce al mínimo este criterio de calidad, por lo tanto, por ejemplo, prepara pérdidas de conmutación mínimas o una frecuencia de conmutación mínima. Las etapas que se acaban de mencionar se realizan, en general, en cada ciclo de control y de la secuencia de conmutación óptima se utiliza solamente la primera etapa (es decir, la primera transición de conmutación o bien estado de conmutación) para el control de los semiconductores de potencia del convertidor.

Además, el MPDTC ha sido descrito en las siguientes publicaciones:

- 40
- "Model Predictive Direct Torque Control of a variable speed drive with a five-level inverter" INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 3 de Noviembre de 2009, páginas 1203-1208, ISBN: 978-1-4244-4648-3
 - 45 - "Generalized Model Predictive Direct Torque Control: Long prediction horizons and minimization of switching losses" DECISION AND CONTROL, 2009 held jointly with the 2009 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Proceedings of the 48th IEEE conference on, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 15 de Diciembre de 2009, páginas 6799-6804, ISBN: 978-1-4244-3871-6
 - "Model Predictive Direct Torque Control Part I: Concept, Algorithm, and Anaysis" IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, USA, Col. 56, Nr. 6, 1 de Junio 2009, páginas 1894-1905, ISSN: 0278-0046.
- 50

Resumen de la invención

55 Una reducción de las pérdidas de conmutación puede proporcionar una reducción significativa de los costes de funcionamiento del accionamiento. Además, una reducción de este tipo de las pérdidas de conmutación puede conducir a un sistema más robusto y más fiable y a la ampliación del campo de aplicación de TC, puesto que la reducción de las pérdidas de conmutación permite accionar el mismo equipo con potencia más elevada.

El cometido de la invención es preparar accionamientos eléctricos con costes de funcionamiento reducidos y potencia elevada.

5 Este cometido se soluciona a través del objeto de las reivindicaciones independientes. Otras formas de realización de la invención se deducen a partir de las reivindicaciones dependientes.

Un primer aspecto de la invención se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una máquina eléctrica giratoria.

10 De acuerdo con una forma de realización de la invención, la máquina eléctrica giratoria es alimentada con corriente eléctrica por un convertidor desde un circuito de tensión continua a través de al menos una fase. El convertidor está realizado para conmutar la al menos una fase al menos a dos niveles de la tensión.

15 La máquina eléctrica giratoria puede ser un motor eléctrico o un accionamiento eléctrico, que puede comprender el motor eléctrico y el convertidor. La máquina eléctrica giratoria puede comprender el convertidor y/o un control. En general, una máquina eléctrica giratoria comprende tres fases (corriente trifásica). Pero también es posible que estén presentes solamente una fase o una pluralidad de fases.

20 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende las etapas: generación de secuencias de conmutación, en la que cada secuencia de conmutación comprende una secuencia de transiciones de conmutación del convertidor con una primera transición de conmutación; evaluación de cada una de las secuencias de conmutación con un valor de calidad; selección de la secuencia de conmutación con un valor de calidad mínimo; activación de los elementos de conmutación del convertidor con la primera transición de conmutación de la secuencia de conmutación seleccionada como transición de conmutación seleccionada, de
25 manera que al menos una fase es conmutada a un nivel de la tensión correspondiente a la transición de conmutación.

30 Una transición de conmutación se puede definir en este caso a través de estados de conmutación de los estados de conmutación individuales. Por ejemplo, una transición de conmutación comprende una combinación de estados de conmutación de elementos de conmutación del convertidor. Los elementos de conmutación del convertidor pueden ser semiconductores, por ejemplo tiristores, IGCTs, o IGBTs.

35 Una secuencia de conmutación puede ser, por ejemplo, un vector $U = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)]$, en el que las transiciones de conmutación están definidas con combinación del estado de conmutación u . u contiene para cada elemento de conmutación a controlar un elemento de estado de conmutación, que describe el estado de conmutación, es decir, por ejemplo 1, 0 ó -1. Éstas pueden ser las posiciones del conmutador.

40 De acuerdo con una forma de realización de la invención, las secuencias de conmutación son generadas de la siguiente manera: (a) generación de una secuencia de conmutación más larga a partir de una secuencia de conmutación más corta, colgando en la secuencia de conmutación más corta al menos una transición de conmutación posible para generar una secuencia de conmutación más larga; (b) cálculo de magnitudes de partida de la máquina eléctrica, del convertidor y/o del accionamiento para la secuencia de conmutación más larga, sobre la base de las transiciones de conmutación de la secuencia de conmutación más larga; (c) desecho de la secuencia de conmutación más larga, en el caso de que las magnitudes de partida (o bien al menos una magnitud de partida) calculadas no estén dentro de límites previamente definidos y/o las magnitudes de partida calculadas se alejen de un límite previamente definido a medida que transcurre el tiempo.
45

50 La secuencia de conmutación más corta tiene, por ejemplo, la longitud m y la secuencia de conmutación más larga tiene, por ejemplo, la longitud n , siendo $n \geq m+1$. En el caso de que la secuencia de conmutación contenga elementos de pausa, la secuencia de conmutación más larga puede ser más de una etapa mayor que la secuencia de conmutación más corta. No obstante, también es posible el caso $n = m + 1$.

55 De acuerdo con una forma de realización de la invención, se inicializa una primera secuencia de conmutación o secuencia de conmutación inicial (de la longitud 0) con una transición de conmutación previamente seleccionada. En este caso, la primera secuencia de conmutación es la secuencia de conmutación más larga, para la que se realizan las etapas (b) y (c).

60 De acuerdo con una forma de realización de la invención, se generan otras secuencias de conmutación, que son especialmente más largas que n , para las que se genera la secuencia de conmutación más larga no desechada según las etapas (a) a (c).

Con otras palabras, se genera iterativamente un árbol de transiciones de conmutación, en el que cada secuencia se conmutación se puede dar a través del recorrido desde la raíz del árbol hasta una hoja del árbol. Las magnitudes de partida a calcular pueden ser en este caso el par motor o el flujo de la máquina eléctrica giratoria o el o los

potenciales del punto medio del circuito intermedio de corriente continua en el convertidor o también la(s) tensión(es) sobre capacidades o la corriente o las corrientes a través de bobinas del convertidor. Las magnitudes de partida pueden ser magnitudes dependientes del tiempo y se calculan para un intervalo, que comienza en el instante actual y se extiende durante un cierto tiempo en el futuro.

5 Es decir, que en una máquina eléctrica giratoria o bien en un accionamiento se pueden reducir al mínimo las pérdidas de conmutación con un procedimiento de control iterativo, que calcula previamente estados de conmutación óptimos o bien secuencias de conmutación óptimas.

10 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende: generar secuencias de conmutación admisibles (más largas) a partir de secuencias de conmutación admisibles más cortas a través de la adhesión de transiciones de conmutación a la secuencia de conmutación más corta por medio de un algoritmo recursivo o bien iterativo. El algoritmo puede ser inicializado con una secuencia de conmutación de la longitud 0 a partir de una transición de conmutación seleccionada previamente (o bien la transición de conmutación que se encuentra actualmente en el convertidor). La fiabilidad de la secuencia de conmutación más larga se puede realizar a través de simulación o aproximación de al menos una magnitud de partida, que debe cumplir, por ejemplo, las reglas mencionadas anteriormente.

15 Esta determinación óptima iterativa de las secuencias de conmutación se realiza, en general, por cada ciclo de conmutación del convertidor.

20 El algoritmo o bien el procedimiento se pueden procesar de forma secuencial, es decir, que en lugar de generar en primer lugar las secuencias de conmutación y generar luego las trayectorias correspondientes de las magnitudes de partida, se forman las secuencias de conmutación paso a paso, ramificando o bien anexionando transiciones de conmutación admisibles.

25 A tal fin se puede utilizar, por ejemplo, una memoria de apilamiento. Un apilamiento o bien una memoria de apilamiento puede ser en este caso una memoria, en la que se puede colocar por medio de una función ("Impulso") un objeto (aquí una secuencia de conmutación) sobre el apilamiento y se puede recuperar por medio de otra función ("Pop") el objeto más alto que se encuentra sobre la pila de objetos. El algoritmo se puede implementar con una función recursiva junto con una memoria de apilamiento.

30 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento MPDTC o bien el algoritmo MPDTC se pueden basar en un modelo de apilamiento Primero en entrar – Primero en salir. El algoritmo comienza en la etapa de tiempo actual k. Entonces el algoritmo investiga iterativamente el árbol de secuencias de conmutación admisibles hacia delante en el tiempo. En cada etapa intermedia, todas las secuencias de conmutación deben presentar trayectorias de las magnitudes de partida, que son admisibles. Las secuencias de conmutación admisibles se pueden llamar también secuencias candidatas o secuencias de conmutación candidatas. Las secuencias de conmutación admisibles pueden ser secuencias de conmutación, cuyas magnitudes de partida reencuentran dentro de sus límites correspondientes o apuntan en la dirección correcta o bien se aproximan a un límite. Los dos últimos casos se refieren a este respecto a que una variable de partida o bien una magnitud de partida no está necesariamente dentro de los límites admisibles, pero el grado de infracción del límite se reduce con cada etapa de tiempo dentro del horizontal.

35 Una secuencia de conmutación candidata, es decir, una secuencia de conmutación no desechada, da como resultado trayectorias de magnitudes de partida, que cumplen en cada etapa de tiempo las reglas correspondientes de la etapa (c). De esta manera, se puede asegurar que los límites predeterminados se mantienen en cada instante durante un funcionamiento estacionario de la máquina eléctrica giratoria. A través de esta medida se puede reducir la THD (Distorsión Armónica Total) del par motor.

40 Es posible que se aplique una combinación de las condiciones o reglas mencionadas anteriormente para la variable de partida o magnitudes de partida. Por ejemplo, una secuencia de conmutación puede ser admisible cuando el par motor y el potencial del punto medio se encuentran dentro de sus límites pre-definidos y el flujo del estator apunta en la dirección correcta.

45 La complejidad de cálculo del procedimiento MPDTC está en relación directa con el número de las transiciones de conmutación admisibles, que son predeterminadas a través de la topología del convertidor principalmente a través del número de los niveles de la tensión, que puede generar el convertidor) y la longitud del horizontal de conmutación o del horizonte de previsión de la secuencia de conmutación. Un horizonte de previsión se puede definir en este caso como la longitud de una secuencia de conmutación, es decir, el número de las etapas de tiempo, que se necesitan para la ejecución de la secuencia de conmutación.

50 Los horizontes de conmutación argos elevan la capacidad de potencia de MPDTC en una medida esencial, reduciendo las pérdidas de conmutación y/o la distorsión armónica total de la corriente o del par motor (THD,

Distorsión Armónica Total). No obstante, también pueden conducir a una carga de cálculo grande, puesto que el número de las secuencias de conmutación posibles se puede explorar de forma combinada. Por lo tanto, hasta ahora solamente era posible implementar y ejecutar MPDTC en un hardware, cuando el algoritmo ha sido limitado a horizontes de conmutación muy cortos, como por ejemplo con la longitud 1 ó 2. La presente invención posibilita reducir la carga de cálculo para MPDTC con horizontes de conmutación largos.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, el valor de calidad se basa en las pérdidas de conmutación previsible del convertidor o de la frecuencia de conmutación previsible de convertidor en la secuencia de conmutación respectiva. En general, se aplica que cuanto menor es el valor de calidad, tanto menos aparecen las pérdidas de conmutación.

Varias transiciones de conmutación generan una pluralidad de manipulaciones de conmutación de los elementos de conmutación del convertidor, con lo que se eleva la frecuencia de conmutación de los elementos de conmutación. Pero tal frecuencia de conmutación alta genera especialmente en semiconductores de potencia como elementos de conmutación pérdidas de calor (a través de las pérdidas de conmutación), con lo que los semiconductores de potencia pueden envejecer, dañarse o incluso destruirse más rápidamente. En general, las pérdidas de conmutación del convertidor se pueden estimar también indirectamente a través de la pérdida de conmutación.

También es posible que la función de calidad, es decir, la función, con la que se calcula el valor de calidad de una secuencia de conmutación, sea una función de las etapas de tiempo de la secuencia de conmutación (es decir, de la longitud de la secuencia de conmutación) y del número total de las transiciones de conmutación.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, la función de calidad es una función de la suma de las pérdidas de conmutación, que se producen a través de las transiciones de conmutación individuales, y de la longitud del horizonte de conmutación y/o del horizonte de previsión y/o de la longitud de la secuencia de conmutación. Las pérdidas de conmutación se pueden calcular sobre la base de las corrientes del estator de la máquina eléctrica giratoria y/o del convertidor, que son una función de los flujos del estator y del rotor. En el caso de que el control presente un modelo matemático interno de la máquina eléctrica giratoria y/o del convertidor, estos flujos o las corrientes del estator pueden ser un componente principal de este modelo. De acuerdo con esta forma de realización, también es posible reducir las pérdidas de conmutación claramente (hasta 22 %) frente a la función de calidad sencilla, que se basa en la frecuencia de conmutación. Estos cálculos se pueden realizar "fuera de línea" y los resultados se pueden registrar en una tabla de consulta, a la que puede acceder el procedimiento durante el funcionamiento de la máquina.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, las secuencias de conmutación contienen como consecuencia de las transiciones de conmutación unos elementos de pausa, de manera que un elemento de pausa define una pausa de conmutación después de una transición de conmutación. A través de pausas entre las transiciones de conmutación se puede reducir adicionalmente las pérdidas de conmutación.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, la pausa de conmutación se calcula a través del cálculo de magnitudes de partida, En este caso, el cálculo de magnitudes de partida se puede basar en un modelo matemático de la máquina eléctrica giratoria, del convertidor y/o del accionamiento o en una aproximación. En general, las magnitudes de partida deberían moverse durante la pausa de conmutación dentro de sus límites o cumplir las reglas mencionadas anteriormente.

Un modelo matemático de accionamiento del convertidor y de la máquina eléctrica giratoria se puede utilizar para calcular el número de las etapas, en el que la primera trayectoria de una magnitud de partida (o bien par motor, flujo o potencial del punto medio) incide en uno de los límites pre-definidos o bien se aproxima a éstos. Esto puede elevar la exactitud de la previsión y, por lo tanto, el rendimiento de control del procedimiento (por ejemplo, con respecto a las pérdidas de conmutación y el par motor).

De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: generar una secuencia de conmutación a partir de transiciones de conmutación y elementos de pausa sobre la base de un horizonte de conmutación generalizado, que define en qué secuencia se añaden transiciones de conmutación y elementos de pausa a la secuencia de conmutación.

A través de los elementos de pausa debe conseguirse que se conmute lo menos posible para mantener las pérdidas de conmutación lo más reducidas posible. La longitud de las pausas de conmutación se puede determinar a través del procedimiento y se puede orientar a que las magnitudes de partida del accionamiento cumplan las reglas predefinidas mencionadas anteriormente.

Para la creación de las secuencias de conmutación se puede utilizar un horizonte de conmutación generalizado. El horizonte de conmutación generalizado puede comprender una pluralidad de elementos de conmutación (que definen que en la posición correspondiente en la secuencia de conmutación puede existir una transición de

- conmutación). Entre, antes y después de los elementos de conmutación, el horizonte de conmutación generalizado puede comprender elementos de pausa. Para describirlo, se utiliza una anotación con “S” y “E” o bien “c” (los elementos de pausa se pueden concebir también como elementos de extrapolación o elementos de ampliación). Un ejemplo de un horizonte de conmutación generalizado es “SSESE”. Con un horizonte de conmutación generalizado se pueden reducir las pérdidas de conmutación hasta el 20 %, en comparación con un horizonte de conmutación sencillo de la longitud dos.
- Adicionalmente, un horizonte de conmutación generalizado puede comenzar con el elemento de pausa “e”, que representa una pausa de espera opcional al comienzo de la secuencia de conmutación. Esta pausa de espera se puede determinar de una manera similar a las pausas de espera de elemento de pausa “E”. De esta manera, se puede prolongar claramente el horizonte de previsión, de manera que se puede realizar una previsión más exacta. De esta manera se reducen, en general, las pérdidas de conmutación.
- El horizonte de conmutación generalizado con su límite superior que se basa en el número de las transiciones de conmutación y las etapas de espera se puede considerar como una alternativa a un horizonte de predicción o bien de previsión sencillo fijo con un número fijo de etapas de tiempo. El horizonte de conmutación generalizado puede conducir a una longitud variable en el tiempo de las secuencias de conmutación y, por lo tanto, a horizontes de predicción de diferente longitud.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, durante el cálculo de magnitudes de partida se determina en qué instante en el futuro una trayectoria de una magnitud de salida incide en un límite superior o inferior predefinido.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, la determinación del instante de realiza de forma analítica, utilizando un procedimiento de optimización para la determinaciones de lugares de anulación, a través de aproximación de función trigonométrica a través de series de Taylor y/o a través de aproximación de función trigonométrica a través de funciones polinomiales unitarias.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, la resistencia del flujo del estator influye en la determinación del instante en el cálculo.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, el cálculo de trayectorias de magnitudes de partida se basa en un modelo matemático de la máquina giratoria o del accionamiento o en una interpolación. En oposición a la extrapolación, la interpolación tiene la ventaja de que los puntos extremos de la trayectoria coinciden mejor con la realidad que en el caso de una extrapolación.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, las magnitudes de partida son interpoladas en un intervalo de tiempo, que comprende un número predeterminado, por ejemplo al menos 10, de etapas de tiempo discretas.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, en el intervalo o bien en sus bordes se calculan para al menos tres instantes las magnitudes de partida con el modelo matemático.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, la interpolación se realiza con un polinomio cuadrado.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: calcular un valor de calidad para la secuencia de conmutación (especialmente no desechada) de la longitud n durante la iteración.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: calcular un límite inferior para valores de calidad sobre la base de valores de calidad ya calculados de secuencias de conmutación completas.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: desechar secuencias de conmutación, cuyo valor de calidad excede el límite inferior para valores de calidad o bien cuyo valor de calidad es mayor que el límite inferior para valores de calidad.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: calcular el valor de calidad utilizando un límite superior para una longitud prevista máxima de una secuencia de conmutación o de su horizonte de previsión.
- De acuerdo con una forma de realización de la invención, en primer lugar, es decir, al comienzo o antes de la recursión, se calcula el valor de calidad de una secuencia de conmutación prometedor. Una secuencia de conmutación prometedor puede ser en este caso una secuencia de conmutación, que ya había sido prevista antes del procedimiento de iteración con un valor de calidad bueno o bien ya se había calculado para esta secuencia un valor de calidad bueno antes del procedimiento de iteración.

De acuerdo con una forma de realización de la invención, la secuencia de conmutación prometedora se basa en una secuencia de conmutación óptima de un ciclo de control precedente.

5 De acuerdo con una forma de realización de la invención, la secuencia de conmutación prometedora se basa en una secuencia de conmutación óptima, que ya ha sido calculada en una etapa de optimización precedente con un horizonte de conmutación más corto que un horizonte de conmutación actual.

10 De acuerdo con una forma de realización de la invención, a tal fin se puede aplicar un procedimiento de dos fases. En primer lugar (en una primera etapa) se soluciona el problema de la optimización con un horizonte de conmutación corto, por ejemplo "eSE", por ejemplo con un procedimiento o algoritmo descrito anteriormente y a continuación. Luego se utiliza en una segunda etapa un horizonte de conmutación más largo, que es más largo que el horizonte de conmutación corto, por ejemplo "eSSESE". El procedimiento descrito anteriormente y a continuación se realiza en este caso, por ejemplo, hasta que ha expirado el tiempo de cálculo disponible. Para la segunda etapa, se utiliza la solución de la primera etapa como valor de partida (algoritmo de "arranque en caliente", ver también más adelante).

15 El primer problema se puede solucionar relativamente rápido y se puede calcular una solución relativamente buena (secuencia de conmutación). Esta solución asegura que se envía un estado de conmutación al convertidor, que es conmutable, es decir, que contiene, por ejemplo, las limitaciones de conmutación del convertidor, y que asegura que las magnitudes de partida no se alejan de los límites definidos (se vuelven inestables) y que proporciona un rendimiento aceptable (pérdidas de conmutación relativamente bajas, etc.). Se puede asegurar que se puede solucionar el pequeño problema dentro del tiempo de cálculo disponible. En general, en la segunda etapa se encuentra una solución mejor, que se puede enviar al convertidor.

20 De acuerdo con una forma de realización de la invención, se calcula una secuencia de conmutación a investigar con máxima prioridad, siendo investigada la secuencia de conmutación con máxima prioridad durante la siguiente iteración (es decir, durante la siguiente etapa de iteración o bien en la misma etapa de iteración).

25 De acuerdo con una forma de realización de la invención, las secuencias de conmutación a investigar se clasifican según su prioridad.

30 De acuerdo con una forma de realización de la invención, la prioridad se realiza con la ayuda de una de las siguientes reglas: prioridad de secuencias de conmutación par las que existe una probabilidad más alta de que conduzcan a un valor de calidad más bajo; prioridad de secuencias de conmutación, para las que existe una probabilidad más alta de que mantengan las magnitudes de partida dentro de límites predefinidos y/o las magnitudes de partida se aproximan al límite predefinido a medida que aumenta el tiempo; prioridad de secuencias de conmutación, que presentan una transición de conmutación, para la que existe una probabilidad más alta de que conduzca a una secuencia de conmutación admisible o también a una secuencia de conmutación de alta calidad; prioridad de secuencias de conmutación, para las que se espera, en virtud de una estimación, que conduzcan a pausas de conmutación largas sin transiciones de conmutación; prioridad de secuencias de conmutación (incompletas) con la ayuda de sus valores de calidad; prioridad de secuencias de conmutación con la ayuda de su longitud.

45 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además, terminación de la generación de las secuencias de conmutación cuando han sido generadas todas las secuencias de conmutación hasta una longitud predeterminada. La longitud predeterminada puede ser en este caso la longitud del horizonte de conmutación o un horizonte de predicción predeterminado.

50 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: terminación de la generación de secuencias de conmutación cuando se ha alcanzado un límite superior para el número de las secuencias de conmutación generadas o ha expirado el tiempo de cálculo disponible.

55 De acuerdo con una forma de realización de la invención, el procedimiento comprende, además: terminación de la generación de secuencias de conmutación cuando se ha determinado una secuencia de conmutación, cuyo valor de calidad excede un valor inferior para valores de calidad menor que un porcentaje definido, por ejemplo 5 %. Con otras palabras, se puede realizar un MPDTC subóptimo, en el que, en efecto, no se determina la secuencia de conmutación óptima, sino una secuencia de conmutación buena. La motivación para realizar MPDTC subóptimo resulta a partir de lo siguiente:

60 Los horizontes de conmutación largos conducen a un comportamiento característico. En una búsqueda de ramificación y de limitación (que se describe en detalle más adelante), también con límites estrechos, se encuentra, sin embargo, la solución óptima o una solución que está próxima a la óptima muy rápidamente durante una búsqueda de árbol. A pesar de todo, una gran parte del tiempo de cálculo se utiliza para confirmar que se ha encontrado realmente el óptimo.

De esta manera resulta que cuando se detiene el algoritmo, antes de que se haya encontrado una confirmación de este tipo o también un certificado (es decir, que no existe ningún nodo no verificado con un valor de calidad menor que el valor de calidad actualmente mínimo) se ha encontrado ya probablemente el óptimo.

5 En el procedimiento MPDTC solamente se aplica la primera posición de conmutación o bien la primera transición de conmutación de la secuencia de conmutación sobre el accionamiento o bien su convertidor. De esta manera, solamente debe ser óptimo el primer elemento de la secuencia de conmutación, pero no necesariamente la parte restante de la secuencia de conmutación.

10 Además, se puede hallar rápidamente una buena secuencia de conmutación candidata con un horizonte de conmutación corto. Esta secuencia de conmutación corta sirve para comenzar por medio de un algoritmo de "arranque en caliente" descrito en detalle más adelante una búsqueda de árbol en un árbol con un horizonte de conmutación largo.

15 En resumen, en lugar de utilizar horizontes de conmutación cortos y asegurar que se halle la solución óptima en todas las circunstancias, puede ser mejor utilizar horizontes de conmutación largos (eventualmente generalizados) y aceptar soluciones subóptimas en todas las circunstancias, que conducen, sin embargo, en todas las circunstancias a un procedimiento MPDTC, que puede presentar un rendimiento mejorado.

20 Otro aspecto de la invención se refiere a un control para un convertidor eléctrico, que está realizado para ejecutar el procedimiento como se ha descrito anteriormente y se describe a continuación.

Otro aspecto de la invención se refiere a un convertidor, por ejemplo con un control, que está realizado para ejecutar el procedimiento como se ha descrito anteriormente y se describe a continuación.

25 Por ejemplo, el convertidor está conectado en su entrada en una tensión continua. El convertidor genera en su salida (varias fases o bien tres fases, corriente trifásica) tensión alterna. A tal fin se pueden utilizar elementos de conmutación (por ejemplo tiristores, IGCTs o IGBTs), que se conmutan por el control. Las tensiones pueden ser en este caso de un tamaño desde aproximadamente 100 V hasta 200 kV. Es decir, que el convertidor puede ser un
30 convertidor de baja tensión, de tensión media y de alta tensión. Las corrientes conmutadas por el convertidor pueden ser hasta 10.000 A.

En particular, el algoritmo de control o bien el procedimiento MPDTC se pueden emplear para cualquier convertidor de varios puntos.

35 Otro aspecto de la invención se refiere a un sistema de motor para una máquina eléctrica giratoria y un convertidor eléctrico con un control que está realizado para alimentar corriente a la máquina eléctrica giratoria y para realizar el procedimiento como se ha descrito anteriormente y se describe a continuación.

40 Otro aspecto de la invención se refiere a un programa de ordenador que, cuando se ejecuta en un procesador, instruye al procesador para realizar las etapas del procedimiento como se ha descrito anteriormente y se describe a continuación.

45 El programa de ordenador o bien el algoritmo de control MPDTC se puede implementar en un hardware de cálculo discrecional, que comprende, por ejemplo, DSPs y FPGAs.

Otro aspecto de la invención se refiere a un medio legible por ordenador, en el que está registrado el programa de ordenador.

50 Un medio legible por ordenador puede ser en este caso un disquete, un disco duro, un aparato de memoria USB, un RAM, una ROM, un CD, un DVD o una EPROM. Un medio legible por ordenador puede ser también una red de comunicaciones de datos, como por ejemplo Internet, que posibilita la descarga de un código de programa.

55 En resumen, a partir de las formas de realización descritas resultan las siguientes ventajas: las formas de realización del procedimiento hacen posible horizontes de conmutación muy largos, que están constituidos por una pluralidad de transiciones de conmutación, que pueden estar conectadas por elementos de pausas. Los primeros ensayos muestran que con una combinación de formas de realización del procedimiento se pueden reducir las pérdidas de conmutación hasta el 60 %, mientras que se pueden mejorar las distorsiones armónicas totales (Total Harmonic Distorsion, THD) del par motor al mismo tiempo en un 20 % aproximadamente. Estos ensayos fueron realizados en
60 un llamado convertidor de tensión media trifásico de tres puntos, que acciona una máquina de inducción. Comparado con el algoritmo MPDTC sencillo con un horizonte de conmutación sencillo de sólo dos etapas, se redujeron las pérdidas de conmutación hasta el 40 %, mientras que se mantuvo constante la THD del par motor.

Con las formas de realización se describen posibilidades para evitar una generación e investigación de secuencias

de conmutación cuando éstas son subóptimas. De esta manera, se puede reducir en gran medida el tiempo medio de cálculo. Además, se pueden indicar criterios de parada, en los que se puede asegurar que se encuentra una buena solución para una secuencia de conmutación. De esta manera se limita el tiempo máximo de cálculo.

- 5 En general, las formas de realización describen técnicas para modificar y mejorar un algoritmo MPDTC de tal manera que sea eficiente considerado desde el punto de vista técnico para ejecutar de esta manera un procedimiento con horizontes de conmutación largos en hardware de cálculo disponible actualmente. Los resultados de simulación muestran que el gasto de cálculo en el peor de los casos se puede reducir uno o dos órdenes de magnitud, mientras que el rendimiento de control (sobre todo con respecto a pérdidas de conmutación y THD)
- 10 permanece esencialmente inalterado.

A continuación se describen en detalle ejemplos de realización de la invención con referencia a las siguientes figuras.

Breve descripción de las figuras

- 15 La figura 1 muestra un circuito convertidor trifásico para la conexión de tres niveles de la tensión de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 2a muestra trayectorias felpar motor de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 2b muestra trayectorias del flujo del estator de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 2c muestra secuencias de conmutación de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- 20 La figura 3 muestra un árbol de búsqueda de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 4 muestra un diagrama de flujo para un procedimiento MPDTC de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 5 muestra una posibilidad de acuerdo con una forma de realización de la invención de calcular las trayectorias de magnitudes de partida.
- 25 La figura 6 muestra un diagrama de flujo para el cálculo de puntos de intersección de trayectorias con límites de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 7 muestra una trayectoria de una magnitud de partida de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- 30 La figura 8 muestra un diagrama de flujo para la determinación de un punto de intersección de una trayectoria con un límite de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 9 muestra un desarrollo de valores de calidad de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 10 muestra un fragmento de un diagrama de flujo para un procedimiento MPDTC de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- 35 La figura 11 muestra un histograma con el número de los nodos por nivel de un árbol de búsqueda de acuerdo con una forma de realización de la invención.
- La figura 12 muestra el desarrollo de la calidad actual durante un cálculo de la calidad de acuerdo con una forma de realización de la invención.

Los signos de referencia utilizados en las figuras y su significado se indican en forma resumida en la lista de signos de referencia. En principio, las partes idénticas o similares están provistas con los mismos signos de referencia.

40 **Descripción detallada de ejemplos de realización**

- En la figura 1 se muestra un circuito convertidor trifásico 2 para un convertidor 2 para la conexión de tres niveles de la tensión, en el que una máquina eléctrica giratoria 1 está conectada a través de sus fases u, v, w con un circuito de tensión continua 3 del circuito convertidor 2. En general, la máquina eléctrica giratoria 1 puede estar conectada con un circuito convertidor 2 para la conexión de m niveles de la tensión, siendo entonces $m \geq 2$. De acuerdo con la
- 45 figura 1, el circuito de tensión continua 3 está formado por un primer condensador C_1 por un segundo condensador C_1 conectado en serie con el primer condensador C_1 . El circuito de tensión continua 3 presenta en el primer condensador C_1 una primera conexión principal V_+ , en el segundo condensador C_2 una segunda conexión principal V_- y una conexión parcial NP (un punto medio del circuito intermedio) formada por los dos condensadores C_1, C_2 conectados en serie. Además, el circuito convertidor 2 comprende un sistema de convertidor parcial 4, previsto para

5 cada fase u, v, w, que está formado en cada caso por un primer grupo de conmutación o bien elemento de conmutación 5, por un segundo grupo de conmutación o bien elemento de conmutación 6 y por un tercer grupo de conmutación o bien elemento de conmutación 7, estando formado cada grupo de conmutación 5, 6, 7 por dos conmutadores de semiconductores de potencia 9 conectados en serie. Además, en cada sistema de convertidor parcial 4, el primer grupo de conmutación 5 está conectado con la primera conexión principal V_+ y el segundo grupo de conmutación 6 está conectado con la segunda conexión principal V_- . Además, el primer grupo de conmutación 5 está conectado en serie con el segundo grupo de conmutación 6, formando el punto de conexión del primer grupo de conmutación 5 con el segundo grupo de conmutación 6 una conexión de fases. El tercer grupo de conmutación 7, que está configurado como grupo de conmutación de sujeción, está conectado con el primer grupo de conmutación 5, en particular con el punto de conexión de los dos conmutadores de semiconductores de potencia 9 conectados en serie del primer grupo de conmutación 5. Además, el tercer grupo de conmutación 7 está conectado con el segundo grupo de conmutación 6, en particular con el punto de conexión de los dos conmutadores de semiconductores de potencia conectados en serie del segundo grupo de conmutación 6. Además, el tercer grupo de conmutación 7, en particular el punto de conexión de los dos conmutadores de semiconductores de potencia conectados en serie del tercer grupo de conmutación 7 está conectado con la conexión parcial NP.

20 Los conmutadores de semiconductores de potencia 9 del primero y del segundo grupos de conmutación 5, 6 están configurados como conmutadores de semiconductores de potencia bidireccionales controlables, estando configurados los conmutadores de semiconductores de potencia del tercer grupo de conmutación 7 como conmutadores de semiconductores de potencia 9 unidireccionales, no-controlables. Pero también es concebible que también los conmutadores de semiconductores de potencia del tercer grupo de conmutación 7 estén configurados como conmutadores de semiconductores de potencia 9 bidireccionales controlables. Los conmutadores de semiconductores de potencia 9 son, por ejemplo, tiristores, IGCTs o IGBTs.

25 En la figura 1 se representa un control 10 de un convertidor 2 o bien del sistema de accionamiento (sistema de motor), que comprende el convertidor 2 y la máquina eléctrica 1. El control 10 puede activar a través de líneas de control 12 los conmutadores de semiconductores de potencia 9 y, por lo tanto, los grupos de conmutación o bien los elementos de conmutación 5, 6, 7 y puede conmutarlos. Además, puede ser posible que el control reciba a través de una línea de medición opcional 14 señales de medición desde la máquina eléctrica 1. A través de estas señales de medición, el control 10 puede calcular entonces magnitudes de partida de la máquina eléctrica giratoria 1. Los algoritmos y procedimientos descritos se pueden ejecutar como módulos del programa en un procesador 16 del control 10.

De acuerdo con el procedimiento, se conectan las fases u, v, w del circuito convertidor 2, en el que se puede tratar, en general, de un circuito convertidor 2 para la conexión de m niveles de la tensión, en cada ciclo de control del control 10 con el circuito de tensión continua 3 después de una transición de conmutación seleccionada de estados de conmutación de los conmutadores de semiconductores de potencia 9 del circuito convertidor 2.

35 En la figura 2c se muestran tres secuencias de conmutación candidatas 20, 22, 24. En las figuras 2aa y 2b se representan las trayectorias del par motor 26, 28, 30 asociadas a ellas y las trayectorias del flujo del stator 32, 34, 36 entre sus límites superior e inferior respectivos. El eje de tiempo se indica en los tres diagramas a través de etapas de exploración o etapas de tiempo discretas, pudiendo tener el intervalo de exploración, es decir, por ejemplo, el tiempo entre k y $k+1$, $t_s = 25 \mu s$. El instante de exploración actual es en este caso k.

40 En la figura 2c se representan secuencias de conmutación 20, 24, 25, que han sido generadas con un horizonte de conmutación, que presenta los elementos "SSESE" y describe una conmutación a las etapas de tiempo k y $k+a$ y la ampliación siguiente de las trayectorias de las magnitudes de partida hasta que una o varias de las trayectorias no so ya admisibles. Por ejemplo, esto puede pasar en la etapa de tiempo $k+j$ (por ejemplo, $k+5$ en la secuencia de conmutación 20). El tercer evento de conmutación tiene lugar entonces en este instante y es seguido por otra etapa de ampliación.

45 La figura 3 muestra un ejemplo de un árbol de búsqueda 38, que ha sido generado con la ayuda de un algoritmo MPTTC iterativo con el horizonte de conmutación ampliado "SSESE". El árbol de búsqueda 38 presenta nodos de conmutación 40 (que corresponden a los elementos de conmutación del horizonte), en los que se realiza una ramificación sobre todas las transiciones de conmutación admisibles, y nodos de pausas 42 (que corresponden a los elementos de pausas del horizonte), que amplían las trayectorias de las magnitudes de partida, hasta que se encuentra un límite.

55 El árbol de búsqueda 38 presenta también nodos 43 desechados, que pertenecen a secuencias de conmutación, que han sido desechadas, y que están designadas por medio de una T invertida. El eje de tiempo discreto se muestra en el lado izquierdo y se extiende desde k hasta $k+N$. Siendo N la longitud del horizonte de la secuencia de conmutación más larga.

La figura 4 muestra un diagrama de flujo para un algoritmo MPDTC iterativo, que puede haber generado, por ejemplo, el árbol de búsqueda 38. En la etapa de tiempo k, el algoritmo MPDTC calcula la secuencia de

conmutación $U = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+N-1)]$ de acuerdo con el ciclo siguiente:

Inicializar en la etapa S10 el nodo de raíz del árbol con el vector de estado actual del accionamiento $x(k)$, con la posición de conmutación precedente $u(k-1)$ y el horizonte de conmutación (generalizado). Colocar el nodo de la raíz en una memoria de apilamiento.

- 5 El vector de estado $x(k)$ puede contener, por ejemplo, los componentes de la corriente del estator y de la corriente del rotor de la máquina o los componentes del flujo del estator y los componentes del flujo del rotor de la máquina o una combinación de éstos. Además, el vector de estado $x(k)$ puede contener estados del convertidor, como por ejemplo el potencial de la tensión en el o en los puntos medios del circuito intermedio.

Tomar en la etapa S12 el nodo más alto con un horizonte de conmutación no vacío desde el apilamiento.

- 10 Leer en la etapa S14 el primer elemento del horizonte de conmutación. Para "S", ramificar en todas las transiciones de conmutación admisibles. Las transiciones de conmutación admisibles son en este caso transiciones de conmutación que son admisibles para la topología del convertidor, por ejemplo que no pueden dañar el convertidor o no lo pueden cargar excesivamente. Las transiciones de conmutación admisibles se pueden registrar en una tabla de consulta y se pueden calcular "fuera de línea".

- 15 Para "E", ampliar en la etapa S14 las trayectorias de las magnitudes de partida o bien a través de extrapolación, interpolación y/o utilizando el modelo de accionamiento interno. En este caso, se puede utilizar el vector de estado $x(k)$ y se puede analizar con las magnitudes de partida calculadas.

- 20 Desechar en la etapa S16 las secuencias de conmutación, que no son candidatas y mantener solamente las secuencias de conmutación, que son candidatas. Por ejemplo, no existen secuencias de conmutación candidatas, cuando después de una transición de conmutación una o varias magnitudes de partida han abandonado sus límites.

- 25 Colocar en la etapa S18 las secuencias de conmutación candidatas en el apilamiento y pasar a la etapa S12, en el caso de que existan todavía nodos en el apilamiento. En el caso de que no existan ya nodos en el apilamiento, que comprendan horizontes de conmutación no vacíos, se detiene el cálculo. El resultado de este cálculo son las secuencias de conmutación de candidatos $U_i(k) = [u_i(k), u_i(k+1), \dots, u_i(k+n_i-1)]$ con longitud variable, en la que i es 1 a I es una cantidad de índice.

- 30 Calcular en la etapa S20 para cada secuencia de conmutación de candidatos i en I el valor de calidad correspondiente. Cuando la secuencia de conmutación debe reducirse al mínimo, considerar, por ejemplo, $c_i = s_i/n_i$, que se aproxima a la frecuencia de conmutación media, siendo $s_i = \sum_{j=k}^{k+n_i-1} ||u_i(j) - u_i(j-1)||_1$ el número total de las transiciones de conmutación en la secuencia de conmutación $U_i(k)$ y siendo n_i la longitud de la secuencia de conmutación correspondiente.

- 35 Cuando en la etapa S20 se calcula el valor de calidad por medio de las pérdidas de conmutación, se utiliza la función de calidad $c_i = E_i/n_i$, en la que E_i son las pérdidas de conmutación. Para el cálculo de las pérdidas de conmutación puede ser que deban calcularse las corrientes de fases, que son combinaciones lineales de los componentes de flujo.

- Seleccionar en la etapa S22 la secuencia de conmutación óptima $U^* = U_i(k)$ con el valor de calidad mínimo, siendo $i = \arg \min c_i$.

- 40 Aplicar en la etapa S24 la primera transición de conmutación $u(k)u^*$ de la secuencia de conmutación óptima U^* sobre los elementos de conmutación del convertidor y ejecutar los procedimientos que se acaban de describir en la siguiente etapa de tiempo $k+1$ (es decir, en el siguiente ciclo de control).

- 45 El algoritmo está construido de tal forma que cada secuencia de conmutación de candidatos da como resultado trayectorias de magnitudes de partida, que son fiable. Esto trata de asegurar que los límites de las magnitudes de partida son respetadas en todo momento durante un funcionamiento estacionario. Además, el algoritmo se realiza de forma iterativa, es decir, que en lugar de listar las secuencias de conmutación y luego calcular las trayectorias de las magnitudes de partida, se construyen las secuencias de conmutación paso a paso a través de ramificación en las transiciones de conmutación 40 admisible. Una ventaja de ello es que el horizonte de conmutación se puede ampliar fácilmente, de manera que se pueden tener en cuenta una pluralidad de transiciones de conmutación 40 y una pluralidad de nodos de pausas 42. Además, se pueden aplicar técnicas de búsqueda de árbol, para reducir la carga de cálculo.

- 55 Con relación a la figura 3, el algoritmo comienza en el nodo de la raíz y pasa a través del árbol de búsqueda 38 con nodos 40, que representan de nuevo un nodo de la raíz para un árbol parcial, en el que cada nodo representa una transición de conmutación admisible y nodos de pausas 42, que representan etapas de ampliación y solamente presentan un nodo hijo. La profundidad del árbol 38 es el número de las transiciones de conmutación disponibles

más el número de las etapas de pausas por cada nodo de pausas 42 dentro del horizontal de conmutación. El algoritmo lista todas las secuencias de conmutación, que son secuencias de conmutación candidatas y calcula sus trayectorias de magnitudes de partida correspondientes y sus valores de calida. De esta manera, se buscan todos los nodos en el árbol de búsqueda, que pertenecen a secuencias de conmutación candidatas.

5 El algoritmo descrito anteriormente se puede modificar para elevar la eficiencia de cálculo, de manera que se pueden calcular horizontes de conmutación más largos en hardware actualmente disponible. Esto se puede calcular, por ejemplo, a través de las siguientes técnicas:

- 10 - Procedimientos rápidos y exactos para ampliar las trayectorias del par motor, del flujo del estator y del potencial del punto medio (del circuito intermedio) para una combinación dada de estados de conmutación, hasta que una de las trayectorias encuentra un límite de histéresis asociado (o un límite general predefinido). El objetivo es en este caso reducir el tiempo medio de cálculo.
- 15 - Técnicas de optimización hechas a medida para reducir el número de los nodos buscados en el árbol de búsqueda. El objetivo es en este caso reducir el tiempo medio de cálculo.
- 20 - MPDTC subóptimo, en el que se limita el número máximo de etapas de iteración (o el tiempo), pero se asegura que se encuentre una solución admisible (transición de conmutación), que puede ser, sin embargo, subóptimo. Este concepto limita el tiempo de cálculo máximo, lo que puede ser importante sobre todo para una implementación del algoritmo.

25 Con respecto a las figuras 5 y 6 se indica ahora cómo se pueden determinar en la etapa S14 las trayectorias de magnitudes de partida o bien el instante, en el que una trayectoria corta un límite, a través de interpolación, extrapolación u otras aproximaciones.

30 En lugar de extrapolaciones eventualmente inexactas y simulaciones que necesitan mucho tiempo de cálculo, que utilizan un modelo del accionamiento, se puede predecir analíticamente el número de las etapas de tiempo, para las que se puede aplicar una combinación dada de estados de conmutación, hasta que una de las magnitudes de partida (par motor, flujo del estator y potencial(es) del punto medio) encuentra un límite, pudiendo aplicarse procedimientos de optimización sencillos para encontrar lugares de anulación.

35 La figura 5 muestra un vector de flujo del estator ψ_s , en el plano α/β . El vector de flujo del estator ψ_s se mueve a través de un vector de la tensión v , que es una función de la combinación de estados de conmutación u . El vector de flujo del estator ψ_s debe permanecer en este caso dentro de un límite de histéresis interior 44 y de un límite de histéresis exterior 46.

40 Omitiendo la resistencia del estator se puede aproximar una trayectoria de flujo del estator, que comienza en el instante 0, a través de una relación sencilla de la forma

$$\psi_s(t) = \psi_s(0) + tv$$

en la que se da el vector de flujo del estator ψ_s en α/β , v es el vector de la tensión en α/β , t es el tiempo continuo y se han omitido factores de escala.

45 El cuadrado de esta relación y su equiparación con el límite de histéresis interior 44 (el radio del circuito interior) conduce a un polinomio de segundo orden en el tiempo t . En función de la posición del vector de flujo del estator ψ_s con respecto a los límites de histéresis 44, 46 y la dirección del vector de la tensión v , este polinomio no tiene ninguna, una o dos soluciones, que se pueden calcular fácilmente. Lo mismo se aplica para una relación análoga para los puntos de intersección con el límite de histéresis exterior 46, que o bien no permite ninguna o dos soluciones.

50 El tiempo t , después del cual el flujo del estator ψ_s corta un límite de histéresis 44, 46, se da a través de el tiempo no-negativo mínimo t , que se calcula como se ha descrito anteriormente. A partir de este tiempo se puede calcular la unidad de tiempo discreta o bien la etapa de tiempo k , que está más próxima al tiempo t .

También la resistencia del flujo del estator omitida anteriormente se puede tener en cuenta de diferentes maneras para el cálculo descrito anteriormente.

- 55 - A través de rotación del vector de la tensión v alrededor de un ángulo correspondiente en la dirección del origen del plano α/β .
- A través de la utilización de la ecuación del flujo del estator del modelo de máquina. Cuando se comienza en el instante 0, se puede calcular especialmente el flujo del estator ψ_s después de un intervalo de tiempo

corto para el vector de tensión dado en α/β utilizando el modelo de la máquina (solamente se necesitan a tal fin las dos primeras ecuaciones). Sobre esa base se pueden corregir la longitud y la orientación del vector de la tensión v para tener en cuenta de esta manera la resistencia del estator.

5 Estas correcciones se pueden calcular para todos los vectores de la tensión v y para todos los ajustes del par motor y de la velocidad antes de la realización del algoritmo, por ejemplo "fuera de línea". Estas informaciones se pueden registrar, por ejemplo, en una tabla de consulta, a la que puede acceder el algoritmo.

También la trayectoria del par motor o bien su corte con sus límites se pueden calcular de esta manera. El par motor es el producto cruzado entre el flujo del estator ψ_s y el flujo del rotor ψ_r . En el supuesto de que dentro del horizonte de previsión la longitud del vector del flujo del rotor ψ_s sea constante y de que la rotación del vector del flujo del rotor ψ_s se realice con una velocidad constante, se puede incorporar el desarrollo del flujo del estator descrito anteriormente en la ecuación del par moto. Una simplificación de la ecuación conduce a un desarrollo del par motor como una función de los componentes del flujo en el instante 0 y los términos $t \sin(w_r t)$ y $t \cos(w_r t)$, en la que w_r es la velocidad de rotación del flujo del rotor ψ_s .

15 La equiparación de la ecuación del par motor con el límite inferior y superior del par motor y la determinación del tiempo mínimo no negativo da como resultado el tiempo después del cual se contacta con el primer límite o se corta. La ecuación del par motor se puede solucionar de varias maneras. Por ejemplo, se pueden realizar analíticamente los cálculos que se acaban de describir.

Otra posibilidad de solucionar la ecuación del par motor consiste en aproximar los términos $t \sin(w_r t)$ y $t \cos(w_r t)$ a través de una serie de Taylor en torno al instante $t=0$ p $t>0$. Además, se puede iterar sobre t o t se puede ajustar sobre la base de informaciones ya existentes, donde es espera el siguiente contacto de un límite.

20 Además, es posible aproximar los términos $t \sin(w_r t)$ y $t \cos(w_r t)$ a través de una función polinomial unitaria y solucionar la ecuación del par motor en cada intervalo de aproximación.

Otra posibilidad de solucionar le ecuación del par motor consiste en utilizar un algoritmo para la determinación de lugares de anulación, por ejemplo el procedimiento de Newton, el procedimiento de secantes y/o el procedimiento Regula-Falsi. Este algoritmo se puede interrumpir tan pronto como se ha determinado el instante t , en el que la trayectoria del flujo del estator corta uno de sus límites.

Este algoritmo se describe con relación a la figura 6.

Hallar en la etapa S100 el máximo del par motor siguiente o el mínimo para $t>0$ utilizando un algoritmo para la determinación de lugares de anulación a través de la equiparación de la derivación con 0.

30 Decidir en la etapa S102 si el máximo o mínimo está dentro de los límites para el par motor. Si éste es el caso, pasar a la etapa S100. Si éste no es el caso, pasar a la etapa S103.

Determinar en la etapa S103 el límite, que se corta, es decir, el límite superior o inferior del par motor y calcular el tiempo, en el que se contacta con el límite, utilizando un algoritmo para la determinación de lugares de anulación.

35 El instante, en el que el potencial del punto medio contacta con uno de sus límites, se puede calcular por medio de cualquiera de los caminos descritos anteriormente. Esto comprende una extrapolación o una solución analítica similar a la solución descrita anteriormente de la ecuación del par motor.

40 En oposición al procedimiento que se acaba de describir para la determinación analítica de trayectorias de magnitudes de partida y de instantes en los que estas trayectorias cortan el límite superior e inferior, se presenta a continuación un procedimiento, que se basa en el modelo de accionamiento (eventualmente matemático) utilizando un intervalo de exploración aproximado e interpolación cuadrática. Este principio se describe con referencia a las figuras 7 y 8.

45 La figura 7 muestra una trayectoria 48 de una magnitud de partida, que está registrada sobre el eje de tiempo k y que ha sido calculada para los valores en las etapas de tiempo aproximadas $T_s = d \cdot t_s$. T_s es en este caso el intervalo de exploración del control, es decir, el intervalo de tiempo más corto o bien la etapa de tiempo, que puede explorar el control, por ejemplo 25 μs o también el intervalo de un ciclo de control. Un intervalo de exploración aproximado $T_s = d \cdot t_s$ se puede seleccionar colocando d por ejemplo en 10. Un intervalo de exploración aproximado es, por lo tanto, un múltiplo del intervalo de exploración del control.

Como se puede reconocer a partir de la figura, la trayectoria 48 se extiende entre $k=0$ y $k=27$ dentro de los límites de histéresis inferior y superior 44, 46 y corta el límite de histéresis inferior aproximadamente en $k=27$.

50 El algoritmo descrito a continuación con relación a la figura 8 para la determinación de un 'punto de intersección 58 de la trayectoria 48 con uno de los límites 44, 46 se basa en que el modelo de accionamiento discreto de tiempo

registrado en el control utiliza como etapa de discreción el intervalo de exploración aproximado T_s y no el intervalo de exploración del control.

Comenzar en la etapa S200 con $k=0$ y calcular o bien simular la magnitud de partida en $k=d$ y $k=2d$ utilizando el modelo de accionamiento.

5 Derivar en la etapa S202 para cada magnitud de partida una aproximación cuadrática de la trayectoria respectiva de las magnitudes de partida 48 sobre la base de los puntos en $k=0$, d y $2d$. Sobre la base de la curvatura de la aproximación cuadrática y en base a si los puntos en $k=$, d y $2d$ se encuentran dentro, por encima o por debajo de los límites de histéresis 44, 46, identificar qué límite es un candidato para ser cortado por la trayectoria de magnitudes de partida.

10 Calcular en la etapa 204 el punto de intersección de la aproximación cuadrática con límite identificado como candidato. En el caso de que exista un punto de intersección, calcular analíticamente el instante de la intersección. Cuando el instante está entre $k=0$ y $k=2d$, detener el algoritmo. Tomar el tiempo mínimo determinado de todas las magnitudes de partida, para las que se ha realizado el cálculo como el instante a calcular. Cuando ninguna de las magnitudes de partida corta un límite dentro de $k=0$ y $k=2d$, moverse en la medida de un intervalo de exploración aproximado T_s al futuro y calcular las magnitudes de partida en la etapa de tiempo $k=3d$. Repetir la etapa S202, pero desplazada en d .

20 Partiendo de la situación mostrada en la figura 7, el algoritmo procederá de la siguiente manera: en una primera etapa, en la que se considera el intervalo 52 sobre la base de los puntos $k=1$, s y k_2 , se investiga el punto de intersección con el límite de histéresis superior, pero no se encuentra ningún punto de intersección. En una segunda etapa, cuando se considera el intervalo 54 sobre la base de los puntos $k=d$, $2d$ y $3d$, se determina el punto de intersección 50 con el límite de histéresis inferior 44 y de calcula el instante $k=27$.

d se puede seleccionar para que la longitud de un intervalo (es decir, $2d$) se encuentre en la zona del número medio de etapas de tiempo de ampliación, es decir, de la longitud media de pausas de conmutación. Esta información se puede calcular también a través de simulaciones “fuera de línea” y se pueden registrar en una tabla de consulta.

25 En lugar de determinar las magnitudes de partida en las etapas de tiempo 0, d y $2d$ y de utilizar una interpolación cuadrática, las magnitudes de partida se pueden calcular en los instantes 0 y $2d$ y sus derivaciones en las etapas de tiempo 0 y $2d$ y se pueden utilizar para una interpolación cuadrática.

30 Adicional o alternativamente también se pueden utilizar interpolaciones lineales o cúbicas sobre la base de valores de magnitudes de partida con un número apropiado de etapas de tiempo. Estas etapas de tiempo no tienen que estar distribuidas de una manera uniforme o bien estar distanciadas de una manera uniforme. En particular, se puede disponer una etapa de tiempo allí donde se espera que la trayectoria corte un límite.

En lugar de determinar todas las secuencias de conmutación o bien las secuencias de conmutación de candidatos y de clasificarlas (o bien priorizarlas), se puede limitar o reducir también el número de las secuencias de conmutación que deben investigarse para reducir el tiempo de cálculo medio.

35 La figura 9 muestra el desarrollo de valores de calidad sobre la longitud variable del horizonte de conmutación generalizado “sSSESE”. En el diagrama de la figura 9 se representa hacia la derecha el tiempo en etapas de tiempo y hacia arriba la calidad. El desarrollo ha surgido durante la realización de un llamado algoritmo de búsqueda de “ramificación y limitación”, que se describe más adelante todavía con mayor detalle. Las secuencias de conmutación completas 58 han sido investigadas totalmente, las secuencias de conmutación 60 completas no han sido investigadas totalmente y han sido anuladas. Las secuencias de conmutación 62 no han sido investigadas todavía totalmente. Como se deduce a partir de la figura, la secuencia de conmutación actualmente óptima tiene en este caso una longitud de 39 etapas de tiempo y un valor de calidad de aproximadamente 0,01.

45 A partir de la figura se puede deducir que los valores de calidad no se incrementan de forma monótona cuando se amplían las secuencias de conmutación. A pesar de todo, con la ayuda de los cálculos siguientes se puede realizar una estimación de la calidad de secuencias de conmutación incompletas.

50 Una secuencia de conmutación completa es en este caso una secuencia de conmutación que presenta todos los elementos del horizonte de conmutación generalizado. En oposición a ello, una secuencia de conmutación incompleta es una secuencia de conmutación, que solamente se configura a través de la adición de elementos a una secuencia de conmutación completa. Es decir, que una secuencia de conmutación incompleta presenta, en general, menos elementos que el horizonte de conmutación generalizado.

El valor de calidad c de una secuencia de conmutación completa se puede calcular de la siguiente manera: el valor de calidad asociado a una secuencia de conmutación es la suma de las pérdidas de conmutación de todas las transiciones de conmutación dividida por la longitud total de la secuencia de conmutación n , es decir, $c = \text{sum}(E_{\text{loss}})/n$. Puesto que un horizonte de conmutación puede contener transiciones de conmutación y elementos de pausa, que

pueden ser de duración variable, n puede ser de longitud variable.

El valor de calidad c^* actualmente mínimo es el valor de calidad mínimo c , que ha sido hallado dentro de un ciclo del algoritmo para una secuencia de conmutación completa.

5 El límite inferior de los valores de calidad c_{1b} de las secuencias de conmutación completas se puede calcular de la siguiente manera: puesto que el valor de calidad c es típicamente la suma de las pérdidas de conmutación sobre todas las transiciones de conmutación de la secuencia de conmutación dividida por la longitud total de la secuencia de conmutación, los valores de calidad no se incrementan necesariamente de forma monótona a medida que se incrementa la longitud de una secuencia de conmutación. Para poder aplicar las llamadas técnicas de ramificación y de limitación, se introduce un límite inferior para los valores de calidad c_{1b} , que se aplica también para secuencias de conmutación incompletas $c_{1b} = \text{sum}(E_{\text{loss}}) / N_{\text{max}}$, en la que N_{max} es un límite superior para la longitud máxima de la secuencia de conmutación. Entonces se aplica que es $c > c_{1b}$.

También aquí es posible que la longitud máxima esperada de las secuencias de conmutación N_{max} sea actualizada durante el desarrollo del algoritmo. El algoritmo de búsqueda es más eficiente cuando N_{max} es un límite superior estrecho de la longitud máxima de las secuencias de conmutación.

15 Durante la búsqueda de árbol se puede actualizar N_{max} de muchas maneras. A continuación se mencionan algunos principios para ello, que también se pueden combinar.

N_{max} se puede determinar a través de simulaciones fuera de línea para cada punto de funcionamiento y para cada horizonte de conmutación predeterminado y se puede depositar en una tabla de consulta.

20 N_{max} puede ser recibido desde el ciclo de control precedente en el ciclo de control siguiente. Durante la búsqueda de árbol se puede elevar N_{max} cuando se encuentra una secuencia de conmutación que presenta un horizonte de conmutación más largo. En este caso también es posible que N_{max} sea escalado en un valor fijo a partir del ciclo de control precedente, por ejemplo en 0,9.

También es posible que el valor inicial de N_{max} para un ciclo de control sea el máximo o la media de N_{max} sobre un número determinado de ciclos de control precedentes.

25 En general, puede ser necesario que durante la búsqueda de árbol deban ser consideradas de nuevo secuencias de conmutación (incompletas) desechadas previamente, en el caso de que se eleve N_{max} y de que eventualmente c_{1b} deba actualizarse.

Además, se pueden utilizar relajaciones y aproximaciones, para calcular un límite inferior c_{1b} .

30 En la figura 10 se representa un fragmento de un algoritmo, que es similar al algoritmo de la figura 4. Sin embargo, si la etapa S20 de la figura 10 ha sido sustituida por la etapa S300 y se ha añadido la etapa S301, una ramificación de la etapa S18 no conduce ya a la etapa S12 sino a la etapa S301. La secuencia de las etapas S200, S301, S12, S14 y S16 se puede representar en este caso también distinta que en la figura 10. En la etapa S300, las secuencias de conmutación son rechazadas durante la recursión o bien iteración. En la etapa S301 se clasifican y/o priorizan las secuencias de conmutación no desechadas. En la etapa S12 se selecciona entonces una secuencia de conmutación con máxima prioridad. En principio, la función de calidad es valuada en la etapa S300 y se desechan allí secuencias de conmutación cuando para éstas c es mayor que c_{1b} . También es posible que la prioridad y la clasificación, es decir, qué secuencia de conmutación debe considerarse, se realicen en el ciclo antes de la etapa S12.

El algoritmo se puede modificar de diferentes maneras.

40 Algoritmo de "ramificación y limitación" cortado a medida: calcular las secuencias de conmutación y las trayectorias de las magnitudes de partida (S14) correspondiente y los valores de calidad (S300) iterativamente cuando el árbol es recorrido desde el nodo de la raíz hacia las hojas. En cada etapa de iteración (S300) se calcula un límite inferior c_{1b} para el valor de calidad de la secuencia de conmutación actual (eventualmente incompleta). Cuando el límite inferior c_{1b} excede la calidad mínima c^* (de la mejor secuencia de conmutación completa, que ha sido calculada hasta ahora), no se consideran las secuencias de conmutación incompletas y se desechan.

45 Algoritmo "Primero búsqueda en el fondo": comenzar con la secuencia de conmutación prometedoras (por ejemplo, en la que en la etapa S301 se da prioridad siempre a la secuencia de conmutación incompleta, que presenta las mismas transiciones de conmutación que la decencia de conmutación prometedoras) y calcular las trayectorias de las magnitudes de partida correspondientes y su valor de calidad. El objetivo es encontrar inmediatamente al comienzo de la búsqueda de árbol una secuencia de conmutación (completa), que se aproxima a la secuencia óptima y presenta un valor de calidad correspondiente pequeño.

50 Algoritmo "Arranque en caliente": las secuencias de conmutación prometedoras se pueden calcular (al menos parcialmente) antes del desarrollo del algoritmo, por ejemplo a partir de:

- la secuencia de conmutación óptima del ciclo de control precedente, que ha sido desplazado una etapa de tiempo,
- la secuencia de conmutación óptima, que ha sido determinada para una etapa de optimización precedente, que ha sido realizada con un horizonte de conmutación más corto. (Puesto que una secuencia de conmutación de este tipo no está completa, esto posibilita un “arranque en caliente” parcial y se necesita una ramificación desde el extremo de la secuencia de conmutación no completa, para obtener una secuencia de conmutación completa),
- también es posible determinar la primera posición de conmutación de una secuencia de conmutación por medio del método del análisis geométrico descrito más adelante.

5
10 Algoritmos heurísticos de ramificación: en su forma básica, el algoritmo se ramifica sobre todas las transiciones de conmutación admisibles y selecciona en este caso el nodo más alto en la memoria de apilamiento. Para reducir adicionalmente el número de las iteraciones, se investigan en primer lugar las transiciones de conmutación prometedoras (nodos) y se clasifican de manera correspondiente las transiciones de conmutación. Se pueden realizar una clasificación o prioridad en la etapa S301 a través de la introducción de heurísticas de ramificación, que comprenden, por ejemplo:

15
20 La prioridad se realiza con la ayuda de la probabilidad con la que una secuencia de conmutación conduce a una secuencia de conmutación fiable y/o buena. La probabilidad se puede determinar para la transición de conmutación investigada a partir de una tabla de consulta, que ha sido calculada anteriormente “fuera de línea”, o que se puede determinar “en línea”: para cada punto de funcionamiento y cada sector (de vector de la tensión) en el plano α/β se determina a través de simulación del funcionamiento estacionario la probabilidad de cada transición de conmutación (vector de la tensión). Para reducir la necesidad de memoria se transfiere el problema al sector cero y se determina la distribución de la probabilidad para el sector cero. Las posiciones de conmutación o bien secuencias de conmutación se clasifican entonces de acuerdo con la probabilidad decreciente y se realiza una ramificación en primer lugar para las secuencia de conmutación o bien posiciones de conmutación, que presentan la máxima probabilidad. La anchura típica de un sector es 15, 30, 45 ó 60°. Con otras palabras, el problema se representa aprovechando propiedades de simetría del sistema de 3 fases en un espacio dimensional reducido. Para este espacio se puede calcular “fuera de línea” a través de simulaciones la probabilidad con la que se utiliza cada estado de conmutación o bien transición de conmutación individual.

30 De manera alternativa o adicional a ello, las transiciones de conmutación y las secuencias de conmutación se pueden clasificar también sobre la base de un análisis geométrico. Las posiciones de conmutación, que mantienen un par motor constante, se encuentran en primer término paralelamente al flujo del rotor, mientras que las posiciones de conmutación, que mantienen constante la magnitud del flujo del estator, se encuentran en una línea perpendicularmente al flujo del estator. Sobre la base de estas consideraciones se pueden determinar posiciones de conmutación discretas, que elevan o bien reducen el par motor y/o elevan o bien reducen el flujo del estator. En función de si el par moto se encuentra cerca del límite superior o bien del límite inferior y, por lo tanto, debe reducirse o bien elevarse, se pueden seleccionar y priorizar posiciones de conmutación discretas, que cumplen esos criterios. El mismo cálculo se puede realizar también para el flujo del estator y el potencial del punto medio o bien de los potenciales del punto medio. La idea a este respecto es calcular una tensión ideal, que generaría un par motor constante y un flujo constante. Esta tensión ideal se puede conseguir solamente a través de conmutación indefinida rápida, es decir, solamente en el valor límite. La tensión ideal se puede transferir a estados de conmutación ideales, que, en general, no son de número entero, por lo tanto no conmutables, sino que son reales, como por ejemplo [0,9; -0,8; 0,1]. Sin embargo, por ejemplo, sólo es conmutable [1, -1; 0]. La tensión ideal o bedel estado de conmutación ideal o bien la transición de conmutación puede ser un valor inicial bueno, en cuya proximidad, es decir, por ejemplo [1; -1; 0] se encuentran estados de conmutación o bien transiciones de conmutación prometedoras. Además, sobre la base de la tensión ideal se pueden calcular estados de conmutación o bien transiciones de conmutación, que tienen un efecto deseado sobre el convertidor y la máquina, por lo tanto incrementan, por ejemplo, el par motor.

50 Lo dicho anteriormente se puede aplicar para las llamadas posiciones de conmutación relajadas o bien transiciones de conmutación relajadas, es decir, estados de conmutación reales. Después de la determinación de las posiciones de conmutación relajadas deseadas, se pueden considerar en primer lugar las posiciones de conmutación discretas en el entorno de las posiciones de conmutación relajadas.

Para clasificar y/o priorizar secuencias de conmutación (S301), se puede proceder también de tal manera que se investiga a continuación el nodo con el mejor valor de calidad hasta el presente instante dentro del ciclo de control (o bien c o C_{1b}).

55 Otra posibilidad para la prioridad de secuencias de conmutación en la etapa S301 se describe con relación a las figuras 11 y 12.

La figura 11 muestra un histograma con el número de nodos por nivel del árbol de búsqueda para el horizonte de

conmutación generalizado “eSSESE”. En el histograma se representan hacia arriba el número de los nodos y hacia la derecha la profundidad del árbol de búsqueda o bien los niveles. Como se deduce a partir del diagrama, la profundidad del árbol de búsqueda se puede designar también con las acciones restantes a realizar a partir del horizonte de conmutación generalizado (por ejemplo “ESE”).

5 La prioridad de los nodos en el árbol de búsqueda y de las secuencias de conmutación se puede realizar de tal manera que el histograma se forma de una manera determinada. Esto permite adaptar la distribución de nodos no investigados o bien de secuencias de conmutación incompletas en el árbol de búsqueda. En lugar de seleccionar siempre el nodo con el valor de calidad mínimo (que se encuentra normalmente en un nivel superior, es decir, a la izquierda en el histograma, del árbol de búsqueda), puede ser ventajoso calcular rápidamente secuencias de
10 conmutación completas, para obtener rápidamente valores de calidad óptimos inferiores (límites buenos) y, por lo tanto, dirigir el enfoque también a los niveles inferiores.

Con relación a la figura 11, la línea 66 representa en este caso el histograma deseado, y la línea 64 representa el histograma actual, que se ha obtenido a través de realización parcial del algoritmo. En este ejemplo, se selecciona un nodo del segundo nivel (en el que deben realizarse todavía las acciones “SESE”. En particular, en este caso, se
15 puede tomar el nodo en el segundo nivel con el valor de calidad mínimo.

Esto se puede conseguir a través de las siguientes modificaciones del algoritmo de la figura 10:

En la etapa S301 determinar adicionalmente el número de los nodos de cada nivel del árbol de búsqueda. Esto conduce, por ejemplo, al histograma de la figura 11. Decidir a través de la forma deseada del histograma, por ejemplo, una función exponencial de la profundidad del árbol de búsqueda. Esta forma
20 puede estar también ya predefinida.

En la etapa S301 seleccionar el nivel, que lesiona la mayoría de las veces la forma deseada del histograma. Para este nivel, seleccionar, por ejemplo, la secuencia de conmutación (incompleta) con el valor de calidad mínimo y priorizarla.

Una gran parte de las formas de realización descritas anteriormente contribuyen a reducir el tiempo de cálculo medio. No obstante, puede ser igualmente importante limitar el tiempo de cálculo máximo.
25

Esto se puede conseguir porque se limita el número máximo de etapas de cálculo o bien el tiempo de cálculo, porque se admiten soluciones subóptimas del problema MPDTC, pudiendo asegurarse, sin embargo, que se encuentra siempre una buena secuencia de conmutación (de candidatos).

Como ya se ha descrito, una secuencia de conmutación de candidatos conduce a trayectorias de magnitudes de partida, que son admisibles, es decir, que se encuentran dentro de límites determinados o que apuntan en la dirección correcta.
30

La figura 12 muestra el desarrollo de valores de calidad (aquí sobre la base de la pérdida de conmutación) representada sobre el número de las iteraciones durante una búsqueda de árbol. En el diagrama se representan hacia la derecha el número de las iteraciones y hacia arriba las pérdidas de conmutación en kilovatios.

35 A partir del diagrama se deduce que el valor de calidad óptimo se encuentra rápidamente. En este caso, aproximadamente después del 25 % aproximadamente del número total de las iteraciones. La mayoría de las iteraciones (aquí 75 %) solamente se utilizan para confirmar la capacidad opcional de la solución. El primer elemento óptimo de la secuencia de conmutación, es decir, la siguiente transición de conmutación, se encuentra incluso todavía antes (dentro de menos del 25 % del número total de las iteraciones).

40 Por lo tanto, puede ser conveniente realizar un procedimiento MPTC subóptimo. Para realizar un algoritmo o bien un procedimiento MPDTC subóptimo, se pueden realizar las siguientes modificaciones en los algoritmos MPDTC descritos anteriormente.

En la etapa S18 de las figuras 4 y 10 se puede emplear una condición de interrupción alternativa o adicional para la terminación de la recursión.

45 - Se introduce un límite superior para el número de secuencias de conmutación o bien nodos, que se investigan, y/o un límite superior para el tiempo de cálculo disponible. El algoritmo se detiene cuando se excede este número o este tiempo. La secuencia de conmutación óptima calculada para la interrupción se utiliza como solución (subóptima).

50 - Alternativamente a ello, se puede realizar el algoritmo e optimización hasta que entra una interrupción, que detiene la búsqueda de árbol. Una interrupción puede interrumpir en cualquier momento la búsqueda de árbol. Esto permite evitar un tiempo de ejecución en vacío del proceso y en su lugar utilizar este tiempo con la mejora de la solución actualmente óptima.

- También es posible detener el algoritmo cuando se ha alcanzado una garantía de la proximidad de lo óptimo. En este caso se introduce una distancia de optimación aceptable, que puede ser, por ejemplo, 2 % con relación a la función de calidad. La búsqueda de árbol se detiene cuando se ha determinado una secuencia de conmutación completa, que se encuentra dentro del 2 % de la C_{1b} óptima, en la que C_{1b} representa la barrera inferior sobre la calidad de secuencias de conmutación incompletas.

Además, se puede asegurar adicionalmente que se encuentra siempre una secuencia de conmutación admisible, que es admisible, cuyo primer estado de conmutación o bien transición de conmutación es admisible, que asegura un comportamiento estable del accionamiento (es decir, que sus trayectorias de partida se mueven dentro de límites o se aproximan a éstos) y/o se asegura un buen rendimiento de la máquina y del convertidor (la calidad prevista es pequeña). Esto se puede conseguir de diferentes maneras:

- Un algoritmo de “Arranque en frío” combinado con un algoritmo de búsqueda “Primero en el fondo”, como se ha descrito, por ejemplo, anteriormente, cumple las previsiones, de encontrar rápidamente una solución (secuencia de conmutación), que se encuentra cerca de la secuencia de conmutación óptima, sobre todo el horizonte de conmutación.
- También es posible realizar durante un ciclo de control el algoritmo con dos horizontes de conmutación de diferente longitud. En una fase previa se realiza el algoritmo de conmutación con un horizonte de conmutación corto y se calcula una secuencia de conmutación óptima o bien subóptima para este horizonte de conmutación corto. Esta secuencia de conmutación se puede utilizar entonces para realizar, por ejemplo por medio del algoritmo de “arranque en caliente” la fase principal del procedimiento de optimización.

Además, como ya se ha descrito, se puede reducir el espacio de búsqueda a través de la eliminación de transiciones de conmutación (nodos) no prometedores fuera del árbol de búsqueda. Esto se puede realizar, por ejemplo, sobre la base de un análisis geométrico como se ha descrito anteriormente.

Debe entenderse que las formas de realización descritas anteriormente de procedimientos y algoritmos se pueden combina entre sí, aunque esto no se mencione explícitamente.

El procedimiento y los algoritmos pueden estar implementados como módulos de software programables. No obstante, no se excluye que los procedimientos y algoritmos estén configurados, al menos parcialmente, por medio de hardware.

Para completar, hay que indicar que la expresión “que comprende” no excluye otros elementos o etapas y “uno” o “una” no excluye una pluralidad. Además, hay que indicar que características o etapas, que se han descrito con referencia a uno de los elementos de realización anteriores, se pueden utilizar también en combinación con otras características o etapas de otros ejemplos de realización descritos anteriormente. Los signos de referencia en las reivindicaciones no deben considerarse como limitación.

Lista de signos de referencia

1	Máquina eléctrica giratoria
2	Circuito convertidor para la conexión de tres niveles de la tensión
3	Circuito de tensión continua
4	Sistema convertidor parcial
5, 6, 7	Primero, segundo y tercer grupo de conmutación, elemento de conmutación
9	Semiconductor de potencia
10	Control
12	Línea de control
14	Línea de señales de medición
16	Procesador
20, 22, 24	Secuencias de conmutación de candidatos
26, 28, 30	Trayectorias del par motor
32, 34, 36	Trayectorias del flujo del estator
38	Árbol de búsqueda
40	Nodos de conmutación
42	Nodos de pausa
43	Nodos desechados
ψ_s	Vector de flujo del estator
ψ_r	Vector de flujo del rotor
v	Vector de la tensión
44	Límite interior/inferior de histéresis
46	Límite exterior/superior de histéresis
48	Trayectoria
t_s	Intervalo mínimo de exploración

	Ts	Intervalo grande de exploración
	50	Punto de intersección
	52, 54	Intervalo
	58, 60, 62	Valores de calidad de secuencias de conmutación
5	64, 66	Número de nodos a investigar o bien investigados

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Procedimiento para el funcionamiento de una máquina eléctrica giratoria (1), en el que la máquina eléctrica giratoria es alimentada por un convertidor (2) desde un circuito de tensión continua a través de al menos una fase (u, v, w) con corriente eléctrica y el convertidor está realizado para conmutar al menos una fase sobre al menos dos niveles de la tensión, comprendiendo el procedimiento las etapas:
- generación de secuencias de conmutación, comprendiendo cada secuencia de conmutación una secuencia de transiciones de conmutación del convertidor con una primera transición de conmutación; evaluación de cada una de las secuencias de conmutación con un valor de calidad (S20); selección de la secuencia de conmutación con un valor mínimo de calidad (S22);
- 10 activación de los elementos de conmutación del convertidor con la primera transición de conmutación de la secuencia de conmutación seleccionada como transición de conmutación seleccionada, de manera que al menos se conmuta una fase a un nivel de la tensión que corresponde a la transición de conmutación; en el que las secuencias de conmutación son generadas de la siguiente manera:
- 15 a) generación de una secuencia de conmutación más larga a partir de una secuencia de conmutación más corta, colgando (S14) en la secuencia de conmutación más corta al menos una transición de conmutación posible e inicializando (S10) una primera secuencia de conmutación con una transición de conmutación seleccionada previamente;
- 20 b) cálculo de magnitudes de partida de la máquina eléctrica para la secuencia de conmutación más larga, sobre la base de las transiciones de conmutación de la secuencia de conmutación más larga (S14);
- c) desecho de la secuencia de conmutación más larga, en el caso de que las magnitudes de partida calculadas no estén dentro de límites previamente definidos y/o las magnitudes de partida calculadas se alejen (S16) de un límite previamente definido a medida que transcurre el tiempo;
- 25 generación iterativa de otras secuencias de conmutación a partir de la secuencia de conmutación no desechada según las etapas (a) a (c) (S12 a S18),
- estando **caracterizado** el procedimiento por el cálculo de un límite inferior para calores de calidad sobre la base de valores de calidad ya calculados de secuencias de conmutación completas; y el desecho de secuencias de conmutación, cuyo valor de calidad exceda el límite inferior para valores de calidad.
- 30 2.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el valor de calidad se basa en las pérdidas de conmutación previsible del convertidor o de la frecuencia de conmutación previsible del convertidor en la secuencia de conmutación respectiva.
- 3.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, en el que las secuencias de conmutación contienen elementos de pausa en la secuencia de las transiciones de conmutación, definiendo un elemento de pausa una pasa de conmutación después de una transición de conmutación; en el que la pausa de conmutación se calcula a través del cálculo de magnitudes de partida; en el que el cálculo de magnitudes de partida se basa en un modelo matemático de la máquina eléctrica giratoria o en una aproximación.
- 35 4.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 3, que comprende, además, la generación de una secuencia de conmutación a partir de transiciones de conmutación y elementos de pausa sobre la base de un horizonte de conmutación general, que define en qué secuencia se añaden transiciones de conmutación y elementos de pausa en la secuencia de conmutación.
- 40 5.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en el que durante el cálculo de magnitudes de partida se calcula en qué instante en el futuro una trayectoria de una magnitud de partida encuentra un límite superior o inferior previamente definido.
- 45 6.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el cálculo del instante se realiza analíticamente, utilizando un procedimiento de optimización para el cálculo de puntos de anulación, a través de aproximación de función trigonométrica a través de series de Taylor y/o a través de aproximación de función trigonométrica a través de funciones polinomiales unitarias.
- 50 7.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5 ó 6, en el que la resistencia de flujo del estator entra en el cálculo durante el cálculo del instante.
- 55 8.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en el que el cálculo de trayectorias de magnitudes de partida se basa en un modelo matemático de la máquina giratoria y en una interpolación; en el que las magnitudes de partida se interpolan en un intervalo de tiempo, que comprende un número predeterminado de etapas discretas de tiempo; en el que en el intervalo para al menos tres instantes se calculan las magnitudes de

partida con el modelo matemático.

9.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, calcular un valor de calidad para la secuencia de conmutación de la longitud n durante la iteración.

5 10.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende, además, calcular el valor de calidad utilizando el límite superior para una longitud esperada máxima de una secuencia de conmutación.

11.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en el que se calcula en primer lugar el valor de calidad de una secuencia de conmutación prometedor; en el que la secuencia de conmutación prometedor se basa en al menos una de:

10 una secuencia de conmutación óptima de un ciclo de control precedente,
una secuencia de conmutación óptima, que ha sido calculada en una etapa de optimización precedente con un horizonte de conmutación más corto que un horizonte de conmutación actual.

12.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, en el que se calcula una secuencia de conmutación a investigar con prioridad máxima, en el que durante la iteración siguiente se investiga la secuencia de conmutación con máxima prioridad.

15 13.- Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, en el que la fijación de la prioridad se realiza con la ayuda de al menos una de las siguientes reglas:

fijación de la prioridad de secuencias de conmutación para las que existe una probabilidad más elevada de que conduzcan a un valor límite bajo;
20 fijación de la prioridad de secuencias de conmutación para las que existe una probabilidad más elevada de que mantengan las magnitudes de partida dentro de límites previamente definidos y/o las magnitudes de partida se aproximen a los límites previamente definidos a medida que aumenta el tiempo;
fijación de prioridad de secuencias de conmutación, para las que es previsible, en virtud de una estimación, que conduzcan a pausas de conmutación largas sin transiciones de conmutación;
25 fijación de prioridad de secuencias de conmutación con la ayuda de sus valores de calidad;
fijación de prioridad de secuencias de conmutación con la ayuda de su longitud.

14.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, terminar la generación de secuencias de conmutación cuando todas las secuencias de conmutación han sido generadas hasta una longitud predeterminada.

30 15.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, terminar la generación de secuencias de conmutación cuando se ha alcanzado un límite superior para el número de las secuencias de conmutación generadas o ha concluido el tiempo de cálculo disponible.

16.- Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, terminar la generación de secuencias de conmutación cuando se ha calculado una secuencia de conmutación, cuyo valor de calidad excede un límite inferior para valores de calidad en menos de un porcentaje definido.

35 17.- Control (10) para un convertidor eléctrico (2), que está realizado para ejecutar el procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 16.

18.- Sistema de motor, que comprende: una máquina eléctrica giratoria (1); un convertidor eléctrico (2) con un control (10) de acuerdo con la reivindicación 17, que está realizado para alimentar corriente a la máquina eléctrica giratoria (1).

40 19.- Programa de ordenador que, cuando es ejecutado en un procesador (16), instruye al procesador a ejecutar las etapas del procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 6.

20.- Medio legible por ordenador, en el que está memorizado un programa de ordenador que, cuando es ejecutado en un procesador (16), instruye al procesador a ejecutar las etapas del procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 16.

45

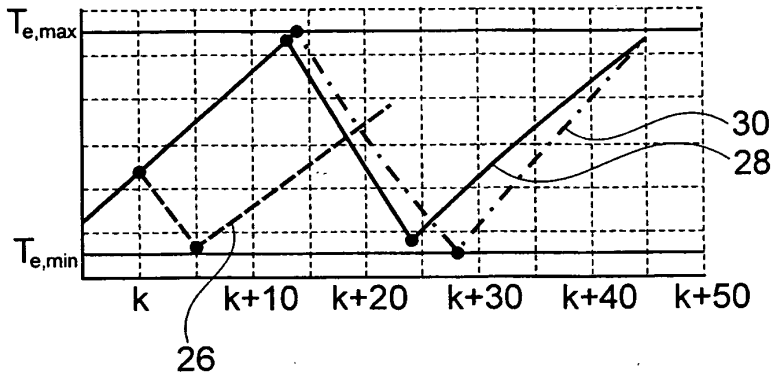


Fig. 2a

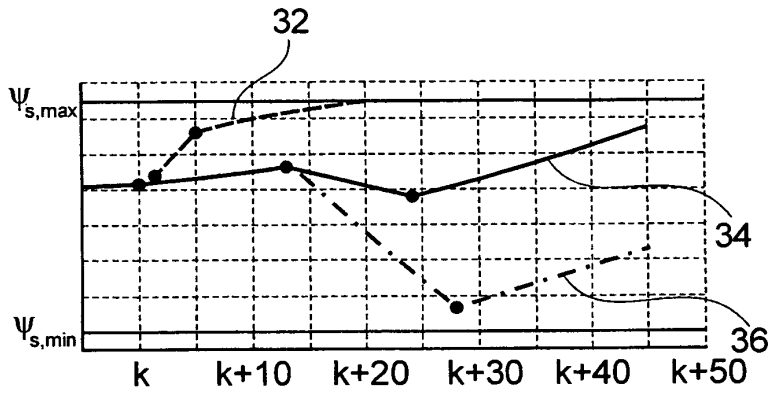


Fig. 2b

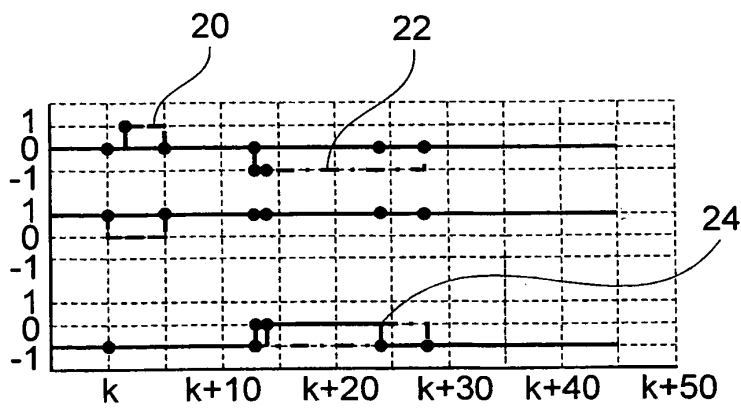


Fig. 2c

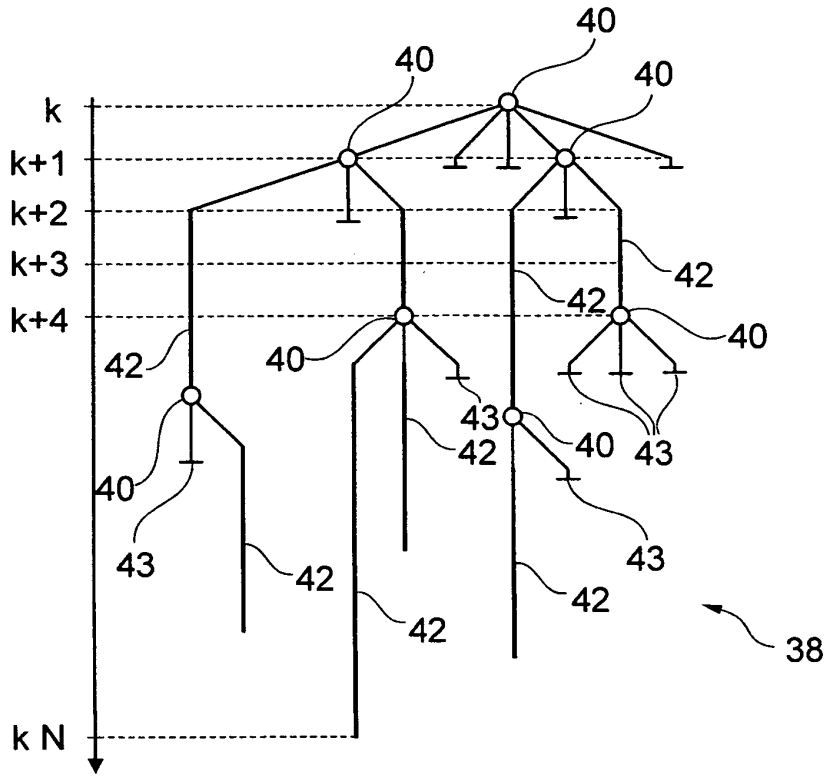


Fig. 3

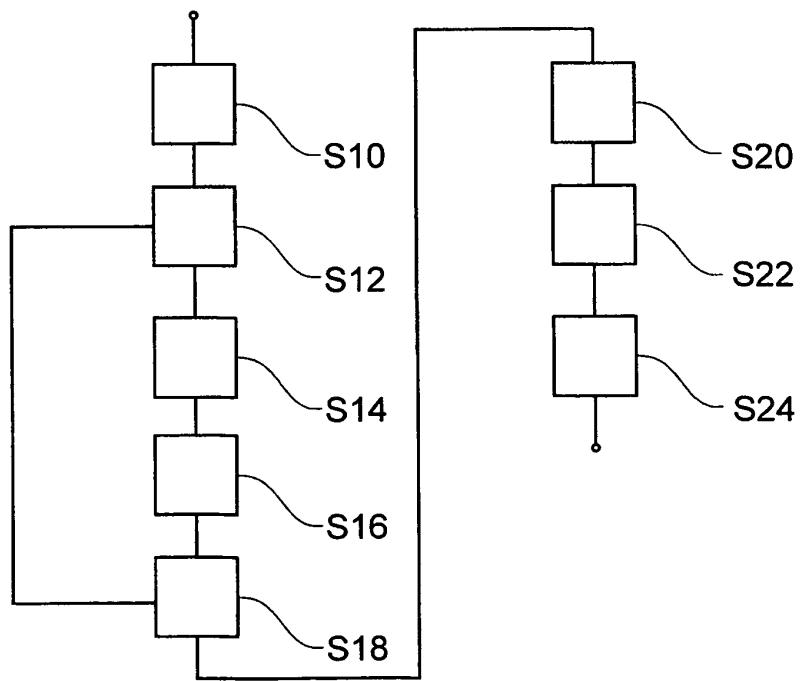


Fig. 4

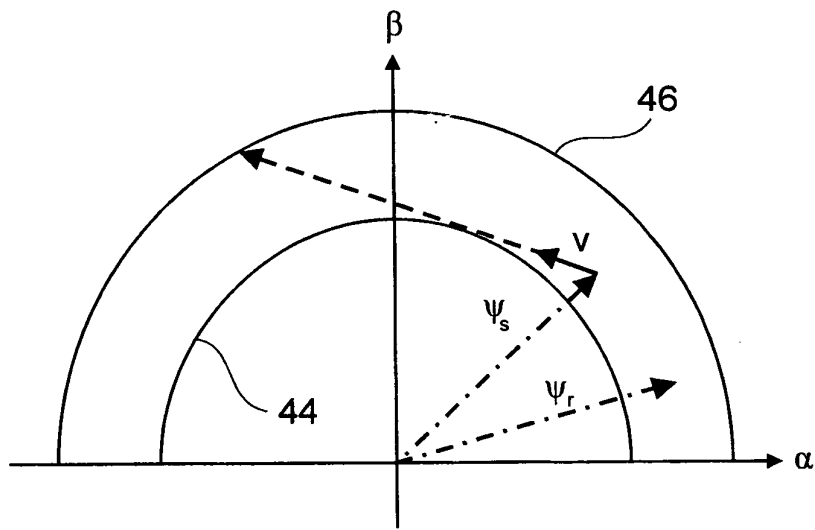


Fig. 5

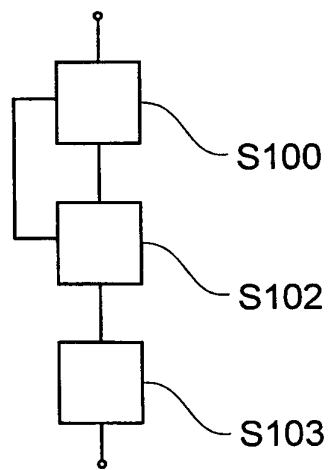


Fig. 6

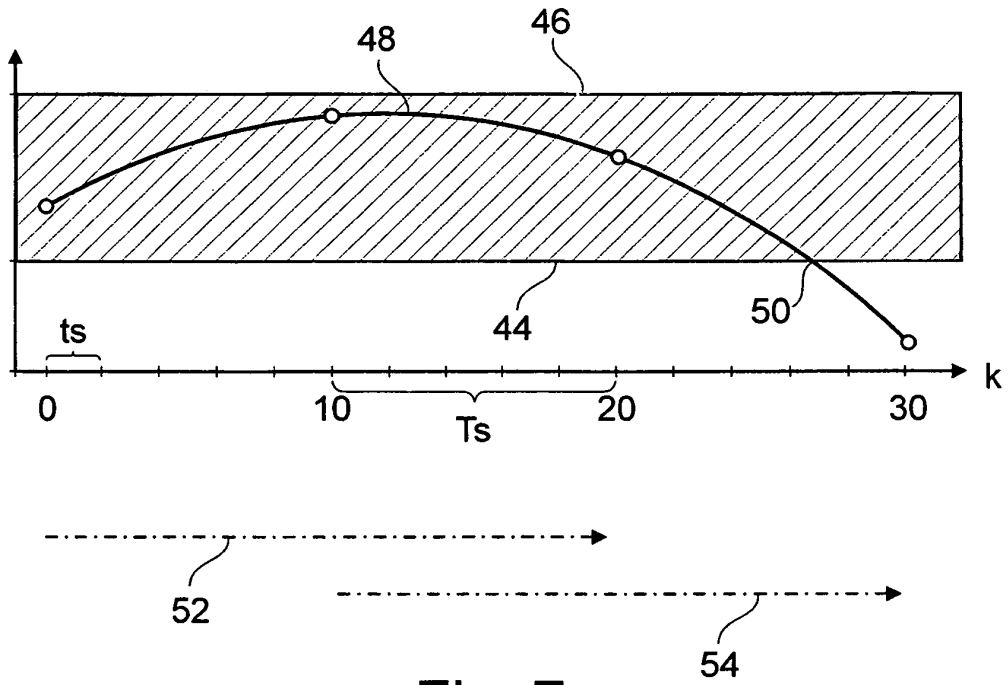


Fig. 7

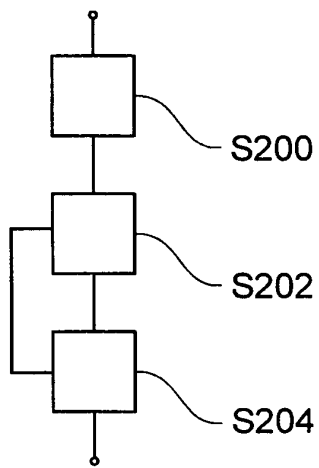


Fig. 8

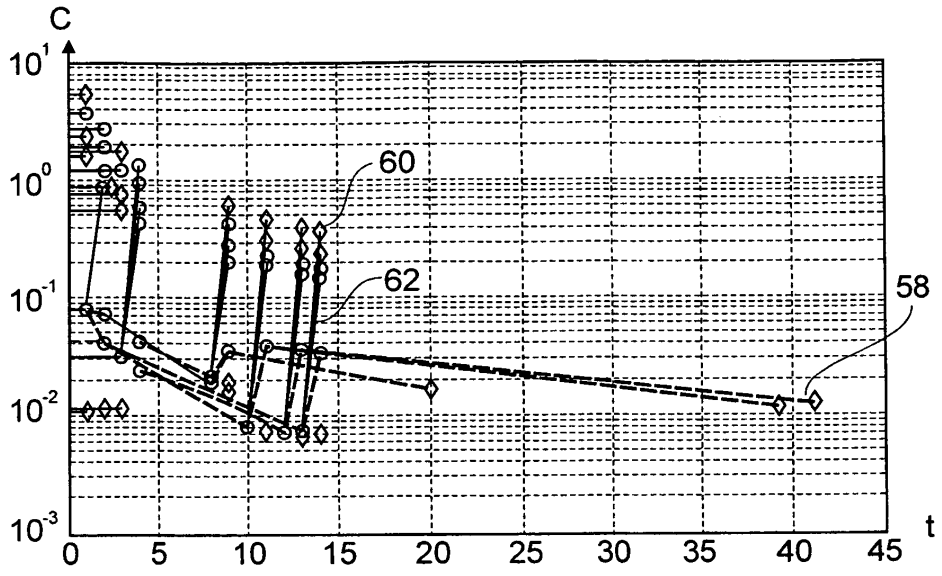


Fig. 9

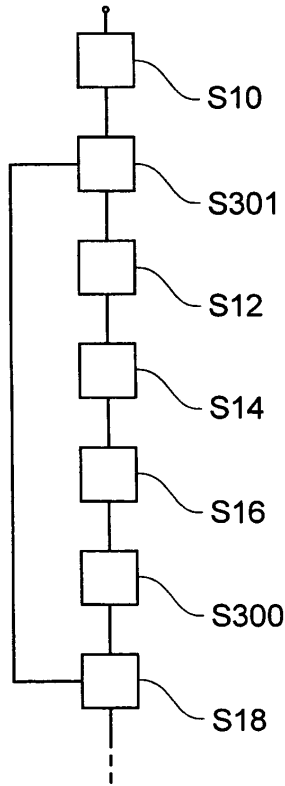


Fig. 10

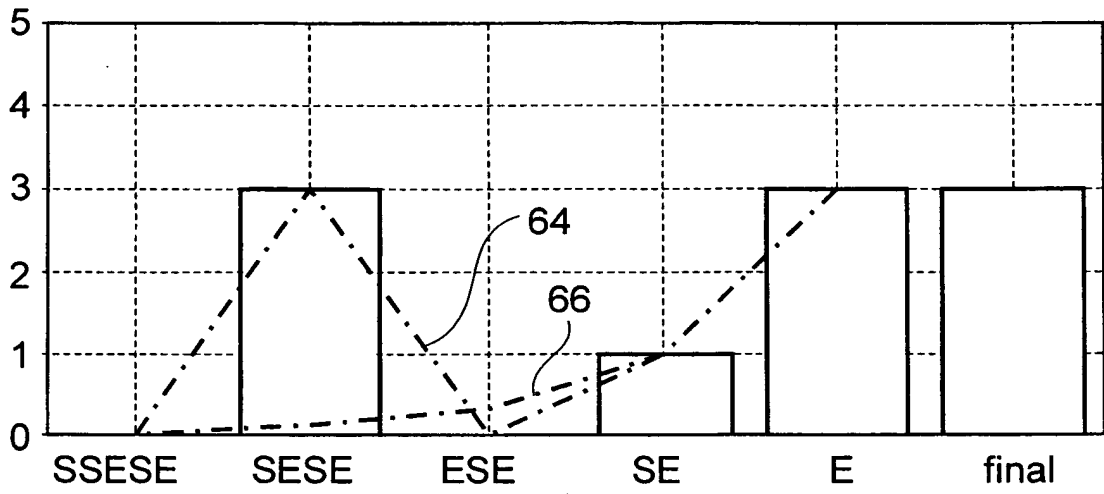


Fig. 11

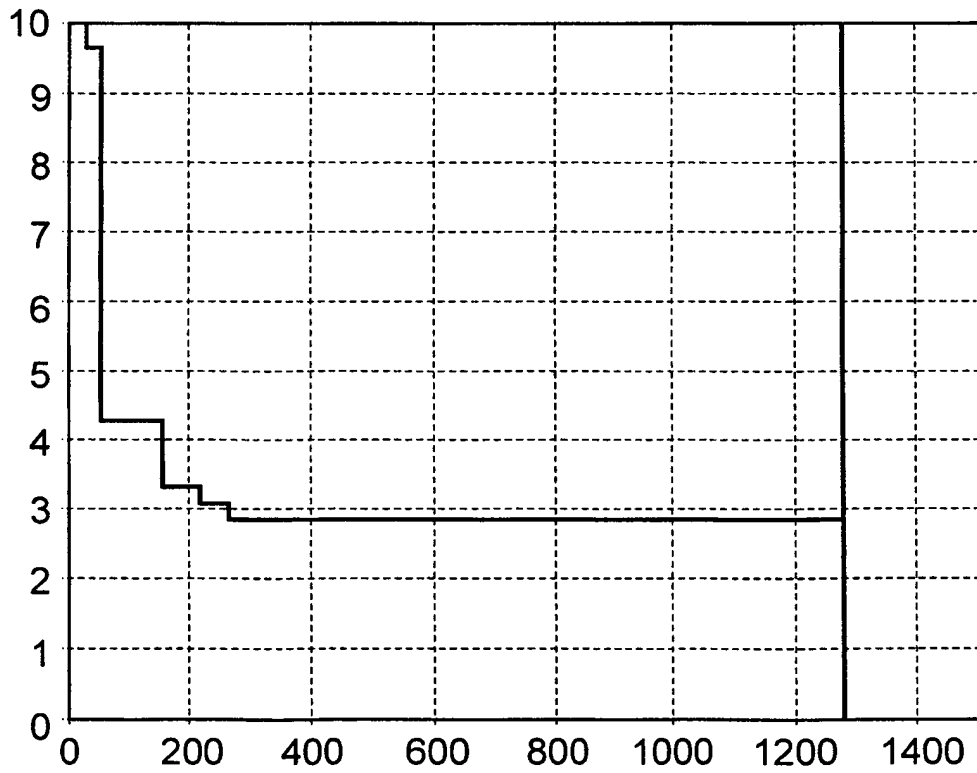


Fig. 12