

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 733 738**

21 Número de solicitud: 201930833

51 Int. Cl.:

G05B 13/02 (2006.01)

H02M 7/66 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

26.09.2019

43 Fecha de publicación de la solicitud:

02.12.2019

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

17.07.2020

Fecha de concesión:

11.09.2020

45 Fecha de publicación de la concesión:

18.09.2020

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)

Avda. Ramiro de Maeztu, nº 7

28040 MADRID (Madrid) ES y

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (50.0%)

72 Inventor/es:

RAMÍREZ PRIETO, Dionisio;

EBRAHIM ZAREI, Mohammad;

MARTINEZ RODRIGO, Fernando y

HERRERO DE LUCAS, Luis Carlos

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

54 Título: **MÉTODO Y SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO DE UN CONVERTIDOR CC/CA**

57 Resumen:

Método y sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA.

Se divulga un método y un sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA (1) para transmisión en corriente continua de alta tensión. El convertidor CC/CA (1) tiene una tensión de entrada (v_{DC}) y un vector tensión de salida (\vec{v}_{MMC}) cuyos valores posibles definen una pluralidad de hexágonos. Asimismo, el convertidor CC/CA (1) está configurado para proporcionar a una carga un vector tensión de carga (\vec{v}_g) y un vector corriente de carga (\vec{i}_g). El método y sistema comprenden calcular un vector tensión de salida de referencia (\vec{v}_{MMC}^*), a partir a partir del vector tensión de red (\vec{v}_g), del vector corriente de red (\vec{i}_g), y de los valores de referencia de las potencias activa (P_g^*) y reactiva (Q_g^*), para minimizar una función de coste que incluye los errores de la potencia activa y reactiva.

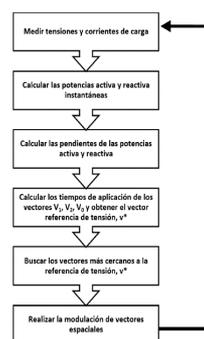


FIG. 11

ES 2 733 738 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

MÉTODO Y SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO DE UN CONVERTIDOR CC/CA

5 **Objeto de la invención**

La presente invención se refiere al campo de la electrónica de potencia, y más concretamente al sector de la técnica dedicado a los convertidores electrónicos para la conversión entre corriente continua "CC" y corriente alterna "CA".

10

Antecedentes de la invención

Los convertidores continua alterna emplean habitualmente reguladores tipo proporcional integral (PI), que se implementan con facilidad pero que son difíciles de ajustar y pueden dar lugar a una respuesta lenta. Se encargan de controlar las potencias activa y reactiva, la velocidad, el par y el flujo magnético de los motores/generadores, y las tensiones y corrientes de los generadores.

Otra solución surgida hace unos 30 años es la de controladores predictivos basados en modelos (Model-based Predictive Control, MPC), que es considerada uno de los avances más importantes en teoría control. Esta solución conocida en el estado de la técnica se basa en minimizar una función de coste que incluye, por ejemplo, el error entre la referencia y el valor real de la potencia activa/reactiva o de la corriente. La mencionada solución del estado de la técnica se puede encontrar en "*IEEE Transactions on Industrial Electronics, Four-Switch Three Phase Operation of Grid Side Converter of Doubly Fed Induction Generator with Three Vectors Predictive Direct Power Control Strategy*, M.E. Zarei, C. Veganzones, J. Rodríguez y D. Ramírez" e "*IEEE Transactions on Power Electronics, Three-phase four-switch converter for SPMS Generators based on Model Predictive Current Control for Wave Energy Applications*, M.E. Zarei, D. Ramirez, C. Veganzones, J. Rodríguez".

30

Existen dos clases de MPC, Continuous Control Set MPC (CCS-MPC) y Finite Control Set MPC (FCS-MPC). En el primer grupo, un modulador genera los estados de conmutación del convertidor electrónico a partir de una salida continua del controlador predictivo. En el segundo grupo se utiliza el conocido conjunto finito de posibles salidas generables por el convertidor electrónico para resolver el problema de optimización. La presente invención se encuadra en este segundo grupo FSC-MPC.

35

Los sistemas de control predictivo FSC-MPC obtienen como resultado de sus cálculos, los tiempos de aplicación de los vectores espaciales que genera el convertidor electrónico, por lo que hacen innecesario utilizar una etapa de Modulación de Vectores Espaciales (SVM).

5

La presente invención consiste en una modificación del procedimiento básico de cálculo del vector de referencia de tensión en la parte de corriente alterna del convertidor electrónico, cuyo objetivo es reducir y hacer constante el tiempo de cálculo añadiendo una etapa SVM.

10

Para poder explicar la invención, en primer lugar se va a explicar en qué consiste el procedimiento básico en un caso concreto donde la función de coste incluye los errores en las potencias activa y reactiva. La explicación del procedimiento básico se hace paso a paso.

15

1. Calcular las pendientes de la potencia activa (S_{P1} , S_{P2} , S_{P0}) y la potencia reactiva (S_{Q1} , S_{Q2} , S_{Q0}) que el convertidor electrónico intercambia con el sistema al que está conectado:

$$S_{Pj} = \left. \frac{dP_g}{dt} \right|_{\vec{v}_j}$$

$$S_{Qj} = \left. \frac{dQ_g}{dt} \right|_{\vec{v}_j}$$

y que están provocadas por cada vector espacial \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 que el convertidor electrónico genera.

20

Los vectores \vec{V}_1 , \vec{V}_2 son los dos vectores espaciales que definen el primer sector del hexágono definido por los 6 vectores espaciales no nulos que un convertidor de dos niveles es capaz de generar, Fig. 1, y \vec{V}_0 el vector espacial de módulo nulo. Estas pendientes se pueden calcular mediante el procedimiento indicado en "IEEE Transactions on Industrial Electronics, Four-Switch Three Phase Operation of Grid Side Converter of Doubly Fed Induction Generator with Three Vectors Predictive Direct Power Control Strategy, M.E. Zarei, C. Veganzones, J. Rodríguez y D. Ramírez".

25

El convertidor electrónico genera los vectores espaciales \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 sucesivamente a lo largo de un periodo, T_s , que empieza en el instante k y termina en el instante $k+1$.

30

Las potencias activa y reactiva al final de dicho periodo T_s (instante $k+1$) se pueden estimar como la suma de los efectos que cada vector espacial generado por el convertidor electrónico provoca:

$$P_g(k+1) = P_g(k) + S_{P1}t_{V1} + S_{P2}t_{V2} + S_{P0}t_{V0}$$

$$Q_g(k+1) = Q_g(k) + S_{Q1}t_{V1} + S_{Q2}t_{V2} + S_{Q0}t_{V0}$$

5

Donde S_{P1} , S_{P2} y S_{P0} y S_{Q1} , S_{Q2} y S_{Q0} son las pendientes en la potencia activa y reactiva causadas por los sucesivos vectores de tensión generados por el convertidor electrónico, y t_{V1} , t_{V2} , t_{V0} expresan sus tiempos durante los cuales se han aplicado los vectores dentro del periodo T_s .

10

- Definir una función de coste que en este caso incluye los errores de las potencias activa y reactiva al final de cada periodo, y donde "*" significa valor de referencia,

$$F(k+1) = \left(P_g(k+1) - P_g^*(k) \right)^2 + \left(Q_g(k+1) - Q_g^*(k) \right)^2$$

15

- Calcular la duración óptima de los tiempos de aplicación t_{V1} , t_{V2} , t_{V0} de los vectores $(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0)$, desde el punto de vista de minimizar la función de coste.

Si los tiempos de aplicación calculados t_{V1} , t_{V2} , t_{V0} son positivos, eso significa que el vector tensión del convertidor de referencia \vec{v}^* se encuentra en el primer sector. Entonces, el vector solución que minimiza la función de coste se puede reconstruir promediando los vectores \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 utilizando t_{V1} , t_{V2} , t_{V0} y el periodo T_s mediante la ecuación:

20

$$\vec{v}^* = v_\alpha^* + jv_\beta^* = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_{V1}}{T_s} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_{V2}}{T_s} + \vec{V}_0 \cdot \frac{t_{V0}}{T_s}$$

25

donde T_s es el periodo del modulador PWM y v_α^* , v_β^* las componentes en los ejes horizontal y vertical del vector solución.

En caso de que alguno de los tiempos de aplicación t_{V1} , t_{V2} , t_{V0} calculados sea negativo, significa que el vector solución \vec{v}^* no se encuentra en el primer sector del hexágono y hay que buscarlo en el segundo sector, donde los vectores espaciales que lo definen son \vec{V}_2 ,

30

\vec{V}_3 y \vec{V}_0 . Si los nuevos tiempos de aplicación t_{v_2} , t_{v_3} , t_{v_0} son positivos, entonces el vector solución \vec{v}^* se encuentra en el segundo sector, y si alguno de los tiempos es negativo, hay que seguir probando en los siguientes sectores hasta seleccionar el sector correcto de entre los seis posibles dentro del hexágono hasta obtener unos tiempos (t_{v_j} , $t_{v_{j+1}}$, t_{v_0}) positivos.

5

4. Generar el vector solución \vec{v}^* utilizando los tiempos calculados correspondientes al sector correcto.

10 Este procedimiento tiene dos inconvenientes. El primer inconveniente es que precisa de varias iteraciones de cálculo hasta encontrar el sector correcto. El segundo inconveniente es que el número de iteraciones no es siempre el mismo. Esto hace que el algoritmo sea más lento y que tenga una duración indeterminada.

15 Cuando el convertidor es de dos niveles, el número máximo de sectores en los que se puede encontrar el vector espacial solución \vec{v}^* es 6, Fig. 1, pero cuando el número de niveles del convertidor aumenta, el número de sectores aumenta exponencialmente, por ejemplo, para cinco niveles hay 96 sectores. Esto dificulta extraordinariamente el procedimiento.

20 La presente invención mejora el procedimiento anteriormente descrito, ya que consigue obtener los tiempos de aplicación de los vectores espaciales en una única iteración, resultando un algoritmo más rápido y de duración predeterminada.

25 Esta invención es aplicable a convertidores continua/alterna que se utilizan en muy diversas aplicaciones, como control de motores de corriente alterna, conexión a red de fuentes de energía renovable, control de generadores eléctricos, STATCOM, transmisión HVDC, etc. Aunque esta invención es aplicable tanto a convertidores de dos niveles como multinivel, su ventaja es tanto mayor cuanto mayor sea el número de niveles.

30 **Descripción de la invención**

La presente invención soluciona los problemas, anteriormente descritos, para encontrar el sector donde se encuentra el vector espacial solución \vec{v}^* y poder así calcular los tiempos de aplicación de los vectores espaciales que definen dicho sector. La presente invención
 35 consigue obtener los tiempos de aplicación de los vectores espaciales en una única iteración, resultando un algoritmo más rápido y de duración predeterminada. Aunque esta

invención es aplicable tanto a convertidores de dos niveles como multinivel, su ventaja es tanto mayor cuanto mayor sea el número de niveles.

Por tanto, en un primer aspecto de la invención, se divulga un método de control predictivo de un convertidor CC/CA. El convertidor CC/CA comprende una tensión de entrada (v_{DC}) y un vector tensión de salida ($\overrightarrow{v_{MMC}}$) con una pluralidad de valores posibles, estando el convertidor CC/CA configurado para proporcionar a una carga un vector tensión de carga ($\overrightarrow{v_g}$) y un vector corriente de carga ($\overrightarrow{i_g}$). El método comprende los siguientes pasos:

- medir el vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$) y el vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$);
- calcular las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$);
- calcular las potencias activa (P_g) y reactiva (Q_g) entregadas a la red, a partir de las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y de las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$P_g = 1.5 \cdot (v_{g\alpha} i_{g\alpha} + v_{g\beta} i_{g\beta})$$

$$Q_g = 1.5 \cdot (v_{g\beta} i_{g\alpha} - v_{g\alpha} i_{g\beta})$$

- calcular las pendientes de potencia activa (S_{P1} , S_{P2} , S_{P0}) y reactiva (S_{Q1} , S_{Q2} , S_{Q0}), a partir de las componentes vertical y horizontal del vector de intensidad de red ($\overrightarrow{i_g}$) y del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$S_{Pj} = \left. \frac{dP_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha} V_{j\alpha} + v_{g\beta} V_{j\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g - \omega_s Q_g$$

$$S_{Qj} = \left. \frac{dQ_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta} V_{j\alpha} - v_{g\alpha} V_{j\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g + \omega_s P_g$$

para $j=1, 2, 0$;

- estimar las potencias activa y reactiva al final del period (instante $k+1$) como la suma de los efectos de cada vector empleado en la modulación:

$$P_g(k+1) = P_g(k) + S_{P1} t_1 + S_{P2} t_2 + S_{P0} t_0$$

$$Q_g(k+1) = Q_g(k) + S_{Q1} t_1 + S_{Q2} t_2 + S_{Q0} t_0$$

donde S_{P1} , S_{P2} y S_{P0} son las pendientes de la potencia activa de los correspondientes vectores de tensión; S_{Q1} , S_{Q2} y S_{Q0} representan las pendientes de la potencia reactiva

para los vectores espaciales seleccionados; y, t_1 , t_2 , t_0 expresan sus tiempos de duración;

- definir una función de coste que incluye los errores de las potencias activa y reactiva al final de cada periodo, donde “ * ” significa valor de referencia, donde la función de coste comprende la siguiente expresión:

$$F(k+1) = \left(P_g(k+1) - P_g^*(k) \right)^2 + \left(Q_g(k+1) - Q_g^*(k) \right)^2$$

- calcular la duración óptima de los tiempos de aplicación (t_1 , t_2 , t_0) de los vectores (\vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0), para minimizar la función de coste:

$$t_{V1} = \frac{\left(P_g(k) - P_g^*(k) \right) \cdot (S_{Q2} - S_{Q0}) + \left(Q_g(k) - Q_g^*(k) \right) \cdot (S_{P0} - S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} + \frac{T_s(S_{Q2} \cdot S_{P0} - S_{Q0} \cdot S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})}$$

$$t_{V2} = \frac{\left(P_g(k) - P_g^*(k) \right) \cdot (S_{Q0} - S_{Q1}) + \left(Q_g(k) - Q_g^*(k) \right) \cdot (S_{P1} - S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} + \frac{T_s(S_{Q0} \cdot S_{P1} - S_{Q1} \cdot S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})}$$

$$t_{V0} = T_s - t_{V1} - t_{V2}$$

donde T_s es el periodo de conmutación de los vectores espaciales generados;

- calcular las componentes en los ejes horizontal ($v_{MMC\alpha}^*$) y vertical ($v_{MMC\beta}^*$) de la tensión de salida del convertidor de referencia (\vec{v}_{MMC}^*), a partir de los tiempos de aplicación (t_1 , t_2 , t_0) y de los vectores (\vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0), mediante la ecuación:

$$\vec{v}_{MMC}^* = v_{MMC\alpha}^* + jv_{MMC\beta}^* = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_1}{T_s} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_2}{T_s} + \vec{V}_0 \cdot \frac{t_0}{T_s}$$

generar unos parámetros de configuración para que el vector tensión de salida del convertidor CC/CA (\vec{v}_{MMC}) coincida en promedio con el vector tensión de salida de referencia (\vec{v}_{MMC}^*), aplicando un algoritmo SVM multinivel que selecciona en cada ciclo los hexágonos adecuados, para los cuales, unas componentes trifásicas del vector tensión de salida (\vec{v}_{MMC}), y/o unos tiempos de conmutación de unos transistores que componen el convertidor CC/CA, para que la tensión de salida (\vec{v}_{MMC}) promedie el vector de referencia

$\overrightarrow{v_{MMC}^*}$.

En una forma de realización del método de control predictivo de un convertidor CC/CA, el método adicionalmente comprende, una vez transcurrido un periodo predeterminado, repetir los pasos definidos previamente para el primer aspecto de la invención, para el cálculo y aplicación de un nuevo vector tensión de salida de referencia ($\overrightarrow{v_{MMC}^*}$).

En una forma de realización del método de control predictivo de un convertidor CC/CA, el método adicionalmente comprende generar unos parámetros de configuración se lleva a cabo mediante un modulador de vectores espaciales multinivel.

En un segundo aspecto de la invención se presenta un sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA que comprende medios de cálculo y medios de configuración adaptados para determinar y aplicar unos parámetros de configuración de un convertidor continua/alterna a partir de una tensión de entrada, un vector tensión de carga, un vector corriente de carga y una pluralidad de valores posibles de un vector tensión de salida.

En una forma de realización del segundo aspecto de la invención, el convertidor CC/CA es un convertidor modular multinivel, el cual comprende una tensión de entrada (v_{DC}) y un vector tensión de salida ($\overrightarrow{v_{MMC}}$) con una pluralidad de valores posibles. En este caso, el convertidor modular multinivel está configurado para proporcionar a una carga un vector tensión de carga ($\overrightarrow{v_g}$) y un vector corriente de carga ($\overrightarrow{i_g}$). El sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA comprende:

- unos medios de medida configurados para medir el vector tensión de carga ($\overrightarrow{v_g}$) y el vector corriente de carga ($\overrightarrow{i_g}$) y generar unos parámetros de control; y,
- un conjunto de medios configurados para llevar a cabo los pasos del método definido en una cualquiera de las realizaciones del primer aspecto de la invención, a partir de los parámetros de control.

En una forma de realización, el conjunto de medios comprende: un primer elemento de conversión; un segundo elemento de conversión; primeros medios de cálculo; segundos medios de cálculo; y, un modulador de vectores espaciales multinivel.

En particular, el conjunto de medios están configurado para:

- Calcular los tiempos de aplicación de los vectores espaciales (SVM) del primer

sector, según lo descrito en el primer aspecto de la invención.

- Calcular el vector de tensión de referencia, según lo descrito en el primer aspecto de la invención.

5 Por su parte, los medios de cálculo calculan unos parámetros de configuración (por ejemplo, la duración de los disparos de los IGBT generados y calculados por el propio SVM) a partir de los valores de referencia (normalmente potencias activa/reactiva o corrientes) y aplicar los parámetros de configuración al convertidor. Además, preferentemente, el sistema comprende además, un subconjunto o la totalidad de los siguientes elementos:

10

- Un modulador de vectores espaciales configurado para calcular los parámetros de configuración previamente descritos.

Nótese que cualquier opción preferente o implementación particular del sistema de la invención puede ser aplicado igualmente al método de la invención. Asimismo, los elementos de dicho sistema pueden ser adaptados o configurados para implementar cualquier paso del método de la invención, de acuerdo con cualquier implementación particular de ambos.

20 Finalmente, en un tercer aspecto de la invención se presenta un programa de ordenador que comprende medios de código de programa de ordenador adaptados para implementar el método descrito, al ejecutarse en un procesador digital de la señal, un circuito integrado específico de la aplicación, un microprocesador, un microcontrolador o cualquier otra forma de hardware programable. Nótese que cualquier opción preferente e implementación particular del dispositivo y sistema de la invención puede ser aplicado al método y al programa de ordenador de la invención, y viceversa.

El método, sistema y programa de ordenador de la invención calculan el valor de tensión necesario para generar las variables (normalmente potencias activa/reactiva o corrientes) deseadas en cada aplicación de manera rápida, reduciendo la carga computacional, la amplitud de los armónicos generados, las pérdidas en generadores y el estrés mecánico producido en los devanados. Éstas y otras ventajas de la invención serán aparentes a la luz de la descripción detallada de la misma.

35 **Descripción de las figuras**

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, y para complementar esta descripción, se acompañan como parte integrante de la misma las siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

5

La Figura 1 muestra el hexágono que definen los vectores espaciales que un convertidor electrónico de dos niveles es capaz de generar en corriente alterna.

10

La Figura 2 muestra el hexágono que definen los vectores espaciales que un convertidor electrónico de dos niveles es capaz de generar en corriente alterna, expresados en función de sólo \vec{V}_1 y \vec{V}_2 .

La Figura 3 muestra un esquema de un MMC trifásico, de cuatro interruptores por rama, conocido en el estado de la técnica.

15

La Figura 4 presenta un ejemplo de implementación de un módulo del MMC, en configuración de semi-puente, conocida en el estado de la técnica.

20

La Figura 5 ejemplifica una conexión del MMC a una red eléctrica a través de inductancias y resistencias, conocida en el estado de la técnica.

La Figura 6 ejemplifica los posibles valores del vector de tensión de salida de un convertidor MMC de cinco niveles. Se indican los vectores (\vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0) que limitan el primer sector.

25

La Figura 7 muestra los posibles vectores espaciales que un convertidor multinivel de cuatro interruptores por rama (que dan lugar a 5 niveles de tensión en la forma de onda de salida) puede generar dentro del hexágono y muestra el hexágono exterior definido exclusivamente por los vectores \vec{V}_1 y \vec{V}_2 .

30

La Figura 8 muestra los elementos de medida de tensión y corriente utilizados por una realización preferente de la presente invención, así como un posible escenario de aplicación formado por un MMC y la red a la que se conecta.

35

La Figura 9 presenta los elementos de control que determinan las señales de puerta del convertidor MMC a partir de los parámetros medidos, de acuerdo con una realización preferente de la invención.

La Figura 10 presenta el esquema conjunto de control y potencia. En la figura 10 se muestra en primer lugar la medida de las tensiones y corrientes de carga para calcular con ellas las potencias activa y reactiva instantáneas. A continuación se utilizan junto a los vectores \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , la tensión de la carga y la frecuencia, para obtener las pendientes de dichas potencias. A continuación, las pendientes se emplean junto a los valores reales y de referencia de las potencias, para calcular los tiempos de aplicación de los vectores \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0 y el vector referencia de tensión, \vec{v}^* . Finalmente, se reproduce el vector solución \vec{v}^* utilizando un modulador de vectores espaciales que dispara según corresponda los elementos del inversor.

La Figura 11 describe en un diagrama de flujo el proceso descrito para la Figura 10.

Realización preferente de la invención

15

Listado de referencias.

20

- 1.- Convertidor modular multinivel – Convertidor MMC.
- 2.- Parámetros de configuración.
- 3.- Primer elemento de conversión.
- 4.- Segundo elemento de conversión.
- 5.- Primeros medios de cálculo.
- 6.- Segundos medios de cálculo.
- 7.- Medios de control.

25

30

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (como "comprendiendo", etc.) no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deben interpretarse como excluyentes de la posibilidad de que lo que se describe y define pueda incluir más elementos, etapas, etc. Nótese asimismo que los vectores y componentes acompañados del término "de referencia" deben entenderse en el presente texto como valores objetivo para dichos vectores y componentes, siendo dichos objetivos calculados por el método y sistema de la invención. Es decir, dichos vectores y componentes "de referencia" no son referencias externas de valor fijo, sino que presentan valores variables que pueden cambiar en sucesivas iteraciones de los cálculos realizados por la invención.

35

La realización preferente de la invención se presenta para el caso en que el convertidor

continua alterna sea un convertidor modular multinivel (MMC, del inglés 'Modular Multilevel Converter'), empleado habitualmente para transmisión de energía eléctrica en corriente continua de alta tensión (HVDC). No obstante, la presente invención es válida para cualquier convertidor trifásico, multinivel o no. Las ecuaciones no cambian ni tampoco el procedimiento. Sólo cambia el modulador de vectores espaciales (conocido en el estado del arte) y el propio convertidor electrónico.

En una realización del método de control predictivo de un convertidor continua/alterna, el método comprende:

- Medir un vector tensión de carga y un vector intensidad de carga suministrados a una carga externa.
- Calcular las variables que intervienen en la función de coste a partir de la tensión y la corriente de la carga utilizando en todos los casos los vectores espaciales que definen el primer sector, \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 , Fig. 1.
- Calcular una función de coste para minimizar el error de las magnitudes que intervienen en ella (normalmente potencias activa/reactiva o corrientes).
- Calcular siempre los tiempos de aplicación t_{v1} , t_{v2} , t_{v0} de los vectores espaciales del primer sector, \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 , que permiten minimizar la función de coste.

Si los tres tiempos t_{v1} , t_{v2} , t_{v0} resultan positivos, pueden utilizarse para promediar el vector solución \vec{v}^* sin necesidad de un modulador de vectores espaciales (SVM) en la etapa siguiente.

Si alguno de los tres tiempos t_{v1} , t_{v2} , t_{v0} resultan negativo, no es posible utilizarlos para realizar la modulación del vector solución \vec{v}^* en ningún caso, lo que obligaría a realizar iteraciones hasta obtener valores sólo positivos.

Sin embargo, la ventaja de esta invención reside en que, si alguno de los tres tiempos t_{v1} , t_{v2} , t_{v0} resulta negativo, siempre es posible reconstruir correctamente, sin cometer error, el vector solución \vec{v}^*

$$\vec{v}^* = v_{\alpha}^* + jv_{\beta}^* = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_{v1}}{T_s} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_{v2}}{T_s} + \vec{V}_0 \cdot \frac{t_{v0}}{T_s}$$

a pesar de que alguno de los tiempos t_{v1} , t_{v2} , t_{v0} resulte negativo. Esto permite siempre realizar la modulación en un SVM conocido en el estado del arte, sin tener que realizar las iteraciones descritas anteriormente para encontrar el sector que contiene al vector referencia de tensión que minimiza la función de coste.

La razón es que, como se ve en la Fig. 1, cada sector del hexágono está definido por dos vectores de módulo positivo a 60° pero, matemáticamente, esos dos vectores pueden ser siempre \vec{V}_1, \vec{V}_2 si se les permite tener un módulo negativo, tal y como se ve en la Fig. 2.

Así, las coordenadas x, y del vector solución \vec{v}^* pueden siempre calcularse en función de los vectores \vec{V}_1, \vec{V}_2 para cualquier posición en dentro del hexágono:

Sector I

$$v_x = V_{1x} \cdot \frac{t_{v1}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{v2}}{T} + 0 \cdot \frac{t_{v0}}{T}$$

$$v_y = V_{1y} \cdot \frac{t_{v1}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{v2}}{T} + 0 \cdot \frac{t_{v0}}{T}$$

Sector II

$$v_x = V_{2x} \cdot \frac{t_{v2}}{T} + V_{3x} \cdot \frac{t_{v3}}{T} = V_{1x} \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{v2}}{T}$$

$$v_y = V_{2y} \cdot \frac{t_{v2}}{T} + V_{3y} \cdot \frac{t_{v3}}{T} = 0 \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{v2}}{T}$$

Sector III

$$v_x = V_{3x} \cdot \frac{t_{v3}}{T} + V_{4x} \cdot \frac{t_{v4}}{T} = V_{1x} \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{v2}}{T}$$

$$v_y = V_{3y} \cdot \frac{t_{v3}}{T} + V_{4y} \cdot \frac{t_{v4}}{T} = 0 \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{v2}}{T}$$

Sector IV

$$v_x = V_{4x} \cdot \frac{t_{v4}}{T} + V_{5x} \cdot \frac{t_{v5}}{T} = V_{1x} \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{v2 < 0}}{T}$$

$$v_y = V_{4y} \cdot \frac{t_{v4}}{T} + V_{5y} \cdot \frac{t_{v5}}{T} = 0 \cdot \frac{t_{v1 < 0}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{v2 < 0}}{T}$$

Sector V

$$v_x = V_{5x} \cdot \frac{t_{v5}}{T} + V_{6x} \cdot \frac{t_{v6}}{T} = V_{1x} \cdot \frac{t_{v1}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{v2 < 0}}{T}$$

$$v_y = V_{5y} \cdot \frac{t_{v5}}{T} + V_{6y} \cdot \frac{t_{v6}}{T} = 0 \cdot \frac{t_{v1}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{v2 < 0}}{T}$$

Sector VI

$$v_x = V_{6x} \cdot \frac{t_{V6}}{T} + V_{1x} \cdot \frac{t_{V1}}{T} = V_{1x} \cdot \frac{t_{V1}}{T} + V_{2x} \cdot \frac{t_{V2 < 0}}{T}$$

$$v_y = V_{6y} \cdot \frac{t_{V6}}{T} + V_{1y} \cdot \frac{t_{V1}}{T} = 0 \cdot \frac{t_{V1}}{T} + V_{2y} \cdot \frac{t_{V2 < 0}}{T}$$

5

La función del vector \vec{V}_0 es promediar el módulo del vector solución, pero no define el sector del hexágono. Además t_{V0} sólo influye en el cálculo de t_{Vj} , t_{Vj+1} pero no añade valor a las componentes “x,y” del vector solución \vec{v}^* ya que el vector \vec{V}_0 tiene módulo nulo.

10

El hecho de que sea posible reconstruir el vector solución a pesar de que algún tiempo resulte negativo, siempre permite utilizar \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 y calcular (t_1, t_2, t_0) a pesar de que el vector solución \vec{v}^* se encuentre realmente en otro sector del hexágono diferente al sector 1. Es decir, que aunque el vector solución \vec{v}^* se encuentre, por ejemplo, en el sector III definido por \vec{V}_3 , \vec{V}_4 , es posible calcularlo utilizando $-\vec{V}_1$, \vec{V}_2 , según se ve en la Fig. 2.

15

Por tanto, en esta invención, los tiempos de aplicación de los vectores t_{Vj} , t_{Vj+1} , t_{V0} resultado del FSC-MPC no se utilizan para realizar la modulación del vector solución \vec{v}^* si no para calcular las componentes del vector solución \vec{v}^* , que posteriormente se modula añadiendo una etapa SVM.

20

- Reconstruir el vector de tensión de referencia \vec{v}^* mediante los tiempos de aplicación (t_1, t_2, t_0) calculados previamente y el periodo T_s .
- Calcular la posición del vector solución \vec{v}^* mediante cualquier sistema conocido en el estado del arte, para escoger 3 vectores espaciales con el que reproducirlo mediante modulación. De esta manera, la combinación lineal de los 3 vectores espaciales de tensión de salida del convertidor electrónico promediados durante sus tiempos de aplicación genera una tensión de salida que iguala en promedio al vector de tensión de salida de referencia deseado.
- Realizar con el convertidor electrónico la modulación de vectores espaciales que promedia el vector solución \vec{v}^* .

25

30

35

La figura 3 muestra un convertidor MMC (1) para HVDC conocido en el estado del arte, que

sirve como ejemplo de aplicación del método y sistema de la invención. En particular, se trata de un MMC trifásico con seis ramas (R1, R2, R3, R4, R5, R6) y cinco módulos (también denominados SM, del inglés 'Switching-Module') por rama (SM1, SM2, SM3, SM4). La zona de corriente continua del convertidor presenta una tensión de entrada (v_{DC}), dividida en dos tensiones simétricas ($+v_{DC}/2$, $-v_{DC}/2$). La primera rama (R1), segunda rama (R2) y tercera rama (R3) están conectadas a la tensión simétrica positiva ($+v_{DC}/2$); mientras que la cuarta rama (R4), la quinta rama (R5) y la sexta rama (R6) están conectadas a la tensión simétrica negativa ($-v_{DC}/2$). A su vez, las ramas están conectadas dos a dos a través de parejas de inductancias (L), estableciéndose un vector tensión de salida (\vec{v}_o) con tres componentes trifásicas (v_{oa} , v_{ob} , v_{oc}).

La figura 4 presenta una posible realización de un SM (denotado como SMk por ser válido para cualquiera de los cinco submódulos de cada rama: SM1, SM2, SM3, SM4) denominada semipunte (en inglés 'half-bridge'). La topología en semipunte comprende un primer transistor (T1) conectado en paralelo a un primer diodo (D1) y un segundo transistor (T2) conectado en paralelo a un segundo diodo. El ánodo del primer diodo (D1) está conectado al cátodo del segundo diodo (D2) sirviendo como punto de entrada de la corriente de submódulo (i_{SM}) y primer terminal del voltaje de submódulo (v_{SM}). A su vez, el cátodo del primer diodo (D1) está conectado al ánodo del segundo diodo (D2) a través de un condensador (C) con un voltaje de condensador (v_c). Dicho ánodo del segundo diodo actúa a su vez como segundo terminal del voltaje de submódulo (v_{SM}).

La figura 5 ejemplifica la conexión del convertidor MMC (1) a una red (que actúa como carga) mediante tres inductancias de filtro (L_f) y tres resistencias (R_f). Tras las tres inductancias de filtro (L_c) y las tres resistencias (R_f), el vector tensión de salida (\vec{v}_o) se convierte en el vector tensión de carga (\vec{v}_g) con sendas componente trifásicas (v_{ga} , v_{gb} , v_{gc}). En la figura 5 aparecen reflejadas asimismo la intensidad de entrada (i_{DC}); las componentes trifásicas (i_{ga} , i_{gb} , i_{gc}) del vector intensidad de carga (\vec{i}_g); el voltaje de la rama superior (v_{upa}) correspondiente a la primera rama (R1); y el voltaje de la rama inferior (v_{lowa}) correspondiente a la cuarta rama (R4).

Con el fin de ejemplificar los cálculos vectoriales descritos, la figura 6 muestra el conjunto de valores que puede tomar el vector de tensión de salida en un convertidor de cinco niveles. Cada posible vector comprende por lo tanto tres componentes, estando cada componente comprendida entre los niveles 0 y 4. Cada uno de dichos posibles vectores conforma el vértice de un triángulo que, a su vez, conforman una pluralidad de hexágonos. Se indican

los vectores (V1, V2 y V0) que limitan el primer sector. El vector tensión de referencia (v_{ref}) se obtiene como combinación lineal de los vectores V1, V2 y V0.

La figura 7 muestra cómo todos los vectores dentro del hexágono de un convertidor de cinco niveles pueden obtenerse por la combinación lineal de los vectores \vec{V}_1 y \vec{V}_2 siempre que se admitan módulos negativos para ellos.

La figura 8 muestra los medios de medida comprendidos por una realización preferente del sistema de la invención. En la figura 8 también se representan unos parámetros de control (2) del convertidor MMC (1), calculados a partir de dichas componente horizontal ($v_{g\alpha}$) y componente vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red (\vec{v}_g); y de la componente horizontal ($i_{g\alpha}$) y componente vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red (\vec{i}_g).

La figura 9 presenta a su vez una realización preferente de los elementos que calculan los parámetros de control (2) que a su vez ejecutan pasos de realizaciones preferentes del método y el programa de ordenador de la invención. En particular, el sistema comprende un primer elemento de conversión (3) y un segundo elemento de conversión (4) que trasladan las entradas de unos ejes trifásicos (abc) a unos ejes horizontal-vertical ($\alpha\beta$). En particular, el primer elemento de conversión (3) calcula una componente horizontal ($i_{g\alpha}$) y una componente vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red (\vec{i}_g) a partir de las tres componentes trifásicas (i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}) del vector corriente de red (\vec{i}_g). El segundo elemento de conversión (4) calcula una componente horizontal ($v_{g\alpha}$) y una componente vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red (\vec{v}_g) a partir de las componente trifásicas (v_{ga}, v_{gb}, v_{gc}) del vector tensión de carga (\vec{v}_g).

Las componentes vertical y horizontal del vector de intensidad de red (\vec{i}_g) y del vector tensión de red (\vec{v}_g) se introducen en unos primeros medios de cálculo (5), obteniendo unas pendientes de potencia activa (S_{Pabc}) y reactiva (S_{Qabc}), y unos valores de potencia activa (P) y reactiva (Q). Las pendientes de potencia activa (S_{Pabc}) y reactiva (S_{Qabc}), los valores de potencia activa (P) y reactiva (Q), y las referencias de potencia activa (P^*) y reactiva (Q^*), se introducen en unos segundos medios de cálculo (6), obteniendo unas componentes horizontal ($v_{MMC\alpha}^*$) y vertical ($v_{MMC\beta}^*$) del vector tensión de salida de referencia (\vec{v}_{MMC}^*). Los segundos medios de cálculo (6) son preferentemente un controlador predictivo. Finalmente unos medios de control (7), preferentemente conformados por un modulador de vectores espaciales (SVM, del inglés 'Space Vector Modulator') multinivel, calcula los parámetros de

control (2) a partir del vector tensión de salida de referencia ($\overrightarrow{v_{MMC}^*}$).

La figura 10 muestra el esquema conjunto de tensión y control. Se observa la medida de las tensiones y corrientes de la red, que son transformadas en las componentes de los vectores de tensión de red ($v_{g\alpha\beta}$) y de corriente de red ($i_{g\alpha\beta}$), que se emplean para el cálculo de las potencias activa (P_g) y reactiva (Q_g). Posteriormente, se calculan las pendientes de las potencias activa (S_{P1} , S_{P2} , S_{P0}) y reactiva (S_{Q1} , S_{Q2} , S_{Q0}). A continuación, se calculan las componentes ($v_{MMC\alpha}^*$, $v_{MMC\beta}^*$) del vector tensión de salida de referencia. El modulador SVM encuentra el triángulo de la Fig. 7 en el que está situado el vector tensión de salida, y genera los tiempos de aplicación de los tres vectores que delimitan dicho triángulo. Finalmente, la parte de potencia está formada por el convertidor, las inductancias y resistencias de acoplamiento, y la red.

A continuación se detallan los pasos de una realización preferente del método de la invención, que son implementados a su vez por una realización preferente de los primeros y segundos medios de cálculo (5, 6) del sistema. El método comprende:

1. Calcular las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$), a partir de las tensiones (v_{ga} , v_{gb} , v_{gc}) y corrientes de red (i_{ga} , i_{gb} , i_{gc}).
2. Calcular las potencias activa (P_g) y reactiva (Q_g) entregadas a la red, a partir de las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y de las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} P_g &= 1.5 \cdot (v_{g\alpha} i_{g\alpha} + v_{g\beta} i_{g\beta}) \\ Q_g &= 1.5 \cdot (v_{g\beta} i_{g\alpha} - v_{g\alpha} i_{g\beta}) \end{aligned}$$

3. Calcular las pendientes de potencia activa (S_{P1} , S_{P2} , S_{P0}) y reactiva (S_{Q1} , S_{Q2} , S_{Q0}), a partir de las componentes vertical y horizontal del vector de intensidad de red ($\overrightarrow{i_g}$) y del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} S_{Pj} &= \left. \frac{dP_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha} V_{j\alpha} + v_{g\beta} V_{j\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g - \omega_s Q_g \\ S_{Qj} &= \left. \frac{dQ_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta} V_{j\alpha} - v_{g\alpha} V_{j\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g + \omega_s P_g \end{aligned}$$

para $j=1, 2, 0$.

Estas ecuaciones se han obtenido a partir de la teoría conocida en el estado del arte que permite calcular tensiones, corrientes y potencias expresados como vectores espaciales:

$$\frac{dP_g}{dt} = 1.5 \cdot \left(\frac{dv_{g\alpha}}{dt} i_{g\alpha} + \frac{di_{g\alpha}}{dt} v_{g\alpha} + \frac{dv_{g\beta}}{dt} i_{g\beta} + \frac{di_{g\beta}}{dt} v_{g\beta} \right)$$

$$\frac{dQ_g}{dt} = 1.5 \cdot \left(\frac{dv_{g\beta}}{dt} i_{g\alpha} + \frac{di_{g\alpha}}{dt} v_{g\beta} - \frac{dv_{g\alpha}}{dt} i_{g\beta} - \frac{di_{g\beta}}{dt} v_{g\alpha} \right)$$

5

Para calcular las pendientes de las potencias activa y reactiva, hay que calcular las derivadas de la tensión y la corriente en los ejes horizontal (α) y vertical (β). La tensión de una red equilibrada se puede representar como:

$$v_{g\alpha} = v_g \sin \omega_s t$$

$$v_{g\beta} = -v_g \cos \omega_s t$$

donde ω_s es la frecuencia de la red.

10 La derivada de la tensión de red en los ejes horizontal (α) y vertical (β) es:

$$\frac{dv_{g\alpha}}{dt} = \omega_s v_g \cos \omega_s t = -\omega_s v_{g\beta}$$

$$\frac{dv_{g\beta}}{dt} = \omega_s v_g \sin \omega_s t = \omega_s v_{g\alpha}$$

Teniendo en cuenta la ecuación del acoplamiento del convertidor MMC a la red,

$$\overrightarrow{v_{MMC}} = \vec{v}_g + L_f \frac{d\vec{i}_g}{dt} + R_f \vec{i}_g$$

la derivada de la corriente de red se puede expresar como

$$\frac{di_{g\alpha}}{dt} = \frac{v_{GSC\alpha} - v_{g\alpha} - R_f i_{g\alpha}}{L_f}$$

$$\frac{di_{g\beta}}{dt} = \frac{v_{GSC\beta} - v_{g\beta} - R_f i_{g\beta}}{L_f}$$

Entonces, las derivadas de las potencias activa y reactiva se pueden estimar mediante:

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha} v_{GSC\alpha} + v_{g\beta} v_{GSC\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g - \omega_s Q_g$$

$$\frac{dQ_g}{dt} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta} v_{GSC\alpha} - v_{g\alpha} v_{GSC\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g + \omega_s P_g$$

15

4. Estimar las potencias activa y reactiva al final del periodo (instante $k+1$) como la suma de los efectos de cada vector empleado en la modulación:

$$P_g(k+1) = P_g(k) + S_{P1}t_1 + S_{P2}t_2 + S_{P0}t_0$$

$$Q_g(k+1) = Q_g(k) + S_{Q1}t_1 + S_{Q2}t_2 + S_{Q0}t_0$$

Donde S_{P1} , S_{P2} y S_{P0} son las pendientes de la potencia activa de los correspondientes vectores de tension, S_{Q1} , S_{Q2} y S_{Q0} representan las pendientes de la potencia reactiva para los vectores espaciales seleccionados, y t_1 , t_2 , t_0 expresan sus tiempos de duraci3n. Las potencias activa y reactiva al final del periodo (instante k+1), sustituyendo las derivadas particularizadas para \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 , se calculan como:

$$P_g(k+1) = P_g(k) + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha}V_{1\alpha} + v_{g\beta}V_{1\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_1$$

$$+ \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha}V_{2\alpha} + v_{g\beta}V_{2\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_2$$

$$+ \left[\frac{1.5}{L_f} [-(v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_0$$

$$Q_g(k+1) = Q_g(k) + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta}V_{1\alpha} - v_{g\alpha}V_{1\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_1$$

$$+ \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta}V_{2\alpha} - v_{g\alpha}V_{2\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_2$$

$$+ \left[-\frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_0$$

10

- Definir una funci3n de coste que incluye los errores de las potencias activa y reactiva al final de cada periodo, donde * significa valor de referencia,

$$F(k+1) = (P_g(k+1) - P_g^*(k))^2 + (Q_g(k+1) - Q_g^*(k))^2$$

15

La funci3n de coste $F(k+1)$ se obtiene sustituyendo los valores de $P_g(k+1)$ y $Q_g(k+1)$ particularizados para \vec{V}_1 , \vec{V}_2 y \vec{V}_0 :

$$\begin{aligned}
 F(k+1) = & \left[P_g(k) + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha}V_{1\alpha} + v_{g\beta}V_{1\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_1 \right. \\
 & + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha}V_{2\alpha} + v_{g\beta}V_{2\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_2 \\
 & + \left[\frac{1.5}{L_f} [-(v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g(k) - \omega_s Q_g(k) \right] \cdot t_0 - P_g^*(k) \left. \right]^2 \\
 & + \left[Q_g(k) + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta}V_{1\alpha} - v_{g\alpha}V_{1\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_1 \right. \\
 & + \left[\frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta}V_{2\alpha} - v_{g\alpha}V_{2\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_2 \\
 & + \left[-\frac{R_f}{L_f} Q_g(k) + \omega_s P_g(k) \right] \cdot t_0 - Q_g^*(k) \left. \right]^2
 \end{aligned}$$

6. Calcular la duración óptima de los tiempos de aplicación (t_1, t_2, t_0) de los vectores ($\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0$), para minimizar la función de coste:

$$\begin{aligned}
 t_{V1} = & \frac{(P_g(k) - P_g^*(k)) \cdot (S_{Q2} - S_{Q0}) + (Q_g(k) - Q_g^*(k)) \cdot (S_{P0} - S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} \\
 & + \frac{T_s(S_{Q2} \cdot S_{P0} - S_{Q0} \cdot S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} \\
 t_{V2} = & \frac{(P_g(k) - P_g^*(k)) \cdot (S_{Q0} - S_{Q1}) + (Q_g(k) - Q_g^*(k)) \cdot (S_{P1} - S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} \\
 & + \frac{T_s(S_{Q0} \cdot S_{P1} - S_{Q1} \cdot S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} \\
 t_{V0} = & T_s - t_{V1} - t_{V2}
 \end{aligned}$$

5 donde T_s es el periodo de conmutación de los vectores espaciales generados.

7. Calcular en todos los casos, aún cuando alguno de los tiempos t_1, t_2, t_0 sea negativo o mayor que T_s , las componentes en los ejes horizontal ($v_{MMC\alpha}^*$) y vertical ($v_{MMC\beta}^*$) de la tensión de salida del convertidor de referencia (\vec{v}_{MMC}^*), y hacerlo utilizando en todos los casos los tiempos de aplicación (t_1, t_2, t_0) y en todos los casos los vectores ($\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0$), mediante la ecuación:

$$\vec{v}_{MMC}^* = v_{MMC\alpha}^* + jv_{MMC\beta}^* = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_1}{T_s} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_2}{T_s} + \vec{V}_0 \cdot \frac{t_0}{T_s}$$

8. Generar los parámetros de configuración (2) para que el vector tensión de salida del convertidor ($\overrightarrow{v_{MMC}}$) coincida en promedio con el vector tensión de salida de referencia ($\overrightarrow{v_{MMC}^*}$). En particular, un algoritmo SVM multinivel escoge en cada ciclo los hexágonos adecuados, esto es, los parámetros de configuración (2) de las componentes trifásicas del vector tensión de salida ($\overrightarrow{v_{MMC}}$), y/o los tiempos de conmutación de los transistores que componen los módulos del convertidor MMC (1), para que la tensión de salida promedie el vector de referencia.

9. Una vez transcurrido un ciclo, se repiten los pasos descritos para el cálculo y aplicación de un nuevo vector tensión de salida de referencia ($\overrightarrow{v_{MMC}^*}$).

El experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según algunas realizaciones preferentes de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dichas realizaciones preferentes, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

REIVINDICACIONES

1.- Método de control predictivo de un convertidor CC/CA, donde el convertidor CC/CA es un convertidor (1) de N niveles, el cual comprende una tensión de entrada (v_{DC}) y un vector tensión de salida ($\overrightarrow{v_{MMC}}$) con N^3 valores posibles siendo unos vectores \vec{V}_1, \vec{V}_2 los dos vectores espaciales que definen el primer sector del mayor hexágono posible definido por unos vectores $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$ no nulos que el convertidores es capaz de generar utilizando solo dos niveles y \vec{V}_0 el vector espacial de módulo nulo, y estando el convertidor CC/CA configurado para proporcionar a una carga un vector tensión de carga ($\overrightarrow{v_g}$) y un vector corriente de carga ($\overrightarrow{i_g}$); donde el método está caracterizado por que comprende:

- medir el vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$) y el vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$);
- calcular las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$);
- calcular las potencias activa (P_g) y reactiva (Q_g) entregadas a la red, a partir de las componentes horizontal ($v_{g\alpha}$) y vertical ($v_{g\beta}$) del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), y de las componentes horizontal ($i_{g\alpha}$) y vertical ($i_{g\beta}$) del vector corriente de red ($\overrightarrow{i_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$P_g = 1.5 \cdot (v_{g\alpha} i_{g\alpha} + v_{g\beta} i_{g\beta})$$

$$Q_g = 1.5 \cdot (v_{g\beta} i_{g\alpha} - v_{g\alpha} i_{g\beta})$$

- calcular las pendientes de potencia activa (S_{P1}, S_{P2}, S_{P0}) y reactiva (S_{Q1}, S_{Q2}, S_{Q0}), a partir de las componentes vertical y horizontal del vector de intensidad de red ($\overrightarrow{i_g}$) y del vector tensión de red ($\overrightarrow{v_g}$), mediante las ecuaciones siguientes:

$$S_{Pj} = \left. \frac{dP_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\alpha} V_{j\alpha} + v_{g\beta} V_{j\beta}) - (v_{g\alpha}^2 + v_{g\beta}^2)] - \frac{R_f}{L_f} P_g - \omega_s Q_g$$

$$S_{Qj} = \left. \frac{dQ_g}{dt} \right|_{\overrightarrow{v_j}} = \frac{1.5}{L_f} [(v_{g\beta} V_{j\alpha} - v_{g\alpha} V_{j\beta})] - \frac{R_f}{L_f} Q_g + \omega_s P_g$$

para $j=1, 2, 0$;

- estimar las potencias activa y reactiva al final del period (instante $k+1$) como la suma de los efectos de cada vector empleado en la modulación y particularizado para los vectores $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0$:

$$P_g(k+1) = P_g(k) + S_{P1} t_1 + S_{P2} t_2 + S_{P0} t_0$$

$$Q_g(k+1) = Q_g(k) + S_{Q1} t_1 + S_{Q2} t_2 + S_{Q0} t_0$$

donde S_{P1} , S_{P2} y S_{P0} son las pendientes de la potencia activa de los correspondientes vectores de tensión; S_{Q1} , S_{Q2} y S_{Q0} representan las pendientes de la potencia reactiva para los vectores espaciales seleccionados; y, t_1 , t_2 , t_0 expresan sus tiempos de duración;

- definir una función de coste “ $F(k + 1)$ ” particularizada para los vectores \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0 que incluye los errores de las potencias activa y reactiva al final de cada periodo, donde “ * ” significa valor de referencia, y donde la función de coste comprende la siguiente expresión:

$$F(k + 1) = \left(P_g(k + 1) - P_g^*(k) \right)^2 + \left(Q_g(k + 1) - Q_g^*(k) \right)^2$$

- calcular la duración óptima de los tiempos de aplicación (t_1 , t_2 , t_0) de los vectores (\vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0), para minimizar la función de coste:

$$t_{V1} = \frac{\left(P_g(k) - P_g^*(k) \right) \cdot (S_{Q2} - S_{Q0}) + \left(Q_g(k) - Q_g^*(k) \right) \cdot (S_{P0} - S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} + \frac{T_s(S_{Q2} \cdot S_{P0} - S_{Q0} \cdot S_{P2})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})}$$

$$t_{V2} = \frac{\left(P_g(k) - P_g^*(k) \right) \cdot (S_{Q0} - S_{Q1}) + \left(Q_g(k) - Q_g^*(k) \right) \cdot (S_{P1} - S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})} + \frac{T_s(S_{Q0} \cdot S_{P1} - S_{Q1} \cdot S_{P0})}{S_{Q1}(S_{P2} - S_{P0}) + S_{Q2}(S_{P0} - S_{P1}) + S_{Q0}(S_{P1} - S_{P2})}$$

$$t_{V0} = T_s - t_{V1} - t_{V2}$$

donde T_s es el periodo de conmutación de los vectores espaciales generados;

- calcular las componentes en los ejes horizontal ($v_{MMC\alpha}^*$) y vertical ($v_{MMC\beta}^*$) de la tensión de salida del convertidor de referencia (\vec{v}_{MMC}^*), a partir de los tiempos de aplicación (t_1 , t_2 , t_0) y de los vectores (\vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_0), mediante la ecuación:

$$\vec{v}_{MMC}^* = v_{MMC\alpha}^* + jv_{MMC\beta}^* = \vec{V}_1 \cdot \frac{t_1}{T_s} + \vec{V}_2 \cdot \frac{t_2}{T_s} + \vec{V}_0 \cdot \frac{t_0}{T_s}$$

- generar unos parámetros de configuración para que el vector tensión de salida del convertidor CC/CA (\vec{v}_{MMC}) coincida en promedio con el vector tensión de salida de

referencia $(\overrightarrow{v_{MMC}}^*)$, aplicando un algoritmo SVM multinivel que selecciona en cada ciclo los hexágonos adecuados, para los cuales, unas componentes trifásicas del vector tensión de salida $(\overrightarrow{v_{MMC}})$, y/o unos tiempos de conmutación de unos transistores que componen el convertidor CC/CA, para que la tensión de salida $(\overrightarrow{v_{MMC}})$ promedie el vector de referencia $\overrightarrow{v_{MMC}}^*$.

2.- Método de control predictivo de un convertidor CC/CA, según la reivindicación 1, caracterizado porque adicionalmente comprende, una vez transcurrido un periodo predeterminado, repetir los pasos definidos en la reivindicación 1 para el cálculo y aplicación de un nuevo vector tensión de salida de referencia $(\overrightarrow{v_{MMC}}^*)$.

3.- Método de control predictivo de un convertidor CC/CA, según la reivindicación 1, caracterizado porque el paso de generar unos parámetros de configuración se lleva a cabo mediante un modulador de vectores espaciales multinivel.

4.- Sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA, donde el convertidor CC/CA es un convertidor modular (1) de N niveles, el cual comprende una tensión de entrada (v_{DC}) y un vector tensión de salida $(\overrightarrow{v_{MMC}})$ con N^3 valores posibles siendo unos vectores \vec{V}_1, \vec{V}_2 los dos vectores espaciales que definen el primer sector del mayor hexágono posible definido por unos vectores $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$ no nulos que el convertidores es capaz de generar utilizando solo dos niveles y \vec{V}_0 el vector espacial de módulo nulo, y estando el convertidor modular multinivel (1) configurado para proporcionar a una carga un vector tensión de carga $(\overrightarrow{v_g})$ y un vector corriente de carga $(\overrightarrow{i_g})$; caracterizado por que adicionalmente comprende:

- medios de medida configurados para medir el vector tensión de carga $(\overrightarrow{v_g})$ y el vector corriente de carga $(\overrightarrow{i_g})$ y generar unos parámetros de control (2); y,
- un conjunto de medios (3,4,5,6,7) configurados para llevar a cabo los pasos del método definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 a partir de los parámetros de control (2).

5.- Sistema de control predictivo de un convertidor CC/CA, según la reivindicación 4, caracterizado por que el conjunto de medios (3,4,5,6,7) comprende

- un primer elemento de conversión (3);
- un segundo elemento de conversión (4);
- primeros medios de cálculo (5);
- segundos medios de cálculo (6); y,

- un modulador de vectores espaciales multinivel (7).

6.- Programa de ordenador que comprende instrucciones que, al ejecutarse el programa en un ordenador, hacen que el ordenador lleve a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3.

5

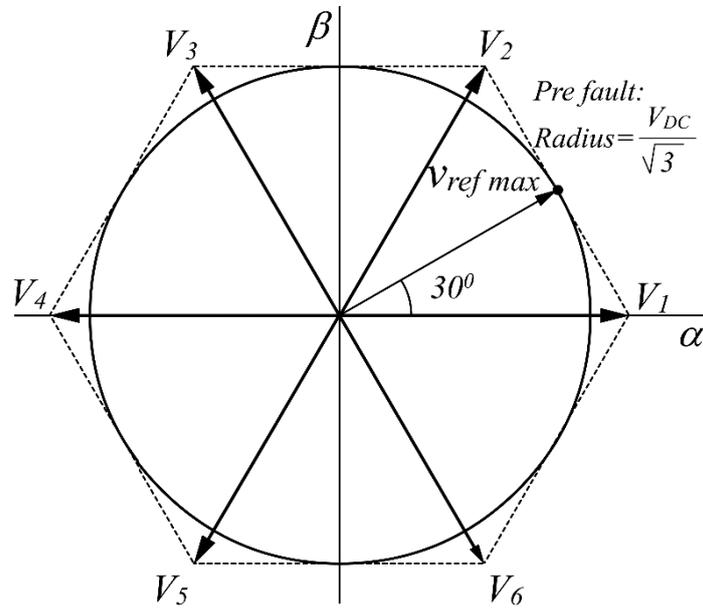


FIG. 1

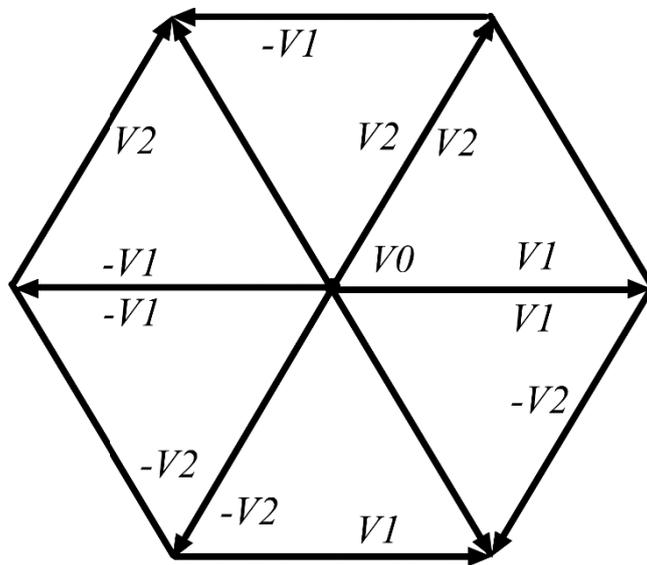


FIG. 2

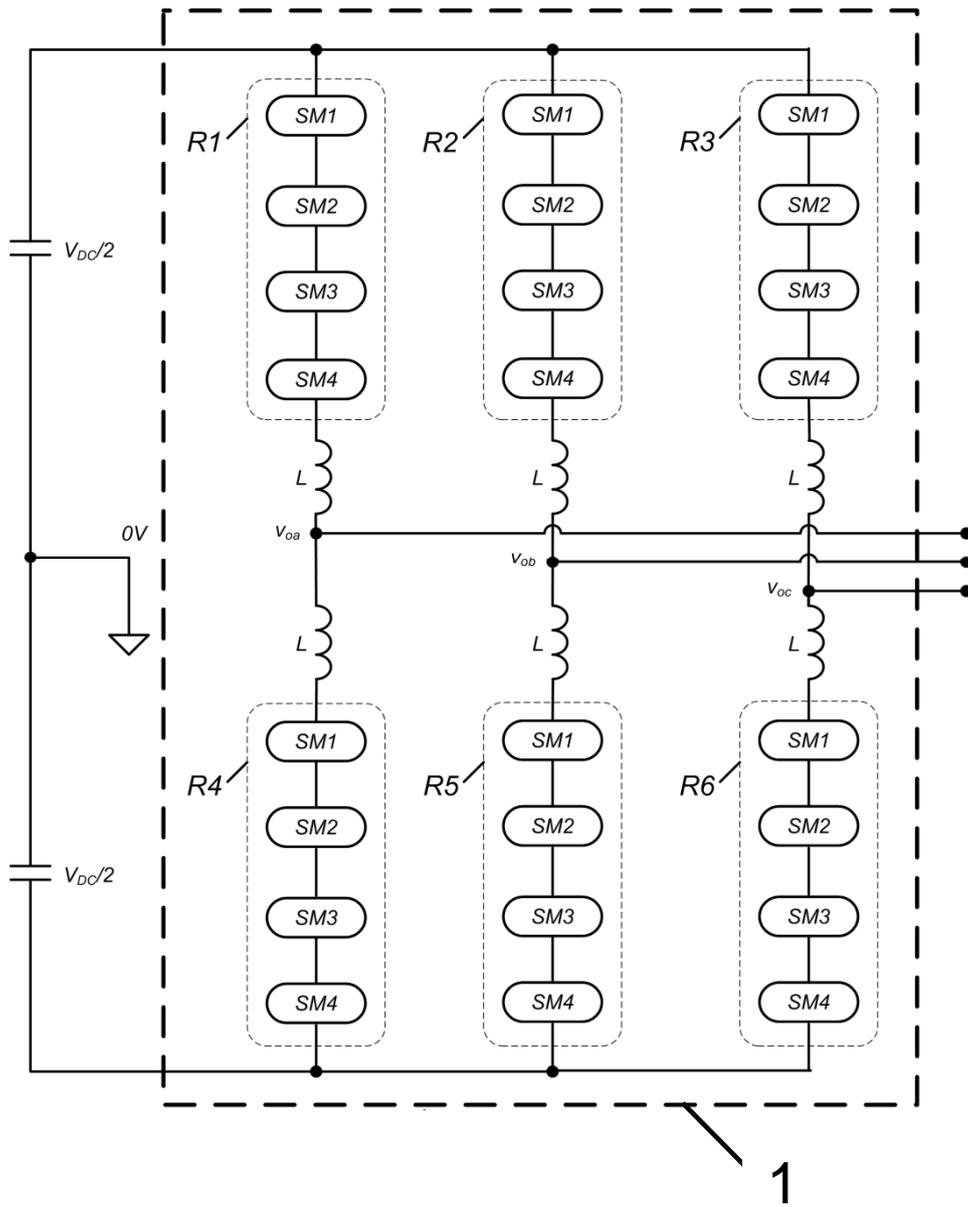


FIG. 3

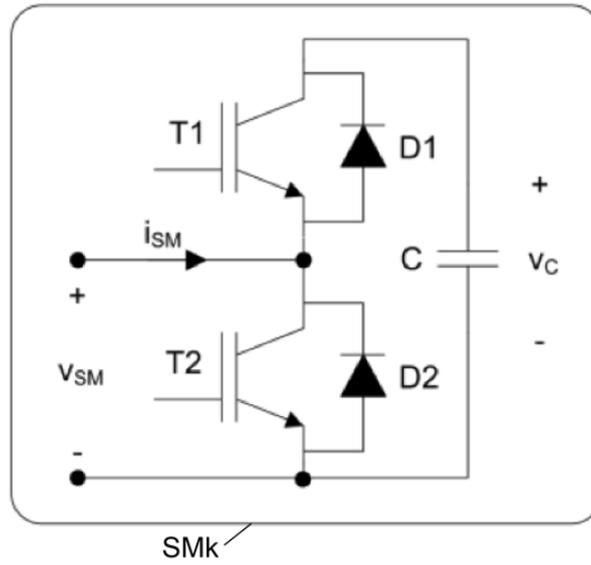


FIG. 4

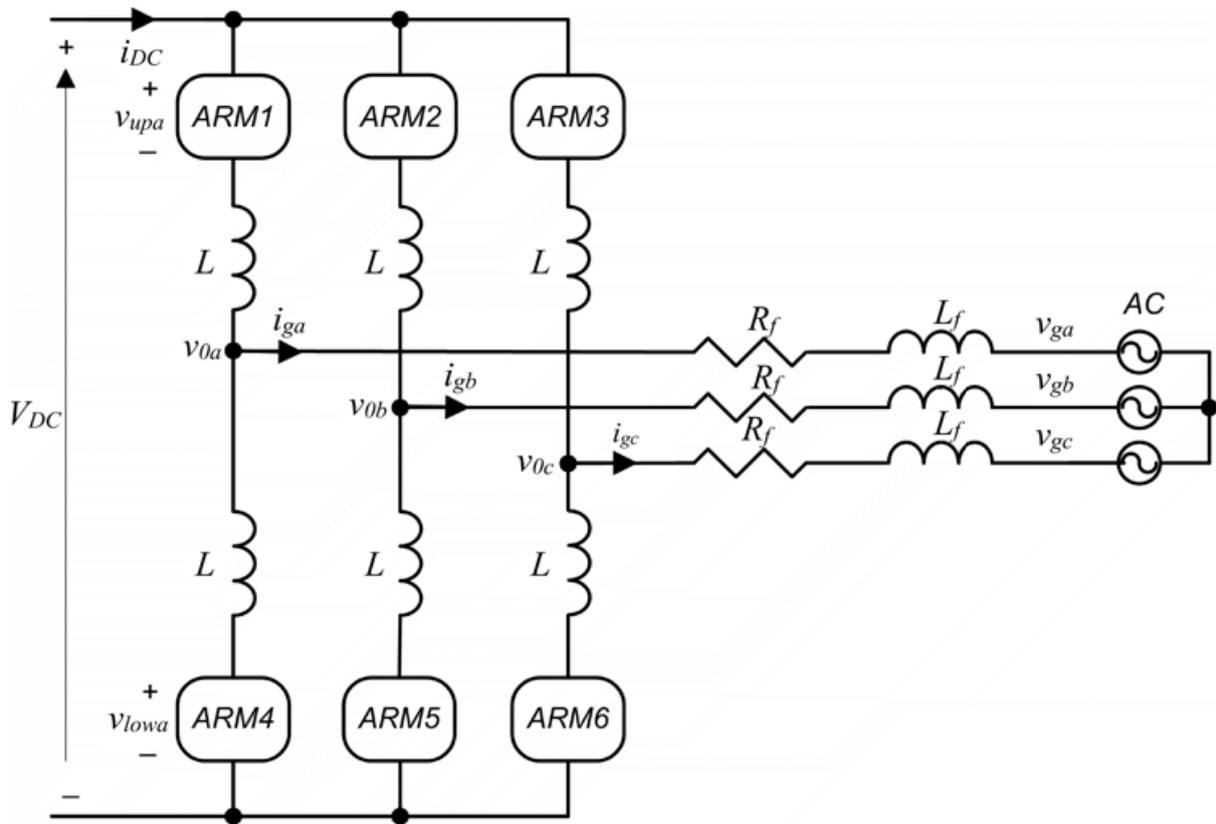


FIG. 5

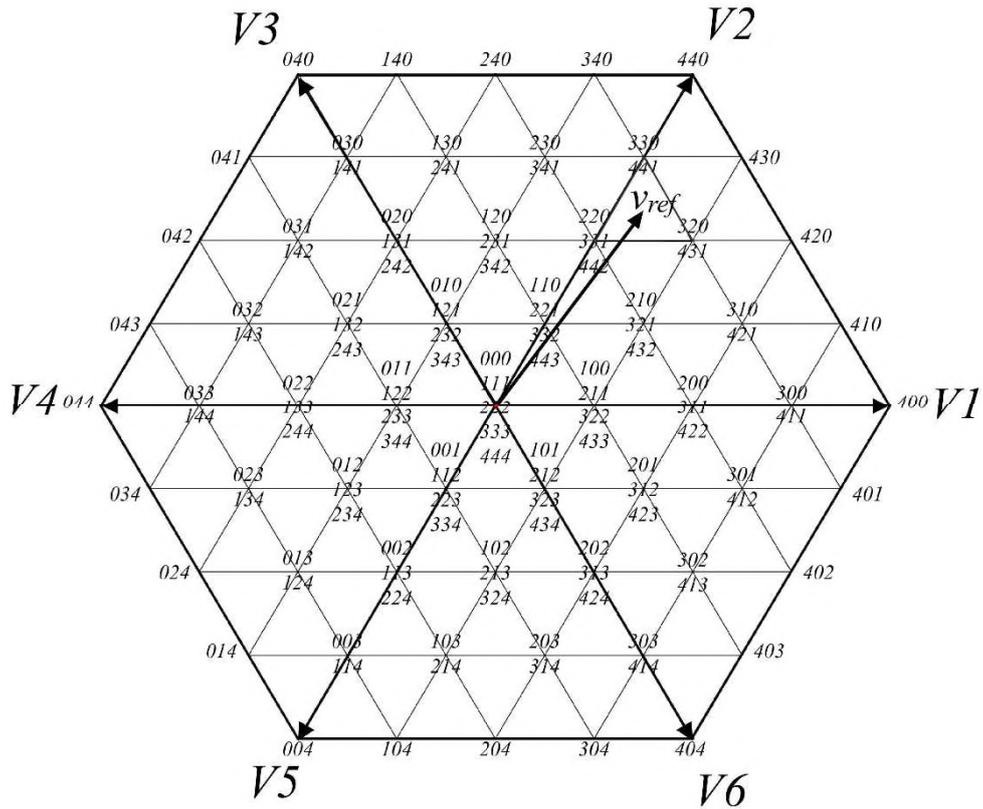


FIG. 6

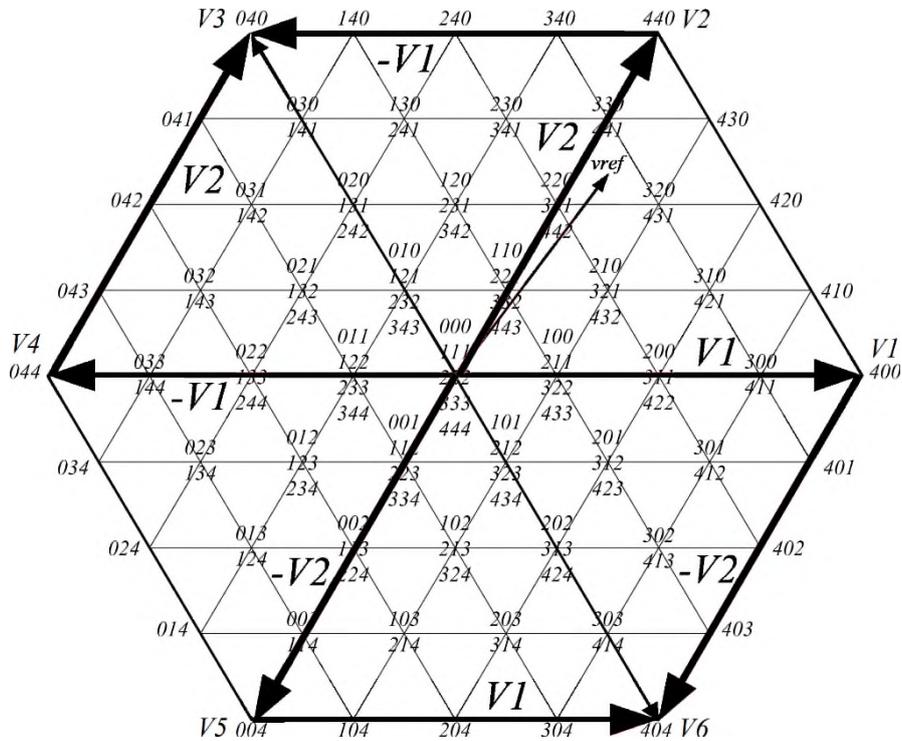


FIG. 7

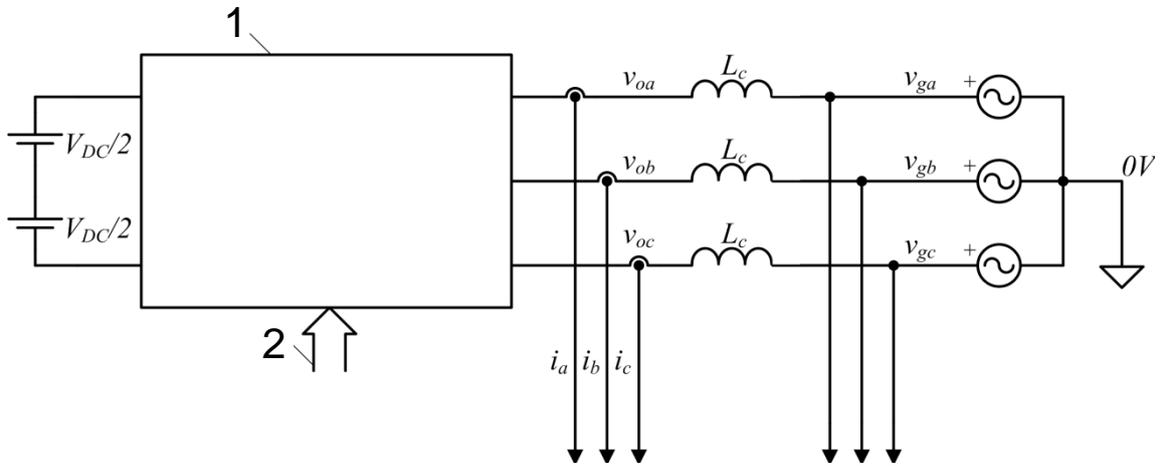


FIG. 8

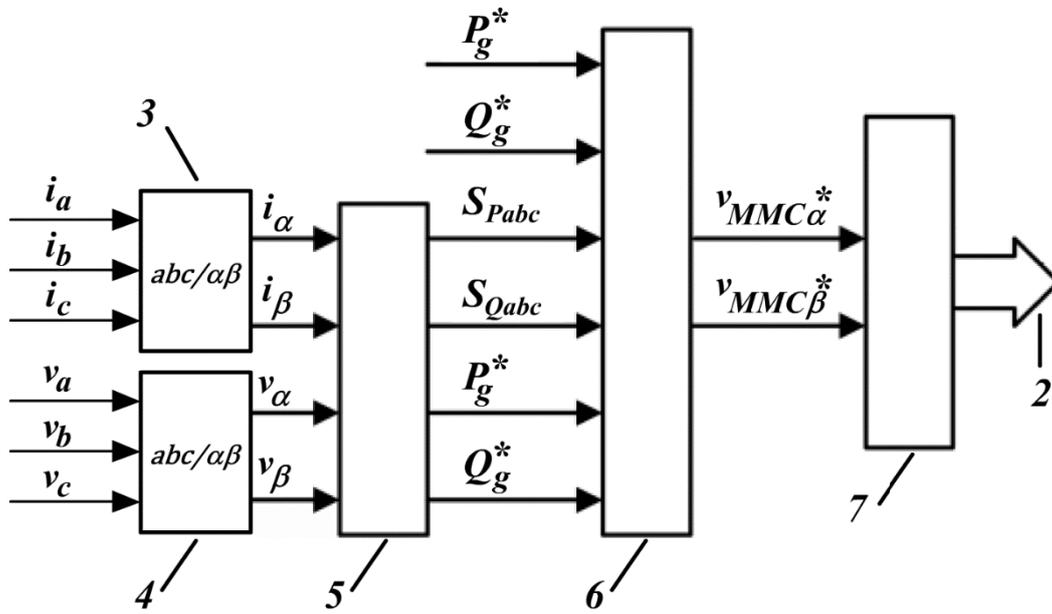


FIG. 9

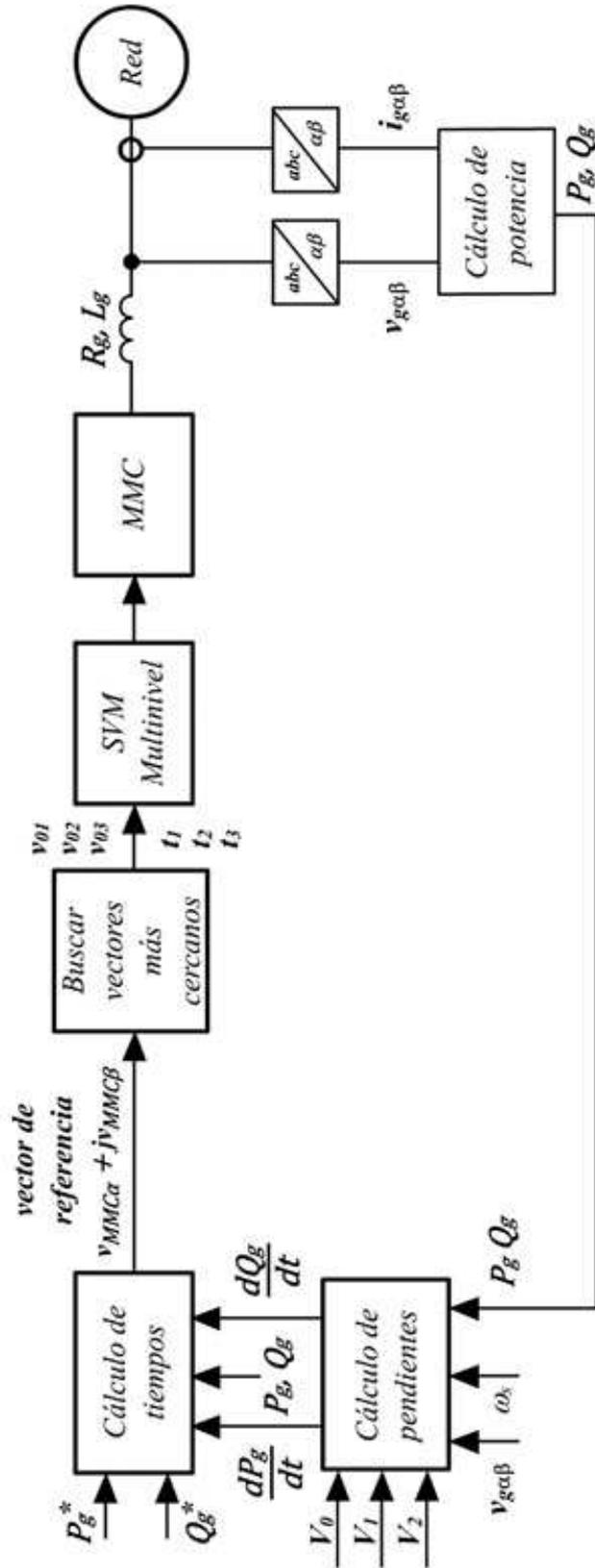


FIG. 10

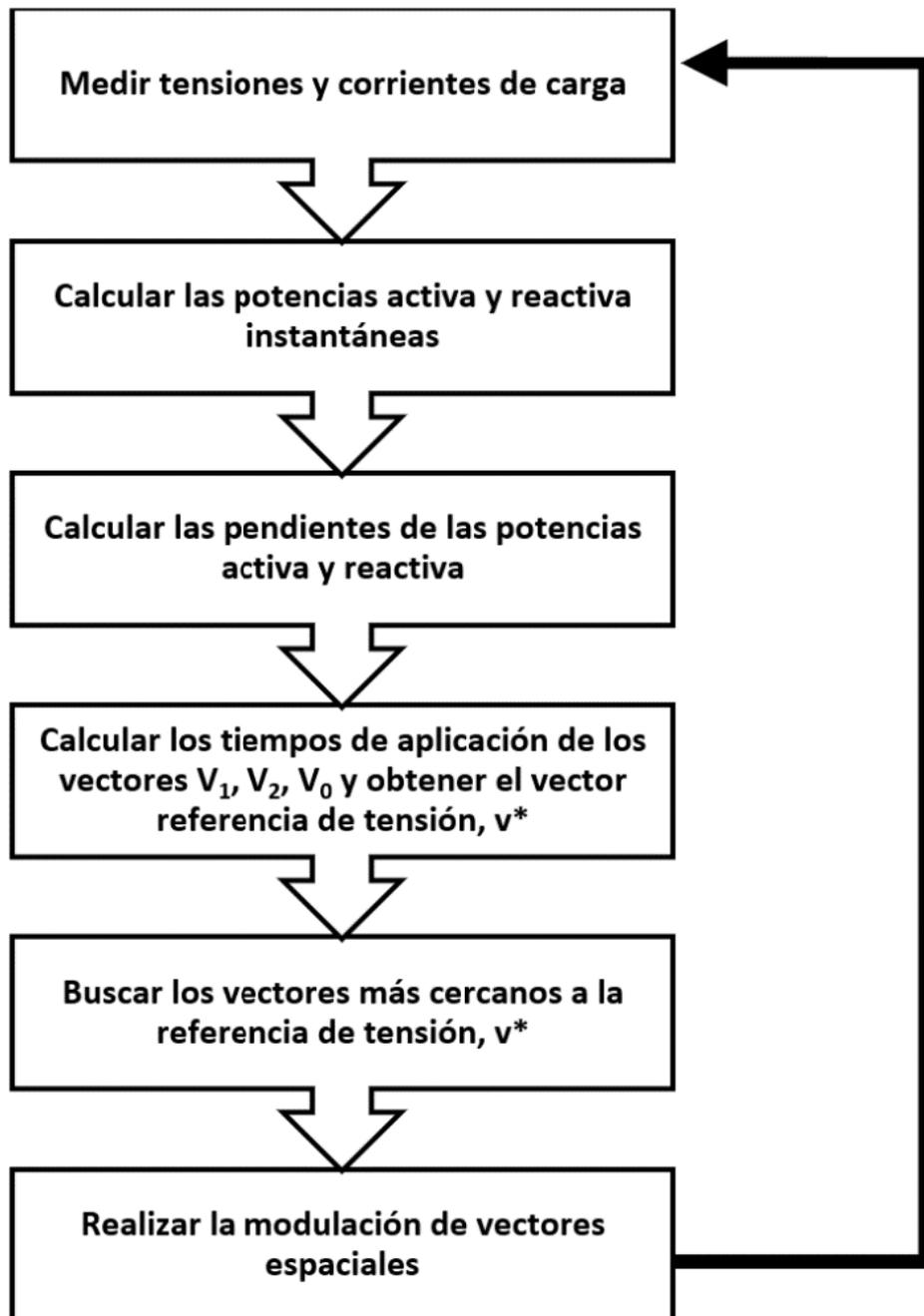


FIG. 11