(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 735 639**

(21) Número de solicitud: 201930835

(51) Int. Cl.:

G05B 13/02 (2006.01)
H02M 7/66 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN B2

(22) Fecha de presentación:

27.09.2019

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

19.12.2019

Fecha de concesión:

27.04.2020

(45) Fecha de publicación de la concesión:

05.05.2020

(73) Titular/es:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (50.0%)
Avda. Ramiro de Maeztu, 7
28040 MADRID (Madrid) ES y
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (50.0%)

(72) Inventor/es:

RAMIREZ PRIETO, Dionisio;
EBRAHIM ZAREI, Mohammad;
MARTINEZ RODRIGO, Fernando y
HERRERO DE LUCAS, Luis Carlos

(74) Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

(54) Título: **MÉTODO DE CONTROL DE UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO CC/CA TRIFÁSICO CON FALLO EN UNA FASE**

(57) Resumen:

Método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase.

Se divulga un método de control de un convertidor electrónico de CC/CA trifásico conectado a una red eléctrica, en el que uno o dos interruptores de la misma fase, se encuentran averiados. El convertidor tiene una tensión de entrada (V_{cc}) y un vector tensión de salida ((vector v)$_{ref}$) cuyos vectores posibles antes de la avería definen un hexágono y después de la avería definen un rombo. El método comprende reconstruir y estabilizar un hexágono formado por seis vectores espaciales a 60º a partir de los cuatro vectores espaciales disponibles después de la avería, que permita modular mediante un modulador de vectores espaciales "SVM" convencional el vector de salida del convertidor ((vector v)$_{ref}$). El método tiene en cuenta las variaciones de tensión en el bus de CC del convertidor electrónico para estabilizar el hexágono regular.

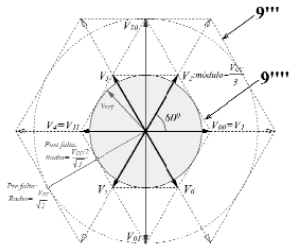

FIG. 7

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).

ES 2 735 639 B2

DESCRIPCIÓN

MÉTODO DE CONTROL DE UN CONVERTIDOR ELECTRÓNICO CC/CA TRIFÁSICO CON FALLO EN UNA FASE

Objeto de la invención

El objeto de la presente invención es controlar los vectores de salida de un convertidor CC/CA donde se ha producido el fallo de un interruptor o de dos interruptores en una misma fase del convertidor. Esto permite seguir vertiendo potencia del convertidor a la red CA a la que se encuentre conectado. Para ello, el método de la presente invención reconstruye y estabiliza los vectores espaciales hasta formar un hexágono regular, permitiendo poder seguir utilizando un Modulador de Vectores Espaciales “SVM” (seis vectores formando un hexágono regular) del estado de la técnica.

Por tanto, la presente invención resuelve el problema técnico de permitir seguir utilizando, intercambiando potencia con la red, un convertidor electrónico CC/CA conectado a la red en el que uno o dos interruptores de la misma fase están en fallo.

La presente invención se refiere, por tanto, 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 y corriente alterna.

Antecedentes de la invención

Aunque hay diversos métodos ya conocidos en el estado de la técnica para el control de un convertidor electrónico CC/CA como el divulgado en “*Kai Ni, Yihua Hu, Yang Liu, and Chun Gan. Performance Analysis of a Four-Switch Three-Phase Grid-Side Converter with Modulation Simplification in a Doubly-Fed Induction Generator-Based Wind Turbine (DFIG-WT) with Different External Disturbances. Energies 2017, 10, 706; doi:10.3390/en10050706*”, la presente invención proporciona un método que facilita la generación de tensión mediante vectores espaciales. Efectivamente, después de la avería, el convertidor sólo puede generar cuatro vectores espaciales en lugar de seis, y además los cuatro vectores espaciales son inestables

en posición y módulo. Esta inestabilidad es un problema para realizar la modulación ya que es fundamental conocer el cuadrante o sector donde se encuentra el vector que se quiere reproducir por modulación, $\vec{v}_{ref}$, para elegir correctamente los vectores moduladores. Si los cuadrantes de la Figura 6 son inestables, se vuelve más complejo obtener el cuadrante en el que se encuentra el vector $\vec{v}_{ref}$.

Además, realizar una modulación de $\vec{v}_{ref}$ con cuatro vectores inestables requiere una nueva filosofía diferente a la de un SVM convencional, lo que es más complejo para el programador del sistema de control del convertidor electrónico.

Descripción de la invención

La presente invención se refiere a un método de control de un convertidor electrónico CC/CA con fallo en una fase, donde el convertidor electrónico CC/CA trifásico está conectado a la red para intercambiar potencia eléctrica con la red. El fallo en la fase puede ser de un interruptor o de dos interruptores.

Mediante esta invención se vuelve a disponer de seis vectores espaciales con una posición estable (modulados a partir de los cuatro generables) lo que es imprescindible para escoger los vectores con los que realizar la modulación. Facilita, además, al programador del control del convertidor utilizar el software de antes de la avería, con pequeñas modificaciones y manteniendo la filosofía de un modulador SVM clásico de seis vectores en hexágono (ver Figura 8). En realidad, el programador superpondrá dos modulaciones: una modulación para generar ($\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$) a partir de ($\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$, $\vec{V}_{01}$) y otra modulación, la de un SVM clásico, para generar $\vec{v}_{ref}$ a partir de ($\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$).

De forma muy resumida, la presente invención consiste en reconstruir y estabilizar el hexágono de la figura 1 a partir de los rombos de la figura 5 y la figura 6 según el método de la presente invención. Una vez reconstruido el hexágono, con ángulos de 60^0 constantes (ver figura 7) puede utilizarse un modulador de vectores espaciales convencional (SVM), aunque es cierto que los vectores espaciales resultantes ($\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$) tienen un módulo menor que los de la figura 1 (antes de la avería).

El método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase de la presente invención está dirigido a un convertidor electrónico CC/CA trifásico que comprenda un bus de corriente continua formado por al menos dos condensadores “C1” y “C2” en serie. El método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase de la presente invención comprende:

- conectar la fase con fallo de al menos un interruptor con el punto medio del bus de Corriente Continua formado entre los condensadores C1 y C2;
- medir unos vectores de tensión $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{01}$, $\vec{V}_{10}$ y $\vec{V}_{11}$, generados por el convertidor CC/CA trifásico cuando el convertidor electrónico CC/CA trifásico tiene un fallo de al menos un interruptor en una misma en una fase;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_1$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_2$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{10}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{10}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_3$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{10}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{10}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$;
- calcular un vector de tensión V_4 aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_5$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{01}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{01}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_6$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{01}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{01}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$;
- reconstruir un hexágono formado por los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$;
- realizar una modulación del vector $\vec{v}_{ref}$ como

  $\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot D_k + \vec{V}_{k+1} \cdot D_{k+1} + \vec{0} \cdot D_{V_0}$

  para k= 1, 2, 3, 4 5 y 6, donde D_k y D_{k+1} son los duty cycles globales, los cuales son

resultantes de las dos modulaciones, una para situar los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0 y otra para generar $\vec{v}_{ref}$ a partir de ellos.

Para realizar la modulación del vector $\vec{v}_{ref}$, el método de la presente invención discrimina entre dos tipos situaciones:

A) $\mathrm{v_{c1}} = \mathrm{v_{c2}} = \mathrm{V_{CC}}/2$

B) $\mathrm{v_{c1}} \neq \mathrm{v_{c2}} \neq \mathrm{V_{CC}}/2$

Situación A): $\mathbf{v_{c1}} = \mathbf{v_{c2}} = \mathbf{V_{CC}}/\mathbf{2}$

En este caso, el método de la presente invención adicionalmente comprende:

- limitar el módulo del vector $\vec{v}_{ref}$ a un valor máximo:

$$v_{ref\ max} = \frac{V_{cc}/2}{\sqrt{3}}$$

- mantener la fase de los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0 mediante el cálculo de los *duty cycles* $d_{V_{00}} = d_{V_{01}} = d_{V_{10}} = d_{V_{11}} = 50\% = 1/2$;

– llevar a cabo una etapa de modulación de vectores espaciales, SVM, mediante un modulador de vectores espaciales SVM, el cual calcula los duty cycles $d_{V_1}, d_{V_2}, d_{V_3}$, d_{V_4}, d_{V_5}, d_{V_6} que dan lugar a $\vec{v}_{ref}$ a partir de $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ (una vez situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0) según la Tabla 1, dando lugar a nuevos *duty cycle* globales, D_{V_k}, $D_{V_{k+1}}$, que son el resultado de componer las dos modulaciones (la primera modulación sitúa los vectores exactamente a 0º, 60º, 120º, etc.; la segunda modulación utiliza estos vectores ya situados correctamente, para generar v_{ref} mediante modulación).

Sector	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot (D_{V_k}) + \vec{V}_{k+1} \cdot (D_{V_{k+1}}) + \vec{0} \cdot D_{V_0};\ D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$
1	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
2	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot (d_{V_2} + d_{V_3})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
3	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
4	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
5	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot (d_{V_5} + d_{V_6})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
6	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$

Tabla 1

Situación B) $\mathbf{v_{c1}} \neq \mathbf{v_{c2}} \neq \mathbf{V_{CC}/2}$**:**

En este caso, el método de la presente invención adicionalmente comprende:

- limitar el módulo del vector $\vec{v}_{ref}$ a un valor máximo:

$$v_{ref\ max} = \frac{mínimo\ (v_{c1}, v_{c2})}{\sqrt{3}}$$

- mantener la fase de los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0 mediante el cálculo de los *duty cycles* que aparecen en la Tabla 2:

Sector	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot (D_{V_k}) + \vec{V}_{k+1} \cdot (D_{V_{k+1}}) + \vec{0} \cdot D_{V_0};\ D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$
1	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
2	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot (d_{V_2} + d_{V_3})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
3	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
4	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
5	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot (d_{V_5} + d_{V_6})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
6	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$

Tabla 2

donde $d_{V_{00}}, d_{V_{01}}, d_{V_{10}},\ d_{V_{11}}$ se calculan según la tabla 3:

$a = \left(\frac{vc1 - vc2}{V_{dc}}\right)$	$vc2 \leq vc1$	$vc2 > vc1$
$\vec{V}_1$	$\mathbf{d_{V00}} = 1$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{vc2}$
$\vec{V}_2$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_3$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc2}{vc1}\right) \cdot (1 - a)$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$
$\vec{V}_4$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{vc2}{vc1}$	$\mathbf{d_{V11}} = 1$
$\vec{V}_5$	$\mathbf{d_{V11}} = \left(\frac{vc2}{2 \cdot vc1}\right) \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_6$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$

Tabla 3

y,

- llevar a cabo una etapa de modulación de vectores espaciales, SVM, mediante un modulador de vectores espaciales SVM, el cualcalcula los duty cycles $d_{V_1}, d_{V_2}, d_{V_3}$, d_{V_4}, d_{V_5}, d_{V_6} que dan lugar a $\vec{v}_{ref}$ a partir de $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ (una vez situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0).

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:

La Figura 1 muestra el hexágono que definen los vectores espaciales que un convertidor electrónico CC/CA trifásico es capaz de generar en corriente alterna y el radio máximo si se desea generar una tensión trifásica equilibrada sin distorsiones.

La Figura 2 representa un convertidor electrónico CC/CA trifásico conectado a una red eléctrica trifásica. El convertidor dispone de tres triacs que sirven para conectar la fase donde se ha

producido una avería, al punto medio de los condensadores del bus de CC.

La Figura 3 muestra el convertidor electrónico después de que se produzca una avería en Sa y/o S'a, mostrando la fase a de la red conectada al punto medio de los condensadores del bus de CC.

La Figura 4 muestra las cuatro combinaciones posibles de interruptores abiertos/cerrados y la conexión correspondiente de los condensadores a la red.

La Figura 5 muestra los cuatro vectores espaciales ($\vec{V}_{00}, \vec{V}_{01}, \vec{V}_{10}, \vec{V}_{11}$) que el convertidor electrónico es capaz de generar después de la avería y con la fase afectada conectada al punto medio de los condensadores del bus de CC. También aparece el radio máximo para el vector $\vec{v}_{ref}$.

La Figura 6 muestra cómo cambia el ángulo y el módulo de los vectores espaciales ($\vec{V}_{00}, \vec{V}_{01}, \vec{V}_{10}, \vec{V}_{11}$) cuando la tensión de los condensadores no es constante. También aparece el radio máximo para el vector $\vec{v}_{ref}$, que queda definido por el menor de entre v_{c1} y v_{c2}.

La Figura 7 muestra el hexágono original antes de la avería, cuyos vectores aparecen en línea discontinua, y el hexágono disponible después de la avería (de menor tamaño). También aparecen los vectores disponibles después de la avería ($\vec{V}_{00}, \vec{V}_{01}, \vec{V}_{10}, \vec{V}_{11}$) y los vectores ($\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$) que hay que reconstruir mediante modulación para reconstruir y estabilizar el hexágono.

La Figura 8-a representa el módulo SVM que lleva a cabo la modulación por vectores espaciales, antes de la avería. Donde las entradas son las coordenadas α-β del vector que se desea modular, $\vec{v}_{ref}$, y el valor de la tensión en el bus DC del convertidor electrónico, V_{CC}. Las salidas son los *duty cycles* d_{V_j} y $d_{V_{j+1}}$ de los vectores $\vec{V}_j$ y $\vec{V}_{j+1}$ calculados para modular $\vec{v}_{ref}$ en cada sector del hexágono.

Las figuras Figura 8-b a Figura 8-g muestran, para vc1=vc2=V_{CC}/2 y para cada sector del hexágono, cómo hay que combinar las salidas del módulo SVM convencional (antes de la

avería) para, después de la avería, obtener los ciclos de trabajo (“*duty cycles”)* según la invención. En los seis casos, la entrada de tensión C.C. es, después de la avería, $V_{CC}/2$.

La Figura 9 muestra cómo el área del hexágono cambia a medida que cambia la tensión en los condensadores. Se han representado los casos de mayor y de menor área que se corresponden con los valores máximos y mínimos de v_{c1} y v_{c2}.

Realización preferente de la invención

Listado de referencias:

1. Convertidor electrónico CC/CA trifásico;
2. Interruptor Sa; 2’. Interruptor S’a;
3. Interruptor Sb; 3’. Interruptor S’b;
4. Interruptor Sc; 4’. Interruptor S’c;
5. Condensador C_1; 5’. Condensador C_2;
6. Punto intermedio entre el condensador C_1 y el condensador C_2;
7. Triac de la fase “a”; 7’. Triac de la fase “b”; 7’’. Triac de la fase “c”;
8. Modulador por Vectores Espaciales “SVM”;
9. Hexágono; 9’. Mínimo hexágono; 9’’. Máximo hexágono; 9’’’. Hexágono pre-fallo; 9’’’’. Hexágono post-fallo;
10. V_{ref}; 10’. circunferencia generada por v_{ref};
11. Rombo.

La presente invención se refiere a un método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) con fallo en una fase (a,b,c), donde el convertidor electrónico CC/CA trifásico está conectado a la red para intercambiar potencia eléctrica con la red. El fallo en la fase puede ser de un interruptor o de dos interruptores (2 y 2’ en la figura 3).

Como es sabido, un convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) se controla normalmente utilizando control vectorial. Utilizando esta teoría de control, la tensión de salida del convertidor puede representarse mediante seis vectores espaciales activos ($\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$) y dos nulos ($\overrightarrow{V_0}$), que dan lugar a un hexágono (9) como el de la Figura 1 que se corresponden con

los estados de conducción y bloqueo de los seis interruptores (S_a, S_b, S_c, S'_a, S'_b, S'_c) que componen el convertidor electrónico (ver Figura 2).

Para generar una tensión trifásica, el convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) debe hacer girar el vector espacial $\vec{v}_{ref}$ (10) de la Figura 1 describiendo un círculo (10') cuyo radio máximo tiene un valor:

$$v_{ref\ max} = \frac{V_{CC}}{\sqrt{3}}$$

donde V_{CC} es el valor de la tensión continua en el bus de c.c. del convertidor. Como en realidad el convertidor no puede generar vectores intermedios entre ($\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$), se recurre a realizar una modulación que, en promedio, sitúe vectores espaciales en posiciones intermedias del hexágono y permita a $\vec{v}_{ref}$ recorrer la circunferencia (10') representada en la Figura 1 u otra concéntrica de menor radio.

En el caso de que un interruptor (2, 2', 3, 3', 4, 4') de los que compone el convertidor electrónico (S_a, S_b, S_c, S'_a, S'_b, S'_c) resulte averiado, el convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) tiene que ser desconectado de la red.

En la configuración de la Figura 2, el convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) comprende tres triacs (7, 7', 7'') que, en el caso de que algún interruptor resulte averiado (por ejemplo S_a y/o S'_a), los triacs (7, 7', 7'') conectan la fase de la red afectada al punto medio (6) del bus de c.c. formado por los condensadores C_1 y C_2 (5, 5'), según la Figura 3.

De esta forma, se consigue que el convertidor electrónico CC/CA trifásico (1) pueda seguir generando cuatro vectores espaciales ($\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$ y $\vec{V}_{01}$) que se corresponden con las cuatro combinaciones posibles de conducción/bloqueo de los interruptores en buen estado (en este ejemplo S_b, S_c, S'_b, S'_c) mostradas en la Figura 4.

Las combinaciones posibles para los estados de conducción/bloqueo de S_b, S_c, S'_b, S'_c están recogidas en la Tabla 4, que muestra a la derecha las coordenadas vα-vβ de los vectores espaciales a que dan lugar estas combinaciones. Observar que los valores de estas coordenadas dependen de la tensión en los condensadores (5, 5'), por lo que si v_{c1} y v_{c2} no son constantes, las coordenadas tampoco lo serán, produciendo un movimiento de los vectores.

S_b	S_c	$\vec{V}$	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}	v_α	v_β
0	0	V_{00}	$\frac{2v_{c2}}{3}$	$-\frac{v_{c2}}{3}$	$-\frac{v_{c2}}{3}$	$\frac{2v_{c2}}{3}$	0
1	0	V_{10}	$\frac{v_{c2}-v_{c1}}{3}$	$\frac{2v_{c1}+v_{c2}}{3}$	$-\frac{v_{c1}+2v_{c2}}{3}$	$\frac{v_{c2}-v_{c1}}{3}$	$\frac{\sqrt{3}(v_{c1}+v_{c2})}{3}$
1	1	V_{11}	$-\frac{2v_{c1}}{3}$	$\frac{v_{c1}}{3}$	$\frac{v_{c1}}{3}$	$-\frac{2v_{c1}}{3}$	0
0	1	V_{01}	$\frac{v_{c2}-v_{c1}}{3}$	$-\frac{v_{c1}+2v_{c2}}{3}$	$\frac{2v_{c1}+v_{c2}}{3}$	$\frac{v_{c2}-v_{c1}}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}(v_{c1}+v_{c2})}{3}$

Tabla 4

Los vectores espaciales se han nombrado como $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$ y $\vec{V}_{01}$ en la Figura 5. Como se observa en la Figura 5, los módulos de los vectores sólo son iguales dos a dos y forman un rombo (11) en lugar de un hexágono (9) regular como en la Figura 1.

Si la tensión en los condensadores C1 y C2 es constante, el módulo máximo del vector espacial $\vec{v}_{ref}$ es, después de la avería, más reducido: $(Vdc/2)/\sqrt{3}$ en lugar de $Vdc/\sqrt{3}$.

Cuando circula corriente por la fase conectada al punto medio (6) de los condensadores (5, 5'), se producen oscilaciones de tensión en los condensadores que hacen que los módulos y ángulos de los vectores espaciales $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$, $\vec{V}_{01}$ no sean constantes, como se muestra en la Figura 6.

Debido a las oscilaciones de tensión en los condensadores C1 y C2, tampoco es constante el máximo módulo de del vector espacial v_{ref}, resultando

$$v_{ref\ max} = \frac{mínimo\ (v_{c1}, v_{c2})}{\sqrt{3}}$$

Este hecho se ve reflejado también en la Figura 6 a través de la longitud máxima del radio R que puede describir el vector espacial $\vec{v}_{ref}$ donde a la izquierda el radio es $v_{c2}/\sqrt{3}$ y a la derecha $v_{c1}/\sqrt{3}$.

Estas variaciones de módulo y ángulo hacen difícil utilizar los vectores $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$, $\vec{V}_{01}$ para realizar una modulación correcta de un vector $\vec{v}_{ref}$ que gire 360º en el plano α-β ya que los propios vectores moduladores $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$ y $\vec{V}_{01}$varían constantemente.

En modulación por vectores espaciales, toda modulación se realiza con vectores que permitan obtener el vector $\vec{v}_{ref}$ mediante una combinación lineal de los vectores espaciales. Así, un vector $\vec{v}_{ref}$ situado en el primer cuadrante de 90^0 se modularía utilizando $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$. Un vector $\vec{v}_{ref}$ situado entre 90º y 180^0 se modularía utilizando $\vec{V}_{10}$ y $\vec{V}_{11}$. Un vector $\vec{v}_{ref}$ situado entre 180^0 y 270^0 se modularía utilizando $\vec{V}_{11}$ y $\vec{V}_{01}$. Finalmente, un vector situado entre 270^0 y 360^0 se modularía utilizando $\vec{V}_{01}$ y $\vec{V}_{00}$.

Sin embargo, debido a la variación de la tensión en los condensadores, los cuadrantes se mueven y no es posible conocer con precisión cuándo el vector $\vec{v}_{ref}$ está situado en un cuadrante o ha pasado al siguiente cuadrante.

La presente invención estabiliza los cuadrantes para facilitar la modulación vectorial. Adicionalmente, la presente invención permite obtener seis vectores moduladores formando un hexágono a partir de los cuatro vectores moduladores que forman el rombo inestable, para poder utilizar una modulación de vectores espaciales (SVM) convencional. Esto hace que los cambios en la modulación de vectores espaciales (SVM) convencional antes y después de la avería fueran mínimos, y permite seguir disfrutando de las ventajas que aporta un SVM convencional, como una mayor tensión de salida para la misma Vcc o mejor contenido en armónicos.

Para llevar a cabo lo anterior, el método de la presente invención distingue dos casos:

A) $\mathrm{v_{c1}} = \mathrm{v_{c2}} = \mathrm{V_{CC}}/2$
B) $\mathrm{v_{c1}} \neq \mathrm{v_{c2}} \neq \mathrm{V_{CC}}/2$

A) Caso en que $v_{c1}=v_{c2}=V_{CC}/2$:

En el caso en que la tensión en los condensadores (5, 5') es razonablemente constante, y por tanto, $v_{c1}=v_{c2}=V_{CC}/2$, se puede reconstruir el hexágono (9) formado por los vectores $\vec{V_1}$, $\vec{V_2}$, $\vec{V_3}$, $\vec{V_4}$, $\vec{V_5}$ y $\vec{V_6}$, a partir de los vectores de tención generados por el convertidor CC/CA trifásico $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{01}$, $\vec{V}_{10}$ y $\vec{V}_{11}$cuando existe un fallo de un o dos interruptores (2, 2', 3, 3', 4, 4') en una misma fase, de la siguiente forma:

- conectar la fase con fallo de al menos un interruptor con el punto medio (6) del bus de Corriente Continua formado entre los condensadores C_1 y C_2;
- igualar el vector de tensión $\vec{V}_1$ del hexágono al vector de tensión $\vec{V}_{00}$;
- calcular el vector de tensión $\vec{V}_2$ aplicando el 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ y el otro 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{10}$. En promedio, el vector de tensión resultante $\vec{V}_2$ tiene un módulo de $V_{CC}/3$ y un ángulo de 60^0;
- calcular el vector de tensión $\vec{V}_3$ aplicando el 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{10}$ y el otro 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{11}$. En promedio, el vector de tensión resultante $\vec{V}_3$ tiene el módulo de $V_{CC}/3$ y un ángulo de 120^0;
- igualar el vector de tensión V_4 del hexágono al vector de tensión $\vec{V}_{11}$;
- calcular el vector de tensión $\vec{V}_5$ aplicando el 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ y el otro 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{01}$. En promedio, el vector de tensión resultante $\vec{V}_5$ tiene el módulo de $V_{CC}/3$ y un ángulo de 240^0;
- calcular el vector de tensión $\vec{V}_6$ aplicando el 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{01}$ y el otro 50% del periodo el vector de tensión $\vec{V}_{00}$. En promedio, el vector de tensión resultante $\vec{V}_6$ tiene el módulo de $V_{CC}/3$ y un ángulo de 300^0.

El hexágono resultante tiene un menor tamaño ya que el módulo de los vectores de tensión es de $V_{CC}/3$. Sin embargo, es posible utilizar el hexágono resultante en un modulador de vectores espaciales convencional "SVM" (8) con sólo tener en cuenta que la tensión del bus CC equivalente es $V_{CC}/2$, figura 8, en lugar del valor normal, V_{CC}, utilizado antes de conectar la fase (o rama con interruptores en fallo) al punto medio de los condensadores.

Utilizando un modulador SVM es posible generar, después de la avería, con el convertidor electrónico una tensión trifásica haciendo girar el vector $\vec{v}_{ref}$ dentro del hexágono.

Por ejemplo, en el Sector I, denominando d_{V_1} y d_{V_2} los porcentajes o *duty cycles* utilizados por un SVM convencional (antes de la avería en un interruptor) para modular $\vec{v}_{ref}$ mediante $\vec{V}_1$ y $\vec{V}_2$

$$\vec{v}_{ref} = \left(v_{ref\alpha} + jv_{ref\beta}\right) = \vec{V}_1 \cdot d_{V_1} + \vec{V}_2 \cdot d_{V_2} + \vec{0} \cdot d_{V_0}$$

Después de la avería, una vez conectada la fase al punto medio (6) de los condensadores C1 y C2, estos dos *duty cycles*, están realmente combinados con los *duty cycles* necesarios para reconstruir $\vec{V}_2$ utilizando $\vec{V}_{00}$ y $\vec{V}_{10}$, es decir con $\mathbf{d_{V_{00}}} = \mathbf{d_{V_{10}}} = \mathbf{50\%} = \mathbf{1/2}$

Por tanto,

$$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot d_{V_1} + \left(\vec{V}_{00} \cdot \mathbf{d_{V_{00}}} + \vec{V}_{10} \cdot \mathbf{d_{V_{10}}}\right) \cdot d_{V_2} + \vec{0} \cdot d_{V_0}$$

$$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot \left(d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}\right) + \vec{V}_{10} \cdot \mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2} + \vec{0} \cdot d_{V_0}$$

Así, los *duty cycles* globales $D_{V_{00}}$ y $D_{V_{10}}$ para obtener $\vec{v}_{ref}$ a partir de los vectores $\vec{V}_{00}$ and $\vec{V}_{10}$ resultan:

$$D_{V_{00}} = d_{V_1} + d_{V_{00}} \cdot d_{V_2} = d_{V_1} + \frac{1}{2} \cdot d_{V_2}$$

$$D_{V_{10}} = d_{V_{10}} \cdot d_{V_2} = \frac{1}{2} \cdot d_{V_2}$$

El *duty cycle* del vector de módulo cero es, en este caso

$$D_{V_0} = 1 - D_{V_{00}} - D_{V_{10}}$$

y en un caso general

$$D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$$

El vector de módulo cero no está disponible como en un SVM convencional (cerrando o abriendo tres interruptores). Sin embargo, puede obtenerse utilizando cualquier pareja de vectores opuestos ($\vec{V}_{00}$ y $\vec{V}_{11}$ o $\vec{V}_{10}$ y $\vec{V}_{01}$) y repartir su aplicación en el 50% d_{V_0}cada uno para que, en promedio, su valor sea cero.

La ventaja obtenida es que, después de la avería, todavía puede utilizarse el convertidor electrónico y hacerlo con un software convencional SVM añadiendo unas mínimas modificaciones, como se ve en la figura 8.

La Figura 8a) muestra el módulo de software SVM antes de la avería, donde las entradas son las coordenadas α-β del vector que se desea modular, $\vec{v}_{ref}$, y el valor de la tensión en el bus CC del convertidor electrónico, V_{CC}. Las salidas son los *duty cycles* d_{V_j} y $d_{V_{j+1}}$ de los vectores $\vec{V}_j$ y $\vec{V}_{j+1}$ calculados para modular $\vec{v}_{ref}$ en cada sector del hexágono.

Las Figuras 8b) a 8g) muestran, para vc1=vc2=V_{CC}/2 y para cada sector del hexágono, cómo hay que combinar las salidas del SVM convencional para, después de la avería, obtener los *duty cycles* según la invención. En los seis casos, la entrada de tensión CC es, después de la avería, V_{CC}/2.

La Tabla 2 muestra los *duty cycles* globales, D_{V_k}y $D_{V_{k+1}}$, de cada vector $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$, $\vec{V}_{01}$ en cada sector del hexágono.

Sector	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot (D_{V_k}) + \vec{V}_{k+1} \cdot (D_{V_{k+1}}) + \vec{0} \cdot D_{V_0}; D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$
1	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
2	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot (d_{V_2} + d_{V_3})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
3	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
4	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
5	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot (d_{V_5} + d_{V_6})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
6	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$

Tabla 2

B) Caso en el que $v_{c1} \neq v_{c2} \neq V_{CC}/2$:

En una segunda parte de la invención se aborda el caso en que la tensión de los condensadores (5,5') no es constante debido al efecto de la corriente alterna de la fase conectada al punto medio de los condensadores, resultando $v_{c1} \neq v_{c2}$. Sería el caso en el que la capacidad de los condensadores es baja o la corriente de la fase muy elevada.

De forma semejante al caso A), se reproducen los pasos para construir el hexágono con las siguientes particularidades.

En este caso, más complejo, los vectores $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{10}$, $\vec{V}_{11}$, $\vec{V}_{01}$ se "mueven" ya que cambia su módulo y ángulo (fase) a medida que lo hacen v_{c1} y v_{c2} según se indica en las dos columnas de la derecha de la Tabla 1. En consecuencia, los rombos de la Figura 6 también se "mueven" con las variaciones de tensión de v_{c1} y v_{c2}.

Hay que considerar que el vector $\vec{v}_{ref}$ que se puede hacer girar en una circunferencia inscrita al hexágono tiene ahora un módulo máximo determinado por:

$$v_{ref\ max} = \frac{mínimo\ (v_{c1}, v_{c2})}{\sqrt{3}}$$

La consecuencia es que el tamaño del hexágono cambia continuamente con los valores de v_{c1} y v_{c2}, según se muestra en la Figura 9 entre un hexágono mínimo (9') y un hexágono máximo (9'').

El problema de la variación de las tensiones v_{c1} y v_{c2} puede superarse recalculando los *duty cycles* para mantener los vectores $\vec{V_1}$, $\vec{V_2}$, $\vec{V_3}$, $\vec{V_4}$, $\vec{V_5}$ y $\vec{V_6}$ situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0.

Gracias a que la tensión en los condensadores cambia lentamente en comparación con el tiempo de ciclo del microprocesador donde se implementa el control, es fácil hacer continuas correcciones a los *duty cycles* para estabilizar la posición (el ángulo) de los vectores que forman el hexágono, aunque no se podrá evitar que su módulo fluctúe.

Teniendo en cuenta la Tabla 2, los *duty cycles* que reconstruyen el hexágono ($\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$) y estabilizan sus ángulos, a partir de los vectores ($\vec{V}_{00}, \vec{V}_{01}, \vec{V}_{10}, \vec{V}_{11}$) cuando las tensiones v_{c1} y v_{c2} no son constantes, tienen que ser calculados según la Tabla 3 y los duty cycles, $d_{V_1}, d_{V_2}, d_{V_3}$, d_{V_4}, d_{V_5}, d_{V_6}, que se utilizan para modular $\vec{v}_{ref}$ son proporcionados por el SVM. En conjunto, los duty cycle globales resultado de componer ambas modulaciones son D_{V_k} y $D_{V_{k+1}}$.

Observar que en esta tabla, $\vec{V}_2\ \vec{V}_3\ \vec{V}_5\ \vec{V}_6$ comparten los mismos d_{V10}, d_{V01} pero d_{V00} y d_{V11} cambian para cada vector. El término “a” es común a todos ellos y su valor se ha indicado en la esquina superior izquierda de la Tabla 3.

$a = \left(\frac{vc1 - vc2}{V_{dc}}\right)$	$vc2 \leq vc1$	$vc2 > vc1$
$\vec{V}_1$	$\mathbf{d_{V00}} = 1$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{vc2}$
$\vec{V}_2$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_3$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc2}{vc1}\right) \cdot (1 - a)$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$
$\vec{V}_4$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{vc2}{vc1}$	$\mathbf{d_{V11}} = 1$
$\vec{V}_5$	$\mathbf{d_{V11}} = \left(\frac{vc2}{2 \cdot vc1}\right) \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_6$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$

Tabla 3

REIVINDICACIONES

1.- Método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase, donde el convertidor electrónico CC/CA trifásico comprende un bus de corriente continua formado por al menos dos condensadores (C1, C2) en serie, caracterizado porque comprende:

- conectar la fase con fallo de al menos un interruptor con el punto medio del bus de Corriente Continua formado entre los condensadores C_1 y C_2;
- medir unos vectores de tensión $\vec{V}_{00}$, $\vec{V}_{01}$, $\vec{V}_{10}$ y $\vec{V}_{11}$, generados por el convertidor CC/CA trifásico cuando el convertidor electrónico CC/CA trifásico tiene un fallo de al menos un interruptor en una misma en una fase;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_1$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_2$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{10}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{10}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_3$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{10}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{10}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$;
- calcular un vector de tensión V_4 aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_5$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{11}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{11}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{01}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{01}}$;
- calcular un vector de tensión $\vec{V}_6$ aplicando el vector de tensión $\vec{V}_{01}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{01}}$ y el vector de tensión $\vec{V}_{00}$ durante el % del periodo definido como $d_{V_{00}}$;
- reconstruir un hexágono formado por los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$;
- realizar una modulación del vector $\vec{v}_{ref}$ como

  $\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot D_k + \vec{V}_{k+1} \cdot D_{k+1} + \vec{0} \cdot D_{V_0}$

  para k= 1, 2, 3, 4 5 y 6, donde D_k y D_{k+1} son los duty cycles globales.

2.- Método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase, según la reivindicación 1, caracterizado porque, cuando la tensión en los condensadores es constante $v_{c1}=v_{c2}=V_{CC}/2$, el método adicionalmente comprende:

- limitar el módulo del vector $\vec{v}_{ref}$ a:

$$v_{ref\ max} = \frac{V_{cc}/2}{\sqrt{3}}$$

- mantener la fase de los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0 mediante el cálculo de los *duty cycles* $d_{V_{00}} = d_{V_{01}} = d_{V_{10}} = d_{V_{11}} = 50\% = 1/2$;
- llevar a cabo una etapa de modulación de vectores espaciales, SVM, mediante un modulador de vectores espaciales SVM, el cual calcula los duty cycles $d_{V_1}, d_{V_2}, d_{V_3}$, d_{V_4}, d_{V_5}, d_{V_6} que dan lugar a $\vec{v}_{ref}$ a partir de $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ según la Tabla 1, dando lugar a unos *duty cycle* globales, D_{V_k}, $D_{V_{k+1}}$:

Sector	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot (D_{V_k}) + \vec{V}_{k+1} \cdot (D_{V_{k+1}}) + \vec{0} \cdot D_{V_0};\ D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$
1	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
2	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot (d_{V_2} + d_{V_3})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
3	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
4	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
5	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot (d_{V_5} + d_{V_6})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
6	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$

Tabla 1

3.- Método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase, según la reivindicación 1, cuando la tensión en los condensadores es diferente $v_{c1} \neq v_{c2} \neq V_{CC}/2$, caracterizado porque comprende:

- limitar el módulo del vector $\vec{v}_{ref}$ a un valor máximo:

$$v_{ref\ max} = \frac{mínimo\ (v_{c1}, v_{c2})}{\sqrt{3}}$$

- mantener la fase de los vectores $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$ situados exactamente a 0^0, 60^0, 120^0, 180^0, 240^0, 300^0 y 360^0 mediante el cálculo de los *duty cycles* que aparecen en la Tabla 2:

Sector	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_k \cdot (D_{V_k}) + \vec{V}_{k+1} \cdot (D_{V_{k+1}}) + \vec{0} \cdot D_{V_0}; D_{V_0} = 1 - D_{V_k} - D_{V_{k+1}}$
1	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
2	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_2}) + \vec{V}_{10} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot (d_{V_2} + d_{V_3})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
3	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{V}_{10} \cdot (\mathbf{d_{V_{10}}} \cdot d_{V_3}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
4	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{11} \cdot (d_{V_4} + \mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
5	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (\mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot \left(\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot (d_{V_5} + d_{V_6})\right) + \vec{V}_{11} \cdot (\mathbf{d_{V_{11}}} \cdot d_{V_5}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$
6	$\vec{v}_{ref} = \vec{V}_{00} \cdot (d_{V_1} + \mathbf{d_{V_{00}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{V}_{01} \cdot (\mathbf{d_{V_{01}}} \cdot d_{V_6}) + \vec{0} \cdot d_{V_0}$

Tabla 2

donde $d_{V_{00}}, d_{V_{01}}, d_{V_{10}}$, $d_{V_{11}}$ se calculan según la tabla 3:

$a = \left(\frac{vc1 - vc2}{V_{dc}}\right)$	$vc2 \leq vc1$	$vc2 > vc1$
$\vec{V}_1$	$\mathbf{d_{V00}} = 1$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{vc2}$
$\vec{V}_2$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$ $\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_3$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc2}{vc1}\right) \cdot (1 - a)$	$\mathbf{d_{V10}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$
$\vec{V}_4$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{vc2}{vc1}$	$\mathbf{d_{V11}} = 1$
$\vec{V}_5$	$\mathbf{d_{V11}} = \left(\frac{vc2}{2 \cdot vc1}\right) \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$	$\mathbf{d_{V11}} = \frac{1}{2} \cdot (1 - a)$ $\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$
$\vec{V}_6$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc2}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + a)$	$\mathbf{d_{V01}} = \frac{vc1}{V_{dc}}$ $\mathbf{d_{V00}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{vc1}{vc2}\right) \cdot (1 + a)$

Tabla 3

– llevar a cabo una etapa de modulación de vectores espaciales, SVM, mediante un modulador de vectores espaciales SVM, el cual calcula los duty cycles $d_{V_1}, d_{V_2}, d_{V_3}$, d_{V_4}, d_{V_5}, d_{V_6} que dan lugar a $\vec{v}_{ref}$ a partir de $\overrightarrow{V_1}$, $\overrightarrow{V_2}$, $\overrightarrow{V_3}$, $\overrightarrow{V_4}$, $\overrightarrow{V_5}$ y $\overrightarrow{V_6}$.

4.- Método de control de un convertidor electrónico CC/CA trifásico con fallo en una fase, según una cualquiera de la reivindicaciones anteriores, caracterizado porque adicionalmente comprende:

- generar, después de la avería, con el convertidor electrónico CC/CA trifásico, una tensión trifásica haciendo girar el vector $\vec{v}_{ref}$ dentro del hexágono.

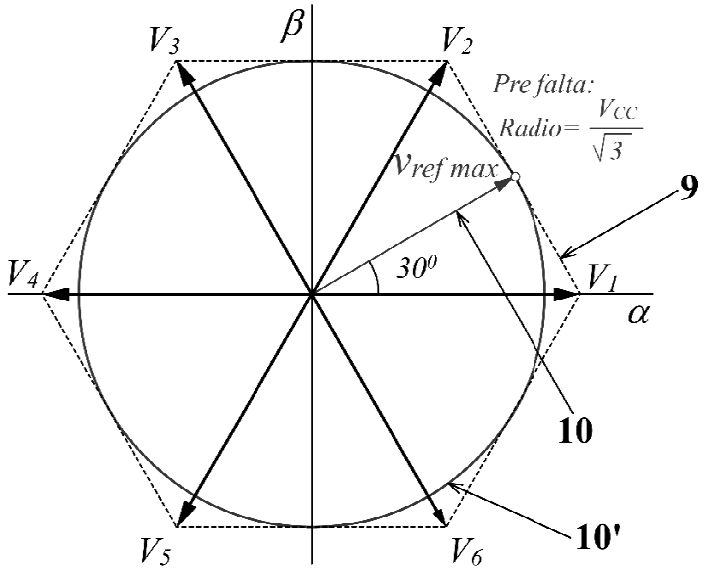
β
V3
V2
Pre falta:
Radio= Vcc/√3
Vref max
9
V4
30⁰
V1
α
10
10'
V5
V6

FIG. 1

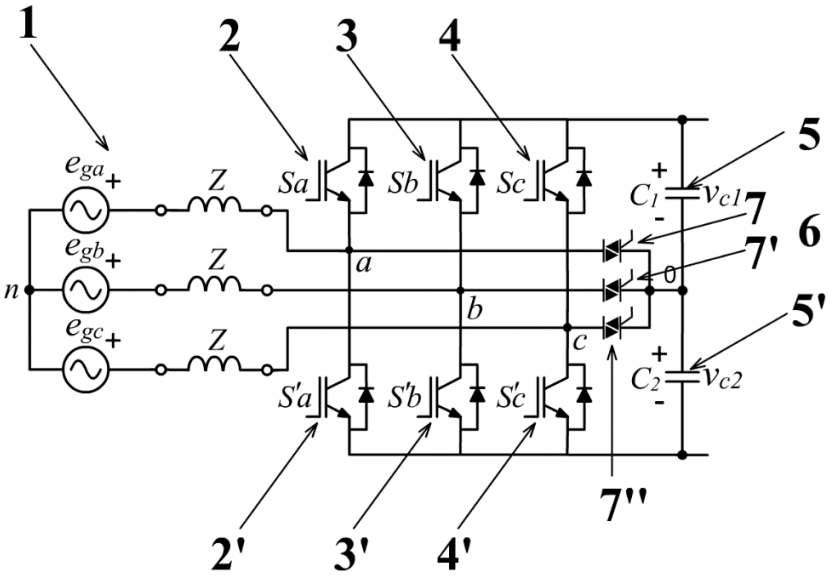
1
2
3
4
5
egaa
egb
egc
n
Z
Sa
Sb
Sc
C1
vc1
7
7'
6
a
b
c
0
5'
C2
vc2
S'a
S'b
S'c
7''
2'
3'
4'

FIG. 2

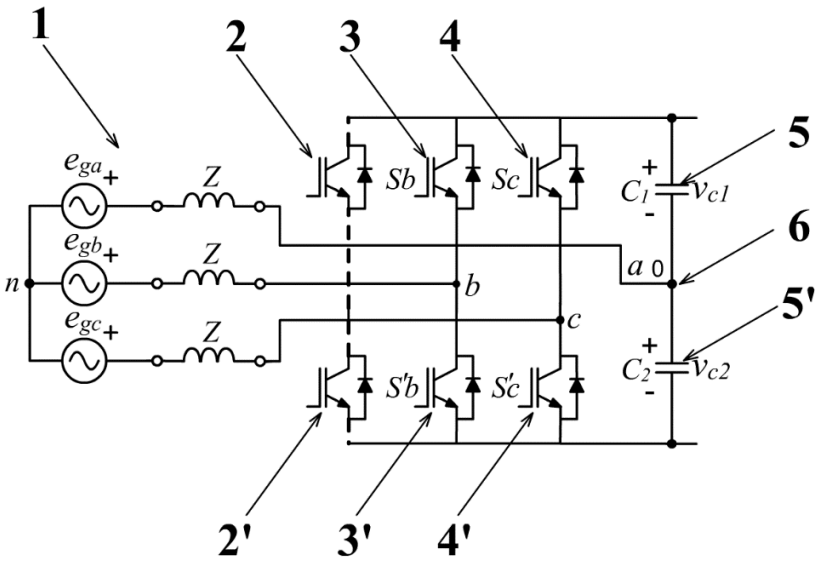
1
2
3
4
5
6
5'
2'
3'
4'
e_{ga}
e_{gb}
e_{gc}
Z
n
a
b
c
0
Sb
Sc
S'b
S'c
C_1
C_2
v_{c1}
v_{c2}

FIG. 3

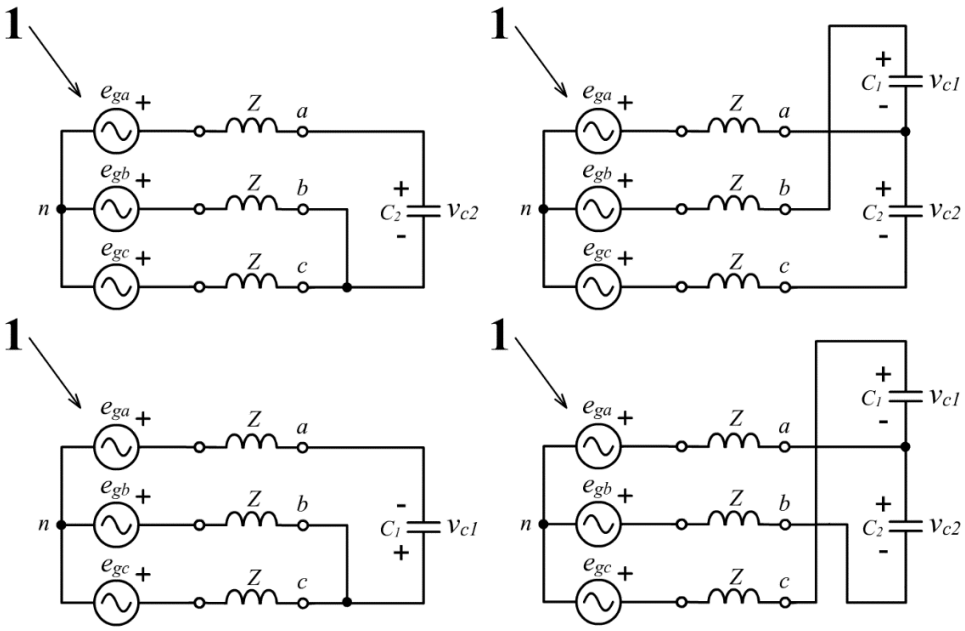
1
e_{ga}
e_{gb}
e_{gc}
Z
a
b
c
n
C_1
C_2
v_{c1}
v_{c2}

FIG. 4

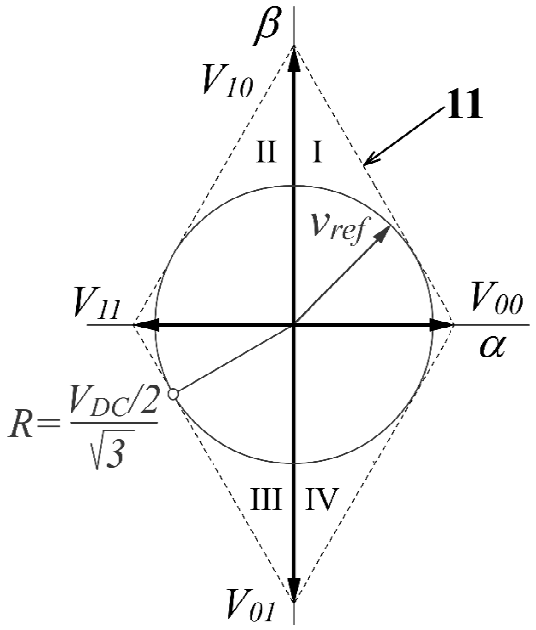
β
V10
11
II
I
vref
V11
V00
α
R=VDC/2/√3
III
IV
V01

FIG. 5

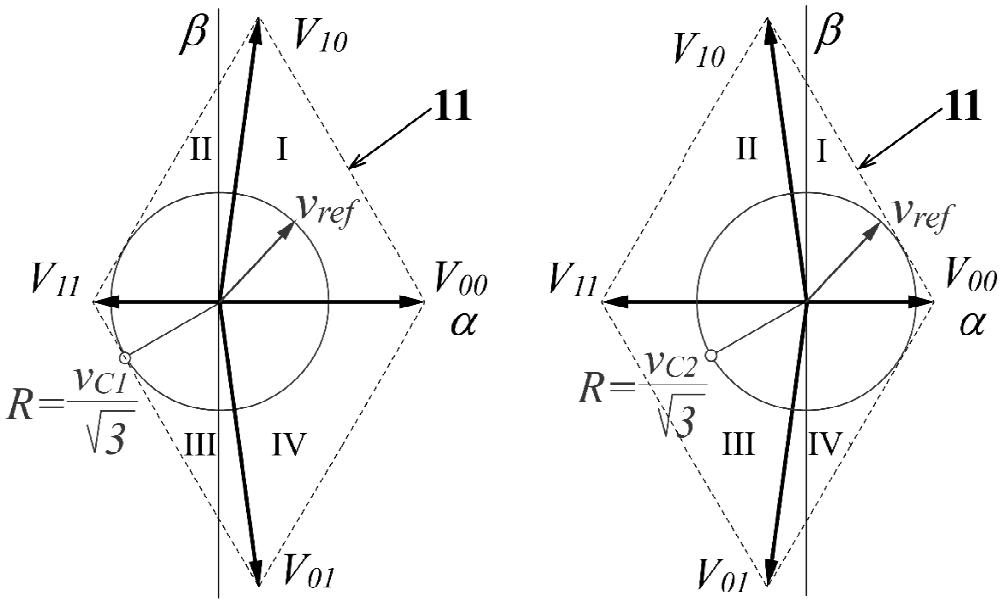
β
V10
11
II
I
vref
V11
V00
α
R=vC1/√3
III
IV
V01
V10
β
11
II
I
vref
V11
V00
α
R=vC2/√3
III
IV
V01

FIG. 6

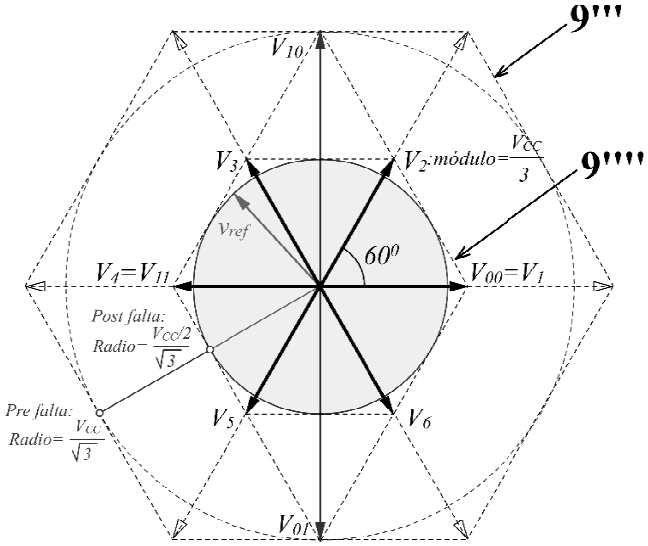
9'''
9''''
V10
V3
V2
módulo=Vcc/3
Vref
60º
V4=V11
V00=V1
Post falta:
Radio=Vcc/2/√3
Pre falta:
Radio=Vcc/√3
V5
V6
V01

FIG. 7

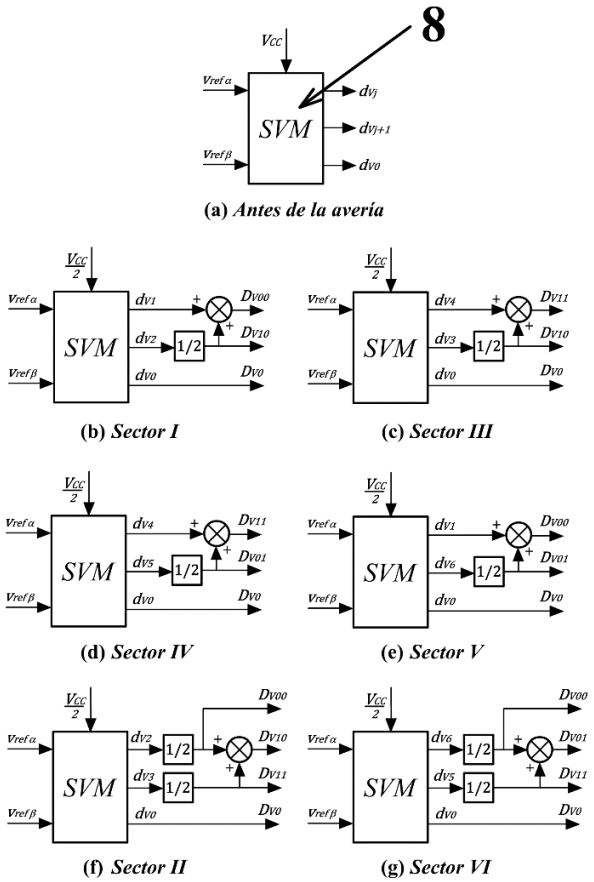
8
Vcc
Vref α
Vref β
SVM
dvj
dvj+1
dv0
(a) Antes de la avería
Vcc/2
dv1
dv2
1/2
Dv00
Dv10
Dv0
(b) Sector I
dv4
dv3
Dv11
(c) Sector III
dv5
Dv01
(d) Sector IV
dv6
(e) Sector V
(f) Sector II
(g) Sector VI

FIG. 8

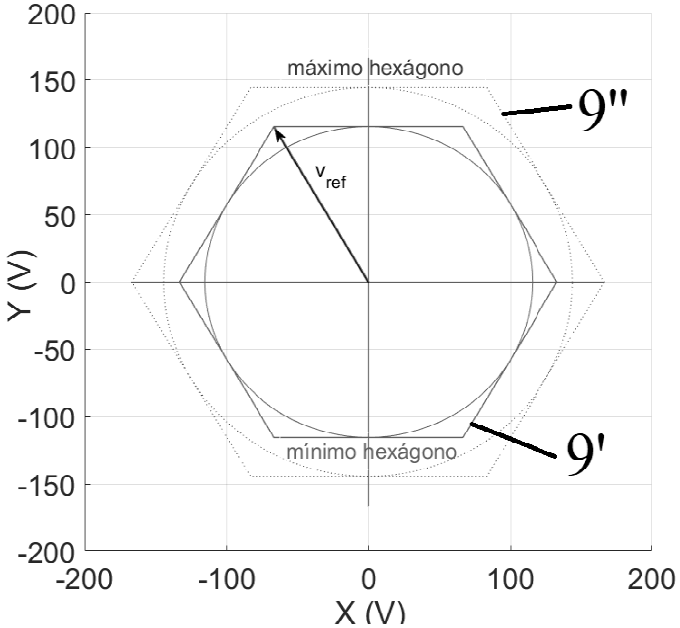
máximo hexágono
9''
v_{ref}
mínimo hexágono
9'
Y (V)
X (V)
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-200
-100
0
100
200

FIG. 9