

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 681 021**

51 Int. Cl.:

H02P 29/032 (2006.01)

H02P 29/024 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.09.2013** **E 13185044 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.06.2018** **EP 2852050**

54 Título: **Método y dispositivo de generación de n ($n \geq 3$) señales de mando para mandar un inversor de n fases**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.09.2018

73 Titular/es:
**SOCIÉTÉ ANONYME BELGE DE
CONSTRUCTIONS AÉRONAUTIQUES, S.A.B.C.A.
(100.0%)
Chaussée de Haecht, 1470
1130 Bruxelles, BE**

72 Inventor/es:
**ALEXANDRE, PAUL y
TELTEU-NEDELCO, DAN**

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

ES 2 681 021 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método y dispositivo de generación de n ($n \geq 3$) señales de mando para mandar un inversor de n fases

La presente invención concierne a un método de acuerdo con la reivindicación 1 y a un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 17 de generación de n ($n \geq 3$) señales de mando (ik^*, vk^*) utilizadas para determinar las señales de conmutación de los interruptores de un inversor de n fases conectado a una máquina eléctrica que funciona con n fases, cuyas señales de mando son generadas a partir de n señales primarias de mando (ik, vk) facilitadas y determinadas por un generador de consignas que forma parte de un regulador de corriente dispuesto para obtener un par de referencia predeterminado, cuyas señales de conmutación son aplicadas al inversor a fin de hacer circular n corriente eléctricas en la máquina para producir en la misma el par de referencia predeterminado, en cuyo método se mide con la ayuda de sensores en cada una de las citadas n fases de la máquina un valor instantáneo de la corriente que circula en cada una de las fases, y que durante cada uno de los ciclos de cálculo se muestrean estos valores instantáneos de las n corrientes ($imk(t)$).

Este método de mando es conocido con la ayuda del artículo de Liu Tian-Hua y otros titulado « A strategy for improving reliability of field oriented controlled induction motor drives » aparecido en "Proceedings of the industry applications society annual meeting, Deaborn, 28 de septiembre a 1 de octubre de 1991, páginas 449 a 455. La solicitud de patente US 2011/0221366 describe igualmente un método de mando de este tipo. Este método es aplicado a sistemas de accionamiento eléctrico tolerantes a las averías, y de modo más particular a los sistemas que ponen en práctica máquinas eléctricas que funcionan con un número de fases que es superior o igual a tres. Por un sistema de accionamiento eléctrico tolerante a las averías se entiende un sistema que en caso de pérdida de la corriente que circula en al menos una fase de la máquina eléctrica permite reaccionar de tal modo que le mantiene operativo con prestaciones similares en términos de producción de par y de velocidad. Por una máquina eléctrica se entiende tanto un motor eléctrico como un generador eléctrico.

El método de mando conocido permite, reconfigurando el sistema de mando, atenuar las ondulaciones de par en el caso de la pérdida de una fase de la máquina, por ejemplo a causa de un circuito abierto, o de un fallo de la parte de la electrónica de potencia correspondiente, por ejemplo un circuito abierto de un semiconductor, o de una de las fuentes de alimentación de la máquina en el caso de fuentes independientes para cada fase de la máquina.

La máquina eléctrica está dispuesta para ser alimentada por un inversor de potencia, a su vez alimentado por una fuente de tensión continua que puede ser por ejemplo una batería o una tensión de red rectificada. El inversor de potencia es gobernado por un sistema de mando que puede ser de tipo digital. En el caso de una fuente de tensión alterna, se puede poner en práctica un ciclo-inversor. Debe observarse que el sistema está diseñado y dimensionado de modo que asegure el funcionamiento del conjunto inversor-máquina con la potencia necesaria para la aplicación y teniendo en cuenta el nivel de tensión disponible en la fuente.

Con un esquema de regulación sin compensación, en caso de pérdida de la corriente que circula en una fase, la degradación del funcionamiento a consecuencia del tipo de avería mencionado anteriormente provoca una reducción del par facilitado por la máquina y una ondulación de este par de dos veces la frecuencia eléctrica de la corriente que circula en la máquina. Esto provoca efectos que pueden ser molestos, incluso inaceptables para ciertas aplicaciones a causa de las vibraciones generadas, del desgaste rápido de ciertos órganos de la máquina, del ruido, de los calentamientos y de los otros efectos derivados.

La invención tiene por objetivo realizar un método de generación de n ($n \geq 3$) señales de mando que permita obtener en caso de pérdida de una o de varias fases una atenuación de la ondulación de par evitando poner en práctica un proceso de detección, de decisión y de reconfiguración.

A tal fin un método de acuerdo con la invención está caracterizado por que durante cada uno de los ciclos de cálculo se determinan residuos ($ir(t)$) a partir de n valores de corriente instantáneos muestreados, cuyos residuos son combinaciones lineales de las corrientes muestreadas, y porque a continuación se determinan términos de compensación a partir de los residuos, y que se añaden los citados términos de compensación a las señales primarias de mando a fin de obtener las n señales de mando (ik^*, vk^*) para determinar las señales de conmutación de los interruptores destinados a mandar el inversor. El residuo es una combinación lineal de los n valores de corriente instantáneos muestreados durante cada ciclo de cálculo que refleja si la corriente circula de manera equilibrada en el conjunto de las fases y permite calcular términos de compensación que son añadidos entonces a las señales primarias de mando a fin de redistribuir las corrientes en las fases de la máquina que siguen estando operativas para así reducir la ondulación de par. En el caso en que la corriente circule de manera equilibrada, el residuo es igual a cero y las señales de mando primarias son aplicadas al aductor con un término de compensación igual a cero. En el caso en que la corriente no circule de manera equilibrada, el residuo no será igual a cero. Como los residuos y los términos de compensación son determinados en cada ciclo de cálculo, no hay ninguna detección de defecto como tal, reconfiguración de la estructura del sistema de regulación ni cambio de los valores de los parámetros de regulación.

De esta manera, el funcionamiento de la máquina es por así decirlo corregido permanentemente y se reduce significativamente el riesgo de una ondulación del par. Según el generador de consignas primarias utilizado, estos términos de compensación pueden ser tensiones, o bien corrientes.

- 5 Una primera forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que en una máquina de tres fases ($n=3$) con neutro conectado o fases independientes, el residuo $i_r(t)$ es determinado por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m2}(t) + i_{m3}(t)}{3}$$

donde $i_{mk}(t)$ ($1 \leq k \leq 3$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k . En dicho tipo de máquina el residuo es la tercera parte de la suma de las corrientes medidas en las tres fases.

- 10 Una segunda forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que en una máquina de cuatro fases ($n=4$) con neutro aislado, el residuo es determinado por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) - i_{m2}(t) + i_{m3}(t) - i_{m4}(t)}{4}$$

- 15 donde $i_{mk}(t)$ ($1 \leq k \leq 4$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k . La ventaja de una máquina de 4 fases con neutro aislado con respecto a una máquina de 3 fases es que a igual potencia de la máquina y a igual tensión de alimentación, la corriente de fase es más pequeña.

Una tercera forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que en una máquina de cuatro fases ($n=4$) con neutro conectado o fases independientes, dos residuos son determinados por:

$$\begin{cases} i_{r1}(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m3}(t)}{2} \\ i_{r2}(t) = \frac{i_{m2}(t) + i_{m4}(t)}{2} \end{cases}$$

- 20 donde $i_{mk}(t)$ ($1 \leq k \leq 4$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k . En este tipo de máquina los residuos $i_{r1}(t)$ e $i_{r2}(t)$ son ortogonales.

Una cuarta forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizado por que los residuos $i_{r\alpha}(t)$ e $i_{r\beta}(t)$ para una máquina con neutro aislado son determinados por:

$$\begin{cases} i_{r\alpha}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \cos \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \\ i_{r\beta}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \sen \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \end{cases}$$

- 25 donde los residuos de índice α y β son señales ortogonales y donde n es el número de fases de la máquina ($n > 4$), siendo $i_{mk}(t)$ el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k . Esta fórmula es aplicable a las máquinas con neutro aislado y cuyo número de fases sea superior a cuatro.

- 30 Una quinta forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que en una máquina de tres fases ($n=3$) con neutro conectado o fases independientes, respectivamente en una máquina de cuatro fases ($n=4$) con neutro aislado, las señales de mando de tensión eléctrica para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + R i_r(t) + L \frac{di_r(t)}{dt}$$

donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando de tensión eléctrica primaria producida por el regulador de par para la fase k ,
- 35 - R la resistencia de una fase de la máquina y
- L la inductancia de una fase de la máquina

Los términos de compensación son así determinados en función de la resistencia y de la inductancia de la máquina.

Una sexta forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que en una máquina de cuatro fases (n=4) con neutro conectado o fases independientes, las señales de mando de tensión eléctrica n cada una de las fases (1≤k≤n) son determinadas por:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + R i_{rk}(t) + L \frac{di_{rk}(t)}{dt}$$

5 donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando de tensión eléctrica primaria producida por el generador de consigna para la fase k,
- R la resistencia de una fase de la máquina y
- L la inductancia de una fase de la máquina

Los términos de compensación son así determinados en función de la resistencia y de la inductancia de la máquina.

10 Una séptima forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que los residuos son determinados por:

$$\begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix} = \mu_{n,c} \begin{pmatrix} 1 & -c_2 & -c_3 & \Lambda & -c_n \\ -c_n & 1 & -c_2 & \dots & -c_{n-1} \\ -c_{n-1} & -c_n & 1 & \dots & -c_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_2 & -c_3 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{m1}(t) \\ i_{m2}(t) \\ i_{m3}(t) \\ \dots \\ i_{mn}(t) \end{pmatrix}$$

donde

- c_2 a c_n son coeficientes correctores que dependen del número de fases y del tipo de conexión de la máquina y
- 15 - $\mu_{n,c}$ es un coeficiente de ponderación que depende del número de fases (n) y del tipo de conexión de la máquina (c)

y las señales de mando son determinadas por:

$$\begin{pmatrix} v_1^*(t) \\ v_2^*(t) \\ v_3^*(t) \\ \dots \\ v_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ \dots \\ v_n(t) \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix}$$

20 Esta forma de realización permite calcular directamente con la ayuda de un cálculo matricial las señales de mando cuando las mismas son expresadas en forma de señales de mando de tensión.

Una octava forma de realización preferente de un método de acuerdo con la invención está caracterizada por que los residuos son determinados por:

$$\begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix} = \mu_{n,c} \begin{pmatrix} 1 & -c_2 & -c_3 & \Lambda & -c_n \\ -c_n & 1 & -c_2 & \dots & -c_{n-1} \\ -c_{n-1} & -c_n & 1 & \dots & -c_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_2 & -c_3 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{m1}(t) \\ i_{m2}(t) \\ i_{m3}(t) \\ \dots \\ i_{mn}(t) \end{pmatrix}$$

donde

- 25 - c_2 a c_n son coeficientes correctores que dependen del número de fases y del tipo de conexión de la máquina y
- $\mu_{n,c}$ es un coeficiente de ponderación que depende del número de fases (n) y del tipo de conexión de la máquina (c), y las señales de mando son determinadas por:

$$\begin{pmatrix} i_1^*(t) \\ i_2^*(t) \\ i_3^*(t) \\ \dots \\ i_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ \dots \\ i_n(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rm}(t) \end{pmatrix}$$

Esta forma de realización permite calcular directamente con la ayuda de un cálculo matricial las señales de mando cuando las mismas son expresadas en forma de señales de mando de corriente.

La invención se describirá ahora en detalle con la ayuda de los dibujos en los cuales:

- 5 La figura 1a ilustra un dispositivo de accionamiento que utiliza una máquina trifásica con neutro aislado;
- La figura 1b ilustra el duplicado de los interruptores de potencia;
- La figura 2 ilustra un dispositivo de accionamiento que utiliza una máquina trifásica con neutro conectado al punto medio de la batería;
- 10 La figura 3 ilustra un dispositivo de accionamiento que utiliza una máquina trifásica con neutro gobernado por un brazo inversor,
- Las figuras 4 a y b ilustran un dispositivo de accionamiento que utiliza una máquina trifásica de fases independientes gobernadas por puentes en H alimentados por fuentes de tensión independientes (a la izquierda) o una fuente de tensión común (a la derecha);
- La figura 5 ilustra el diagrama de las fases de corriente de referencia para tres fases;
- 15 Las figuras 6 a y b ilustran respectivamente el diagrama de las fases de corrientes medidas en caso de pérdida de la fase 1 para una máquina de tres fases con neutro aislado, respectivamente de fases independientes;
- Las figuras 7 a y b ilustran el comportamiento de la regulación de par y de corriente durante un defecto;
- La figura 8 ilustra un ejemplo de estructura de un regulador de corriente, siendo las señales de mando señales de tensión.
- 20 Las figuras 9 a y b ilustran el comportamiento de la regulación de par durante un defecto con un regulador con compensación de acuerdo con la invención;
- La figura 10 ilustra un ejemplo de estructura de un regulador de corriente, siendo las señales de mando señales de corriente y
- 25 La figura 11 ilustra el diagrama de las fases de corrientes medidas en cinco fases en caso de pérdida de la fase 1 y de compensación de acuerdo con la invención.

En los dibujos una misma referencia ha sido atribuida a un mismo elemento o a un elemento análogo.

- 30 La figura 1 ilustra un dispositivo de accionamiento que utiliza una máquina trifásica (1) con neutro aislado y alimentada por una fuente de tensión eléctrica continua (2) conectada a la máquina por un inversor (3) que recibe señales de conmutación (a) para mandar los interruptores (4). La conexión sucesiva en el tiempo de los interruptores (4) por las señales de conmutación (a) permite aplicar sucesivamente la tensión UDC a las diferentes fases de la máquina y así alimentarla en tensión para hacer circular en la misma las corrientes en las diferentes fases. Esta fuente de tensión continua puede ser por ejemplo una batería o una tensión de red alterna rectificadas. Los elementos (2) y (3) pueden ser combinados en un ciclo-inversor/inversor matricial alimentado por una red alterna. El inversor es gobernado por un sistema de mando (7) que genera las señales de conmutación (a), que son determinadas a partir
- 35 de las tensiones/corrientes requeridas para producir el par de referencia predeterminado (Tref) y aplicadas al inversor (3) a fin de alimentar la máquina eléctrica (1) de manera adecuada. El sistema de mando (7) comprende un generador de consigna de par (6) conectado a un regulador de corriente (10). En función del par de referencia predeterminado que debe producir la máquina (1), este generador determinará una consigna de par que será facilitada al regulador de corriente (10). El regulador de corriente recibe igualmente la medición de n corrientes
- 40 medidas por los sensores de corriente (18) colocados a la salida del inversor y una medición de la posición del rotor de la máquina medida por el sensor de posición angular (8). Sobre la base de la consigna de par y de las mediciones de corriente de fase y de la posición del rotor, el regulador de corriente determina las señales de conmutación (a).

En el caso de una máquina trifásica con neutro conectado o de fases independientes gobernadas por puentes en H, como está ilustrado en las figuras 2, 3 y 4 la pérdida de una fase en circuito abierto lleva a una ondulación de par de una amplitud del 50% con respecto al par nominal.

5 En el caso de una máquina de cuatro fases, la pérdida de una fase lleva a una ondulación de par de una amplitud del 33% con respecto al par nominal.

De modo más general, en una máquina de n fases ($n \geq 3$), la pérdida de una fase lleva a una ondulación de par de una amplitud de $1/(n-1)$ con respecto al par nominal.

10 La figura 5 ilustra el diagrama de las fases de corriente de referencia para una máquina de tres fases. En esta figura se ve que la suma vectorial de estas corrientes es igual a cero. La figura 6.a ilustra el diagrama de las fases de corrientes medidas en caso de pérdida de la fase 1 para una máquina de tres fases con neutro aislado. La pérdida de una fase en circuito abierto implica para esta máquina trifásica 1 con neutro aislado la pérdida del control de la máquina. En efecto, siendo las corrientes de las dos fases restantes opuestas una a la otra, se obtiene un par que se anula para ciertas posiciones del rotor y por tanto un arranque imposible en estas posiciones particulares. Lo mismo ocurre durante el fallo en cortocircuito de un semiconductor del puente de potencia. Hay que observar que esta situación puede ser evitada doblando los interruptores de potencia 4 y 4' como ilustra la figura 1b.

15 Al duplicar los interruptores de potencia, cuando un interruptor permanece cerrado, se llega a que la fase conectada a este interruptor permanezca operativa sin que el funcionamiento de la máquina sea perturbado. La figura 6.b ilustra el diagrama de las fases de corrientes medidas en caso de pérdida de la fase 1 para una máquina de tres fases con neutro conectado. La ondulación de par en caso de pérdida de la fase 1 es del 50% con respecto al par nominal.

20 La figura 7a ilustra un ejemplo de un par (T) producido por la máquina trifásica con neutro conectado en función del tiempo (t) en caso de no compensación de la pérdida de fase. Suponiendo que la consigna de par sea igual a 1 se constata que la pérdida de una fase en 0,095 segundos provoca que el par ondule entre aproximadamente 1,1 y 0,5. Como ilustra la figura 7b, que ilustra la corriente $i_k(t)$ que circula en las tres fases de la máquina en función del tiempo, el hecho de que la corriente deje de circular en la fase $k=1$ provoca que la corriente en las otras dos fases aumente en amplitud y experimente un desplazamiento de fase.

25 Una solución posible sería aumentar el número de fases con el objetivo de reducir la amplitud de la ondulación de par en caso de defecto. Sin embargo esto es una solución cara, porque la misma impone el aumento del número de semiconductores de potencia y de mandos relacionados, el aumento del número de sensores, la necesidad de un calculador más potente, un sistema de conexiones más complejo y otros.

30 Por otra parte, durante la pérdida de una fase, aumenta la necesidad de tensión de alimentación necesaria para llegar al punto de funcionamiento correspondiente a la potencia media necesaria para la aplicación. Además, en el caso de una máquina con neutro aislado asociada a una regulación sin compensación, el potencial de un neutro oscila a la frecuencia eléctrica de las corrientes que circulan en las fases de la máquina, lo que impone tomar un margen suplementario sobre la tensión de alimentación necesaria para obtener el par.

35 Es por tanto interesante introducir una compensación que permita anular los efectos no deseables de la avería y en particular la ondulación de par.

40 La técnica anterior enseña una compensación que permite anular la ondulación del par en el caso de un defecto en circuito abierto a nivel de la máquina del inversor utilizando un sistema de detección de avería. Esta compensación puede ser obtenida modificando la amplitud y la fase de las corrientes de las fases de la máquina que continúan operativas, esto introduciendo términos correctores. Estos términos reconstruyen el componente de par perdido a consecuencia del defecto.

45 Se conoce determinar términos correctores en particular términos correctores periódicos, que están en fase o en oposición de fase con la corriente nominal de la fase perdida y cuya amplitud es modulada por coeficientes, por ejemplo los tomados en las tablas 1 y 2 mencionadas más adelante. Hay que distinguir dos casos:

- el primero es la máquina con neutro aislado para la cual la suma de las corrientes de las fases de la máquina es nula tanto antes como después del defecto;
- el segundo es la máquina con neutro conectado en la que la corriente de neutro es nula en funcionamiento normal y en la cual puede circular una corriente por el neutro en caso de defecto, o la máquina cuyas fases son alimentadas de manera independiente.

50 Un ejemplo de cálculo de los coeficientes correctores viene dado en el artículo de François Baudart, Bruno Dehez, Ernest Matagne, Dan Telteu-Nedelcu, Paul Alexandre y Francis Labrique titulado « Torque Control Strategy of Poliphase Permanent-Magnet Synchronous Machines With Minimal Controller Reconfiguration Under Open-Circuit Fault of One Phase » publicado en la revista IEEE transaction on Industrial Electronics, vol. 59, nº 6, Junio 2012, páginas 2632 a 2644. La puesta en práctica de los coeficientes correctores se efectúa como sigue para una máquina

ES 2 681 021 T3

síncrona con fuerza contraelectromotriz sinusoidal, en la que en funcionamiento normal las corrientes tienen la forma:

$$i_k(t) = I\sqrt{2}\cos\left(\omega_e t - (k-1)\frac{2\pi}{n}\right)$$

donde

- 5
- $i_k(t)$. valor instantáneo de la corriente correspondiente a la fase k , ($1 \leq k \leq n$)
 - I : amplitud de la corriente (valor eficaz),
 - n : número de fases,
 - ω_e : frecuencia eléctrica de la corriente,
 - t : tiempo
- 10 Durante un defecto de circuito abierto de por ejemplo la fase $k=1$ la misma no produce par, lo que causa una ondulación del par global de amplitud $1/(n-1)$ y de pulsación $2\omega_e$. Esta ondulación puede ser compensada inyectando los términos correctores siguientes en las otras fases:

$$\begin{cases} i_{1,d}(t) = 0 \\ i_{k,d}(t) = i_k(t) + c_k \cdot i_1(t) \end{cases}$$

donde

- 15
- $i_{1,d}(t)$ es la corriente después de defecto de la fase $k=1$,
 - $i_{k,d}(t)$ es la corriente de la fase $k \neq 1$ corregida para compensar la pérdida de la fase 1,
 - $i_k(t)$ es la corriente de la fase $k \neq 1$ que habría estado presente en ausencia de defecto,
 - c_k es el coeficiente corrector asociado a la fase k ,
 - $i_1(t)$ es la corriente de la fase 1 que habría estado presente en ausencia de defecto.
- 20 Los coeficientes c_k valen en el caso de neutro aislado y apertura de fase 1 (véase la figura 1):

Coeficiente	Número de fase n			
	3	4	5	6
c2	/	1	0,809	0,667
c3	/	-1	-0,309	0
c4		1	-0,309	-0,333
c5			0,809	0
c6				0,667

Tabla 1

En el caso de neutro conectado o fases independientes y apertura de la fase 1 (véanse las figuras 2, 3 y 4), los coeficientes c_k valen:

Coeficiente	Número de fase n			
	3	4	5	6
c2	-1/	0	0,206	0,25
c3	-1/	-1	-0,539	-0,25

Coeficiente	Número de fase n			
	3	4	5	6
c4		0	-0,539	-0,5
c5			0,206	-0,25
c6				0,25

Tabla 2

El ejemplo de los coeficientes recogidos en las tablas anteriores minimiza las pérdidas Joule pero es posible determinar otros coeficientes que optimicen otros criterios como por ejemplo la amplitud máxima de las corrientes en las fases de la máquina.

- 5 En el método propuesto por la patente US 6.949.908 así como en el artículo antes citado, a fin de aplicar estos términos correctores, las averías deben ser detectadas e identificadas por un sistema de vigilancia de las señales que provienen de diferentes sensores y, en su caso, una unidad toma la decisión de modificar o reconfigurar el dispositivo de mando para inyectar los términos de corrección adecuados en función de la fase en avería y así reducir la ondulación del par a fin de reducir sus efectos perjudiciales.
- 10 Desgraciadamente, tal sistema de vigilancia y de detección presenta un tiempo de reacción demasiado lento y un retardo demasiado grande entre la detección y la regulación y la compensación de la pérdida de potencia. El diseño, y sobre todo la validación, de un sistema con varios estados que comprende funciones de detección y de decisión que son lentos y por tanto presentan dificultades reales, en particular si el accionador o el accionamiento funcionan en condiciones extremas y durante duraciones importantes. En efecto, primero hay que detectar aquélla de las fases que falla y a continuación determinar para cada una de las fases que siguen operativas las corrientes $i_{kd}(t)$. Esto hace que este método sea complejo y pueda reducir la fiabilidad del sistema
- 15

El método propuesto de acuerdo con la presente invención permite, por una intervención apropiada en el sistema de mando, obtener de modo más eficaz y más fiable una atenuación de la ondulación del par sin sistema de detección de avería ni de reconfiguración.

- 20 Esta intervención consiste en determinar en cada ciclo de cálculo términos de compensación (corrientes o tensiones según el tipo de estructura de regulación) a partir de las corrientes instantáneas medidas en las fases de la máquina y añadirles a las señales de mando primarias determinadas por el generador de consigna para así facilitar al inversor señales de mando destinadas a gobernar la alimentación de la máquina y de esta manera reducir la ondulación de par en caso de pérdida de al menos una fase.
- 25 La figura 8 ilustra un ejemplo de un regulador de corriente (10) que permite regular la corriente facilitada a la máquina (no ilustrada) de n fases aplicando el método de generación de n señales de mando $v^*k(t)$ ($1 \leq k \leq n$) de acuerdo con la invención. El regulador de corriente ilustrado en la figura 8 produce señales primarias de mando $v_k(t)$ que son señales de tensión eléctrica. El regulador de corriente comprende un primer bloque de cálculo (15) que recibe en su entrada las n señales que indican el valor instantáneo de la corriente que circula en las diferentes fases y que vienen de los sensores (18) (no recogidos en la figura 8) así como la posición angular del rotor medida por el sensor (8) (no recogidos en la figura 8). El primer bloque de cálculo (15) calcula sobre base de las señales recibidas aplicando una transformación de Concordia/Park (véase Werner LEONHARD, « Control of Electrical Drives », Springer 2001, ISBN 3-540-41820-2), la corriente de eje q designada i_q (eje q en cuadratura con el flujo del rotor) que es proporcional al par y la corriente de eje d designada i_d (eje directo: alineado con el flujo del rotor) que no produce par y que está en fase con el flujo del rotor. La consigna de corriente i_d es por tanto nula a fin de minimizar las pérdidas Joule salvo en caso de interrupción de flujo. Las corrientes i_q e i_d son facilitadas respectivamente a un primer (20) y un segundo (21) comparador.
- 30
- 35

- El regulador de corriente (10) comprende igualmente un derivador (22) que recibe en su entrada la señal que tiene del sensor de posición (8) del rotor. Hay que observar que este derivador podría ser evitado si se utiliza un sensor de velocidad. Este derivador produce una señal de velocidad de rotación del rotor a partir de la posición medida del rotor. Una salida del derivador está conectada a un segundo bloque de cálculo (13) el cual está conectado igualmente a la salida del primer bloque de cálculo (15). El segundo bloque de cálculo (13) calcula la fuerza contraelectromotriz de la máquina así como los términos de desacoplamiento de eje d y q. La salida del derivador (22) está conectada igualmente al bloque de acondicionamiento de consigna de par (23) a fin de determinar la consigna de corriente i_{dref} e i_{qref} (con i_{dref} negativo en el caso de interrupción de flujo en la máquina).
- 40
- 45

Un primero (11) y un segundo (12) corrector de corriente están respectivamente conectados a la salida de los comparadores (20) y (21). Estos correctores de corriente reciben cada uno en su entrada una señal de error producida por los comparadores e indican la diferencia entre las corrientes i_{qref} e i_{dref} y los valores determinados i_q e i_d por el primer bloque de cálculo (15).

Las salidas de los reguladores (11) y (12) son las señales de tensión a las cuales se añaden con la ayuda de sumadores (24) y (25) los términos de desacoplamiento así como la fuerza contraelectromotriz calculados por el segundo bloque de cálculo (13). La salida de cada sumador (24) y (25) representa las tensiones u_q y u_d en el sistema de referencia Park. Estas tensiones u_q y u_d son transformadas por un tercer bloque de cálculo (14) que hace la conversión inversa de la producida por el primer bloque de cálculo transformando las tensiones u_d y u_q en un conjunto equilibrado de n tensiones $v_k(t)$ alternas y designadas tensiones primarias. El tercer bloque de cálculo (14) aplica a las señales de tensión u_d y u_q una transformación de Park inversa seguida de una transformación de Concordia inversa.

Un detalle de las transformaciones del esquema clásico está recogido especialmente en el documento siguiente: F. Baudart, F. Labrique, E. Matagne, D. Telteu, P. Alexandre "Calcul d'une matrice de Concordia étendue pour des machines synchrones polyphasées segmentées en marche normale et marche dégradée", publicada en los Proceedings de la Conferencia Electrónica del Futuro 2009, EF 2009, Compiègne, Francia, 6 páginas, 24-25 de septiembre de 2009.

Los sensores de corrientes (18) (no recogidos en la figura 8) están colocados en las n fases de la máquina y miden los valores instantáneos de las corrientes que circulan en cada una de las citadas n fases de la máquina. Estos valores instantáneos de las corrientes son muestreados y facilitados después a un cuarto bloque de cálculo (16) el cual sobre la base de las muestras de las corrientes recibidas determina residuos. Por residuo se entiende una señal de corriente obtenida por una combinación lineal de los valores instantáneos de las corrientes muestreados. El valor de esta combinación es nulo en el caso de un sistema de corrientes equilibrado, o sea en ausencia de defecto. El residuo es una señal de corriente que tiene una amplitud vectorial similar a la de la corriente $i_k(t)$ que habría debido circular en la fase k en defecto, pero de signo opuesto al de la corriente $i_k(t)$. A partir de los residuos anteriormente determinados el bloque (16) calcula términos de compensación que son facilitados a su salida. Estos términos de compensación son sumados cada vez a las señales de tensión primarias $v_k(t)$ producidas por el bloque (14). Las señales de mando $v^*k(t)$ así obtenidas son facilitadas al quinto bloque de cálculo (26) que las convierte en señales de conmutación para los interruptores (4) no recogidos en esta figura).

En ausencia de defecto, los residuos son nulos y por tanto la retroacción aplicada es nula. Por el contrario en caso de defecto, los sensores (18) medirán n corrientes que constituyen un sistema desequilibrado en el que los residuos determinados por el bloque (16) son no nulos. Estos residuos permiten determinar términos de tensión de compensación que hay que añadir a las señales del tercer bloque de cálculo (14) a fin de reducir la ondulación de par cualquiera que sea la fase en defecto.

La figura 9.a ilustra el comportamiento del par durante la pérdida de una fase en el caso de una regulación de acuerdo con la invención con compensación (véase la figura 8) de una máquina trifásica gobernada por puentes en H (véase la figura 4). Como se puede constatar, durante la pérdida de la fase 3 (circuito abierto), después de un breve transitorio, el par medio es restablecido casi al 100% con una ondulación de par reducida a un valor despreciable. La señal de residuo $i_r(t)$ que vale la tercera parte de la suma de las 3 corrientes de fase está representada con aquéllas en la figura 9b. Se constata bien que ésta es nula antes de la aparición del defecto y es la opuesta a la corriente que habría circulado en la fase 3 en ausencia de defecto (en este caso de régimen establecido). En la figura 9b se constatará igualmente que en las otras dos fases la corriente ha aumentado y su fase ha cambiado para así compensar la pérdida de la fase 3 y obtener el par necesario.

Hay que observar que para protegerse de los defectos de tipo cortocircuito de los semiconductores y por tanto reducirse sistemáticamente a defectos de tipo circuito abierto, es posible elegir una topología de interruptores de potencia duplicados, como ilustra la figura 1b.

La determinación del o de los residuos depende del número de fases de la máquina y de la conexión de la máquina: neutro aislado (véase la figura 1), neutro conectado (véanse las figuras 2 y 3) o fases independientes (véase la figura 4).

En una máquina de 3 fases ($n=3$) de neutro conectado o fases independientes, un solo residuo $i_r(t)$ es sufriente y se determina por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m2}(t) + i_{m3}(t)}{3}$$

en el caso de una máquina de 4 fases ($n=4$) de neutro aislado, un solo residuo $i_r(t)$ es suficiente y se determina por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) - i_{m2}(t) + i_{m3}(t) - i_{m4}(t)}{4}$$

Por el contrario en el caso de una máquina de 4 fases de neutro conectado o fases independientes, dos residuos deben ser determinados por:

$$\begin{cases} i_{r1}(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m3}(t)}{2} \\ i_{r2}(t) = \frac{i_{m2}(t) + i_{m4}(t)}{2} \end{cases}$$

5 Hay que observar de según la fase en defecto, uno de los dos residuos permanece nulo: por ejemplo, en el caso en que a consecuencia de un defecto, la corriente $i_{m1}(t)$ desaparezca, el residuo $i_{r2}(t)$ permanece nulo, porque la corriente $i_{m1}(t)$ no interviene en el cálculo del residuo $i_{r2}(t)$. La puesta en práctica de dos residuos permite compensar el sistema cualquiera que sea la fase en defecto sin utilizar algoritmo de detección.

En el caso más general de una máquina de un número de fases superior a 4 ($n > 4$), la determinación de los residuos denominados $i_{r\alpha}(t)$ e $i_{r\beta}(t)$ se establece de la manera siguiente, donde los residuos de índice α y β son señales ortogonales:

$$\begin{cases} i_{r\alpha}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \cos \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \\ i_{r\beta}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \sin \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \end{cases}$$

- 10 - n es el número de fases de la máquina ($n > 4$),
 - $i_{mk}(t)$ es el valor instantáneo medido de la corriente correspondiente a la fase k .

15 Para determinar a partir de los residuos los términos de compensación de las señales de mando, el método se injerta en el esquema clásico de control de las corriente/flujo de la máquina que eventualmente está involucrado en un bucle de velocidad y/o un bucle de posición o, de manera más general que está integrado en una retroacción de estado. Así, en la forma de realización ilustrada en la figura 8 los términos de compensación son aplicados permanentemente a las señales primarias de tensión v_k producidas por el tercer bloque de cálculo (14). Estos términos de compensación son nulos y por tanto sin efecto en ausencia de defecto, porque los residuos son nulos. Debido a esto, una detección de defecto fase por fase y una modificación del algoritmo de control no son necesarias, y la tensión primaria es facilitada con términos de compensación iguales a 0 en la máquina. Esta acción permite
 20 reaccionar más rápidamente y por tanto más eficazmente en caso de defecto.

Otras maneras de realizar esta regulación de corriente como el Direct Torque Control son equivalentes y pueden ser utilizadas igualmente.

En el ejemplo del mando en tensión de una máquina de 3 fases ($n=3$) de neutro conectado o fases independientes, las señales de mando compensadas son:

25
$$v_k^*(t) = v_k(t) + R i_r(t) + L \frac{di_r}{dt}$$

donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando primaria en tensión determinada por el bloque de cálculo (14),
 - $v_k^*(t)$ es la tensión compensada que hay que aplicar a la fase k de la máquina,
 - R es la resistencia de una fase de la máquina
 30 - L es la inductancia de una fase de la máquina.

Los cálculos de los términos correctores $R i_r(t) + L \frac{di_r(t)}{dt}$ pueden ser obtenidos por un filtro de paso alto o por un observador.

Hay que observar que en ausencia de defecto los residuos son nulos, porque $i_r(t)$ es nulo de modo que $v_k^*(t) = v_k(t)$ lo que corresponde al funcionamiento normal.

35 En el ejemplo del mando en tensión de la máquina de 4 fases ($n=4$) de neutro aislado, las señales de mando compensadas son determinadas utilizando las mismas notaciones:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + Ri_r(t) + L \frac{di_r}{dt}$$

En el ejemplo del mando en tensión de la máquina de 4 fases (n=4) de neutro conectado o fases independientes, las señales de mando compensadas son:

5

$$v_1^*(t) = v_1(t) + Ri_{r1} + L \frac{dir_1}{dt}$$

$$v_2^*(t) = v_2(t) + Ri_{r2} + L \frac{dir_2}{dt}$$

$$v_3^*(t) = v_3(t) + Ri_{r1} + L \frac{dir_1}{dt}$$

$$v_4^*(t) = v_4(t) + Ri_{r2} + L \frac{dir_2}{dt}$$

los cálculos de los términos correctores $Ri_{r1,2}(t) + L \frac{di_{r1,2}(t)}{dt}$ pueden ser obtenidos por un filtro de paso alto o por un observador.

10 En el caso más general de una máquina de un número de fases superior a 4 (n>4) y neutro aislado, las señales de mando compensadas son:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + \cos\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)\left(Ri_{r\alpha}(t) + L \frac{di_{r\alpha}(t)}{dt}\right) + \text{sen}\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)\left(Ri_{r\beta}(t) + L \frac{di_{r\beta}(t)}{dt}\right)$$

Los cálculos de los términos correctores pueden ser obtenidos por un filtro de paso alto o por un observador.

15 El regulador de corriente (10) está basado en la utilización del dispositivo digital que puede ser por ejemplo un sistema de microprocesador o cualquier otro tipo de calculador, dispositivo cuyo perímetro esta indicado en la figura 8. Este dispositivo asegura digitalmente el conjunto de las funciones indicadas en el esquema de bloques y eventualmente de otras funciones ligadas al control del sistema de accionamiento o de arrastre que no están representadas aquí como por ejemplo la regulación de velocidad, la regulación de posición, la comunicación y la interfaz con otros procesos.

20 Una variante de la utilización del método que es objeto de la invención está ilustrada en la figura 10 para una máquina de n fases. La regulación de par está basada en este caso en la generación de n corrientes de consigna primarias $i_1(t)$ a $i_n(t)$ que son facilitadas directamente a reguladores de histéresis 31-1, 31-2,... 31-n. En esta forma de realización el bloque (14) determina directamente las señales primarias de mando a partir de las corrientes i_{ref} e i_{dref} . En este caso, la determinación de residuos se hace del mismo modo que el descrito anteriormente. Los términos de compensación de corriente vienen dados por:

- en el caso de una máquina de 3 fases de fases independientes o neutro conectado, el residuo es determinado por el bloque (16) y sobre la base de

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m2}(t) + i_{m3}(t)}{3}$$

y es añadido directamente a las corrientes de consigna primarias como está ilustrado en la figura 10;

30 - en el caso de una máquina de 4 fases de neutro aislado, el residuo es añadido igualmente directamente a las corrientes de consigna primarias;

- en el caso de una máquina de 4 fases de fases independientes o neutro conectado, el residuo $i_{r1}(t)$ es añadido a las corrientes de consigna primarias de las fases 1 y 3, el residuo $i_{r2}(t)$ es añadido a las corrientes de consigna primarias de las fases 2 y 4;

35 - en el caso de una máquina n>4, los residuos α, β son añadidos a las n corrientes de consigna primarias según la fórmula.

$$i_k^*(t) = i_k(t) + \cos\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)i_{r\alpha}(t) + \text{sen}\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)i_{r\beta}(t)$$

Otra variante del método consiste en determinar n residuos utilizando los coeficientes correctores c_k de las tablas 1 o 2 según que se considere una máquina de neutro aislado o de fases independientes o neutro conectado:

$$\begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rn}(t) \end{pmatrix} = \mu_{n,c} \begin{pmatrix} 1 & -c_2 & -c_3 & \dots & -c_n \\ -c_n & 1 & -c_2 & \dots & -c_{n-1} \\ -c_{n-1} & -c_n & 1 & \dots & -c_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_2 & -c_3 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{m1}(t) \\ i_{m2}(t) \\ i_{m3}(t) \\ \dots \\ i_{mn}(t) \end{pmatrix}$$

donde

- 5 - c_k es el coeficiente corrector asociado a la fase k, como por ejemplo los d las tablas 1 y 2
- $\mu_{n,c}$ es un coeficiente de ponderación que depende del número de fase n y del tipo de conexión (c) de la máquina:
 - $\mu_{n,c} = \frac{n-3}{n}$ en el caso de una máquina de neutro aislado
 - $\mu_{n,c} = \frac{n-2}{n}$ en el caso de una máquina de fases independientes o neutro conectado

10 las señales de mando (v_k^* , i_k^*) se obtienen después respectivamente de la manera siguiente, para un mando en tensión:

$$\begin{pmatrix} v_1^*(t) \\ v_2^*(t) \\ v_3^*(t) \\ \dots \\ v_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ \dots \\ v_n(t) \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix}$$

y para un mando en corriente:

$$\begin{pmatrix} i_1^*(t) \\ i_2^*(t) \\ i_3^*(t) \\ \dots \\ i_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ \dots \\ i_n(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{rs}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rn}(t) \end{pmatrix}$$

REIVINDICACIONES

1. Método de generación de n , $n \geq 3$, señales de mando (ik^* , vk^*) utilizadas para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) de un inversor (3) de n fases conectado a una máquina eléctrica (1) que funciona con n fases, cuyas señales de mando son generadas a partir de n señales primarias de mando (ik , vk) facilitadas y determinadas por un generador de consignas (5) que forma parte de un regulador de corriente (10) dispuesto para obtener un par de referencia predeterminado, cuyas señales de conmutación son aplicadas al inversor (3) a fin de hacer circular n corrientes eléctricas en la máquina para producir en la misma el par de referencia predeterminado, en cuyo método se mide con la ayuda de sensores en cada una de las citadas n fases de la máquina un valor instantáneo de la corriente que circula en cada una de las fases, y por que durante cada uno de los ciclos de cálculo se muestrean estos valores instantáneos de las n corrientes ($imk(t)$), caracterizado por que durante cada uno de los ciclos de cálculo se determinan residuos ($ir(t)$) a partir de los n valores de corriente instantáneos muestreados, cuyos residuos son combinaciones lineales de las corrientes muestreadas, y a continuación se determinan términos de compensación a partir de los residuos, y se añaden los citados términos de compensación a las señales primarias de mando a fin de obtener las n señales de mando (ik^* , vk^*) para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) destinados a mandar el inversor.

2. Método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que las n señales de mando primarias (vk) facilitadas por el generador de consigna, los n términos de compensación y las n señales de mando (vk^*) son consignas de tensión utilizadas para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) del inversor.

3. Método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que las n señales de mando primarias (ik) facilitados por el generador de consigna, los n términos de compensación y las n señales de mando (ik^*) son consignas de corriente utilizadas para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) del inversor.

4. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que para una máquina de tres fases con neutro conectado o fases independientes, el residuo es determinado por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m2}(t) + i_{m3}(t)}{3}$$

donde $imk(t)$ ($1 \leq k \leq 3$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k .

5. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que para una máquina de cuatro fases, con neutro conectado o fases independientes, dos residuos son determinados por:

$$\begin{cases} i_{r1}(t) = \frac{i_{m1}(t) + i_{m3}(t)}{2} \\ i_{r2}(t) = \frac{i_{m2}(t) + i_{m4}(t)}{2} \end{cases}$$

donde $imk(t)$ ($1 \leq k \leq 4$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k .

6. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que para una máquina de cuatro fases con neutro aislado, el residuo es determinado por:

$$i_r(t) = \frac{i_{m1}(t) - i_{m2}(t) + i_{m3}(t) - i_{m4}(t)}{4}$$

donde $imk(t)$ ($1 \leq k \leq 4$) es el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k .

7. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que los residuos $ir\alpha(t)$ e $ir\beta(t)$ para una máquina de neutro aislado cuyo número de fases es superior a cuatro, $n > 4$, son determinados por:

$$\begin{cases} i_{r\alpha}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \cos \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \\ i_{r\beta}(t) = \frac{2}{n} \sum_{k=1}^n \sen \frac{4\pi(k-1)}{n} \cdot i_{mk}(t) \end{cases}$$

donde los residuos de índice α y β son señales ortogonales, siendo $imk(t)$ el valor instantáneo muestreado de la corriente correspondiente a la fase k .

8. Método de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 4, respectivamente 2 y 6, caracterizado por que para una máquina de tres fases con neutro conectado o fases independientes, respectivamente para una máquina de cuatro fases con neutro aislado, las señales de mando en tensión eléctrica para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + Ri_r(t) + L \frac{di_r(t)}{dt}$$

5 donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando primaria en tensión eléctrica producida por el regulador de par para la fase k,
- R es la resistencia de una fase de la máquina y
- L es la inductancia de una fase de la máquina.

10 9. Método de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 5, caracterizado por que en una máquina de cuatro fases con neutro conectado o fases independientes, las señales de tensión eléctrica para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$v_1^*(t) = v_1(t) + Ri_{r1} + L \frac{di_{r1}}{dt}$$

$$v_2^*(t) = v_2(t) + Ri_{r2} + L \frac{di_{r2}}{dt}$$

$$v_3^*(t) = v_3(t) + Ri_{r1} + L \frac{di_{r1}}{dt}$$

15

$$v_4^*(t) = v_4(t) + Ri_{r2} + L \frac{di_{r2}}{dt}$$

donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando primaria en tensión eléctrica producida por el regulador de par para la fase k,
- R la resistencia de una fase de la máquina y
- L la inductancia de una fase de la máquina.

20 10. Método de acuerdo con las reivindicaciones 2 y 7, caracterizado por que en una máquina de n fases, $n > 4$, de neutro aislado, las señales de mando para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$v_k^*(t) = v_k(t) + \cos\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)\left(Ri_{r\alpha}(t) + L \frac{di_{r\alpha}(t)}{dt}\right) + \sin\left((k-1)\frac{4\pi}{n}\right)\left(Ri_{r\beta}(t) + L \frac{di_{r\beta}(t)}{dt}\right)$$

donde

- $v_k(t)$ es la señal de mando primaria en tensión eléctrica producida por el regulador de par para la fase k,
- 25 - R la resistencia de una fase de la máquina y
- L la inductancia de una fase de la máquina.

11. Método de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado por que los residuos son determinados por:

$$\begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rm}(t) \end{pmatrix} = \mu_{n,c} \begin{pmatrix} 1 & -c_2 & -c_3 & \dots & -c_n \\ -c_n & 1 & -c_2 & \Lambda & -c_{n-1} \\ -c_{n-1} & -c_n & 1 & \dots & -c_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_2 & -c_3 & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{m1}(t) \\ i_{m2}(t) \\ i_{m3}(t) \\ \dots \\ i_{mn}(t) \end{pmatrix}$$

donde

- 30 - c_2 a c_n son coeficientes correctores que dependen del número de fases y del tipo de conexión de la máquina y

- $\mu_{n,c}$ es un coeficiente de ponderación que depende del número de fases (n) y del tipo de conexión de la máquina (c), y las señales de mando son determinadas por:

$$\begin{pmatrix} v_1^*(t) \\ v_2^*(t) \\ v_3^*(t) \\ \dots \\ v_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \\ \dots \\ v_n(t) \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_m(t) \end{pmatrix}$$

donde

- 5 - R es la resistencia de una fase de la máquina y
- L la inductancia de una fase de la máquina.

12. Método de acuerdo con una de las reivindicaciones 8 a 11, caracterizado por que la determinación de los términos de compensación $Ri_r(t) + L \frac{di_r(t)}{dt}$ es obtenida por un filtro de paso alto o por un observador.

- 10 13. Método de acuerdo con las reivindicaciones 3 y 4, respectivamente 3 y 6, caracterizado por que en una máquina de tres fases con neutro conectado o fase independientes, respectivamente en una máquina de cuatro fases de neutro aislado, las señales de mando para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$i_k^*(t) = i_k(t) i_r(t)$$

donde $i_k(t)$ es la consigna de corriente primaria.

- 15 14 Método de acuerdo con las reivindicaciones 3 y 5, caracterizado por que en una máquina de cuatro fases con neutro conectado o fases independientes, las señales de mando para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$i_1^*(t) = i_1(t) + i_{r1}(t)$$

$$i_2^*(t) = i_2(t) + i_{r2}(t)$$

$$i_3^*(t) = i_3(t) + i_{r1}(t)$$

- 20 $i_4^*(t) = i_4(t) + i_{r2}(t)$

donde $i_k(t)$ es la consigna de corriente primaria.

- 15. Método de acuerdo con las reivindicaciones 3 y 7, caracterizado por que en una máquina de n fases, $n > 4$, máquina con neutro aislado, las señales de mando para cada una de las fases ($1 \leq k \leq n$) son determinadas por:

$$i_k^*(t) = i_k(t) + \cos\left(\left(k-1\right)\frac{4\pi}{n}\right)i_{r\alpha}(t) + \sin\left(\left(k-1\right)\frac{4\pi}{n}\right)i_{r\beta}(t)$$

- 25 donde $i_k(t)$ es la consigna de corriente primaria.

16. Método de acuerdo con la reivindicación 3, caracterizado por que los residuos son determinados por:

$$\begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rm}(t) \end{pmatrix} = \mu_{n,c} \begin{pmatrix} 1 & -c_2 & -c_3 & \dots & -c_n \\ -c_n & 1 & -c_2 & \Lambda & -c_{n-1} \\ -c_{n-1} & -c_n & 1 & \dots & -c_{n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -c_2 & -c_3 & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{m1}(t) \\ i_{m2}(t) \\ i_{m3}(t) \\ \dots \\ i_{mn}(t) \end{pmatrix}$$

donde

- c_2 a c_n son coeficientes correctores que dependen del número de fases y del tipo de conexión de la máquina y
- μ_n, c es un coeficiente de ponderación que depende del número de fases n y del tipo de conexión de la máquina (c), y las señales de mando son determinadas por:

$$\begin{pmatrix} i_1^*(t) \\ i_2^*(t) \\ i_3^*(t) \\ \dots \\ i_n^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ \dots \\ i_n(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \\ \dots \\ i_{rm}(t) \end{pmatrix}$$

5 17. Dispositivo de generación de n , $n \geq 3$, señales de mando (i_k^* , v_k^*) utilizadas para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) de un inversor (3) de n fases a su vez destinado a ser conectado a una máquina eléctrica (1) que funciona con n fases, cuyo dispositivo está dispuesto para generar las señales de mando a partir de n señales primarias de mando (i_k , v_k) facilitadas y determinadas por un generador de consignas (5) que forma parte de un regulador de corriente (10) a partir de un par de referencia predeterminado, cuyo inversor está dispuesto para recibir las señales de conmutación de los interruptores a fin de hacer circular n corrientes eléctricas en la máquina para producir en la misma el par de referencia predeterminado, cuyo dispositivo comprende un circuito de muestreo dispuesto para muestrear durante cada uno de los ciclos de cálculo los valores instantáneos de las n corrientes y medidos con la ayuda de sensores en cada una de las citadas n fases de la máquina, caracterizado por que el citado dispositivo comprende igualmente un circuito de cálculo dispuesto para determinar residuos a partir de los n valores de corriente instantáneos muestreados y para a continuación determinar términos de compensación a partir de los residuos determinados y añadirles a las señales primarias de mando a fin de obtener las n señales de mando (i_k^* , v_k^*) para determinar las señales (a) de conmutación de los (4) interruptores destinados a mandar el inversor.

18. Dispositivo de accionamiento que comprende una máquina eléctrica (1) que funciona con n fases, $n \geq 3$, un inversor gobernado por señales de conmutación y un sistema de mando (7) que comprende un regulador de corriente (10) dispuesto para generar las señales de mando primarias facilitadas por un generador de consignas (5) a partir de un par de referencia predeterminado, cuyo sistema de mando está dispuesto para generar las señales de conmutación a partir de las señales primarias de mando y facilitar las señales de conmutación al inversor a fin de hacer circular n corrientes eléctricas en la máquina para producir en la misma el par de referencia predeterminado, cuyo dispositivo comprende un circuito de muestreo dispuesto para muestrear durante cada uno de los ciclos de cálculo los valores instantáneos de las n corrientes y medidos con la ayuda de sensores en cada una de las citadas n fases de la máquina, caracterizado por que el dispositivo comprende igualmente un circuito de cálculo dispuesto para determinar los residuos a partir de los n valores de corriente instantáneos muestreados y para determinar después términos de compensación a partir de los residuos determinados y añadirlos a las señales primarias de mando a fin de obtener las n señales de mando (i_k^* , v_k^*) para determinar las señales (a) de conmutación de los interruptores (4) destinados a mandar el inversor.

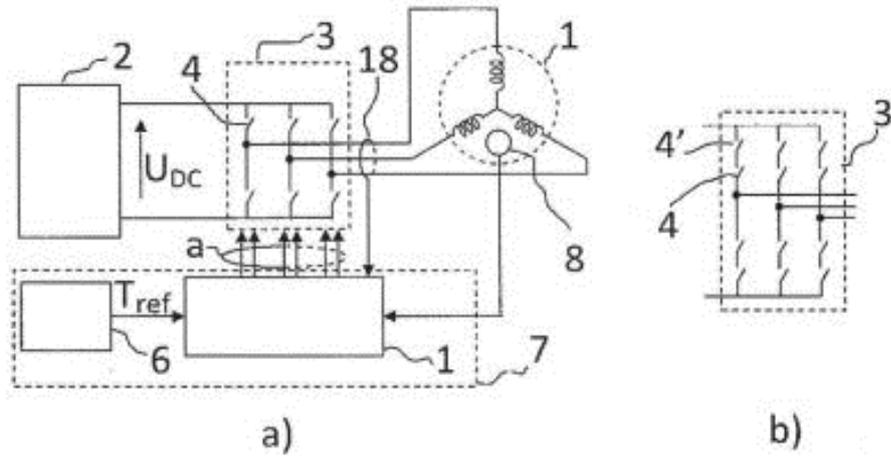


Figura 1

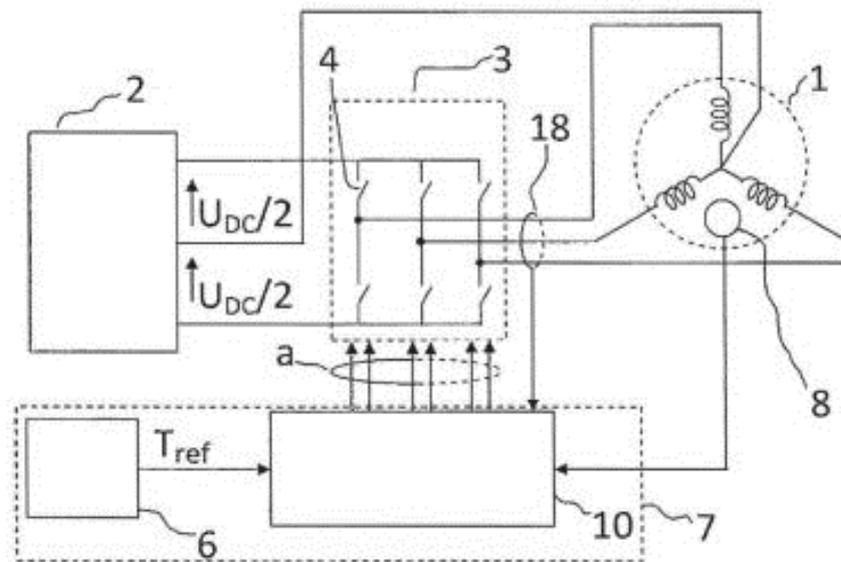


Figura 2

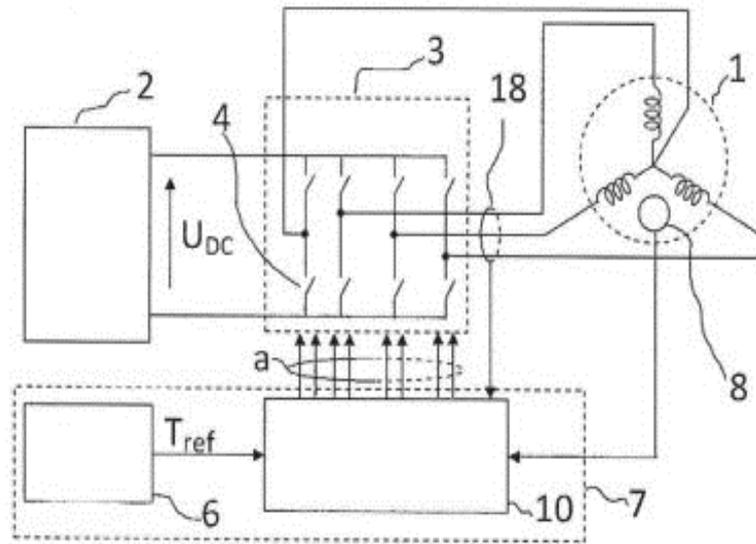


Figura 3

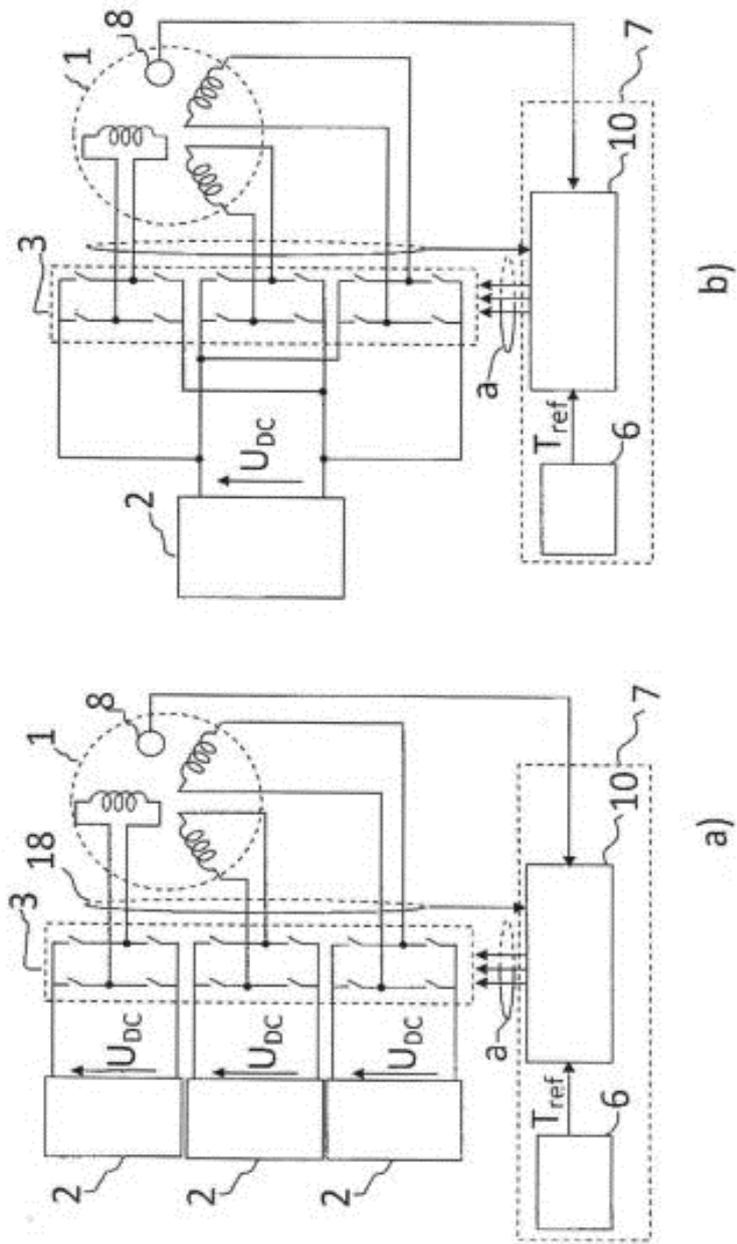


Figura 4

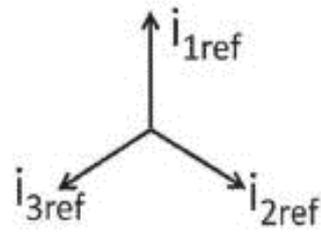


Figura 5

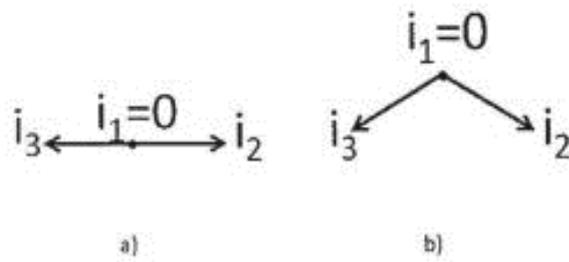
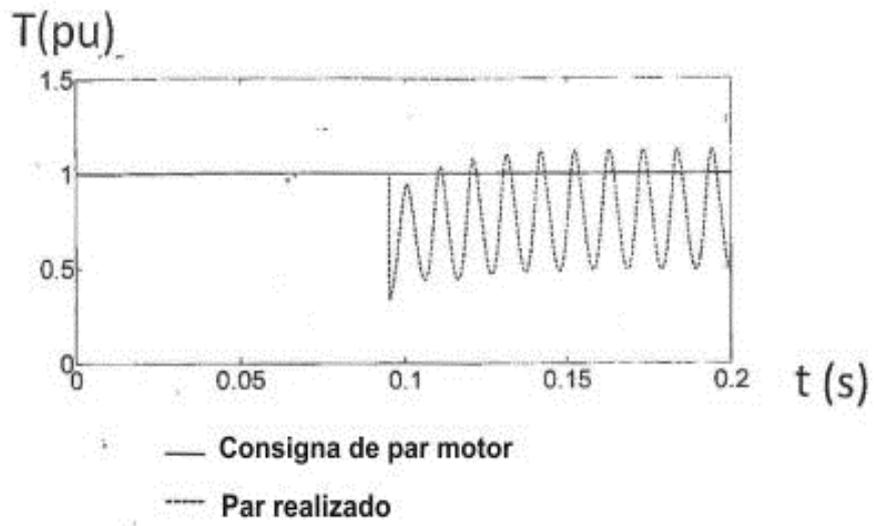
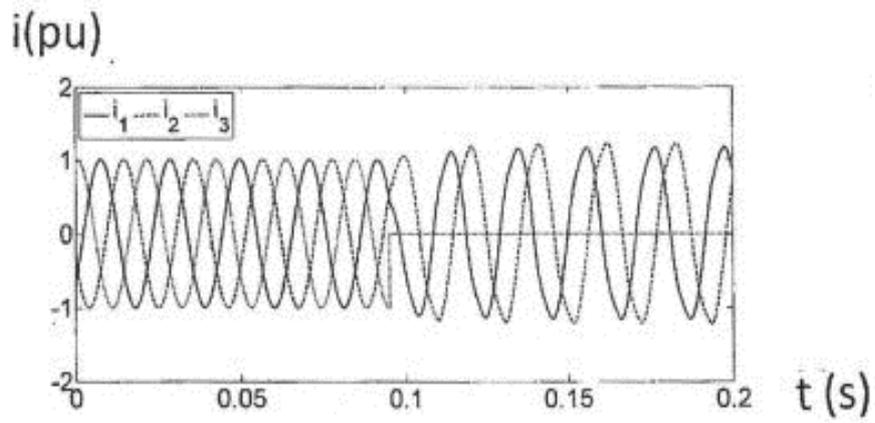


Figura 6



a)



b)

Figura 7

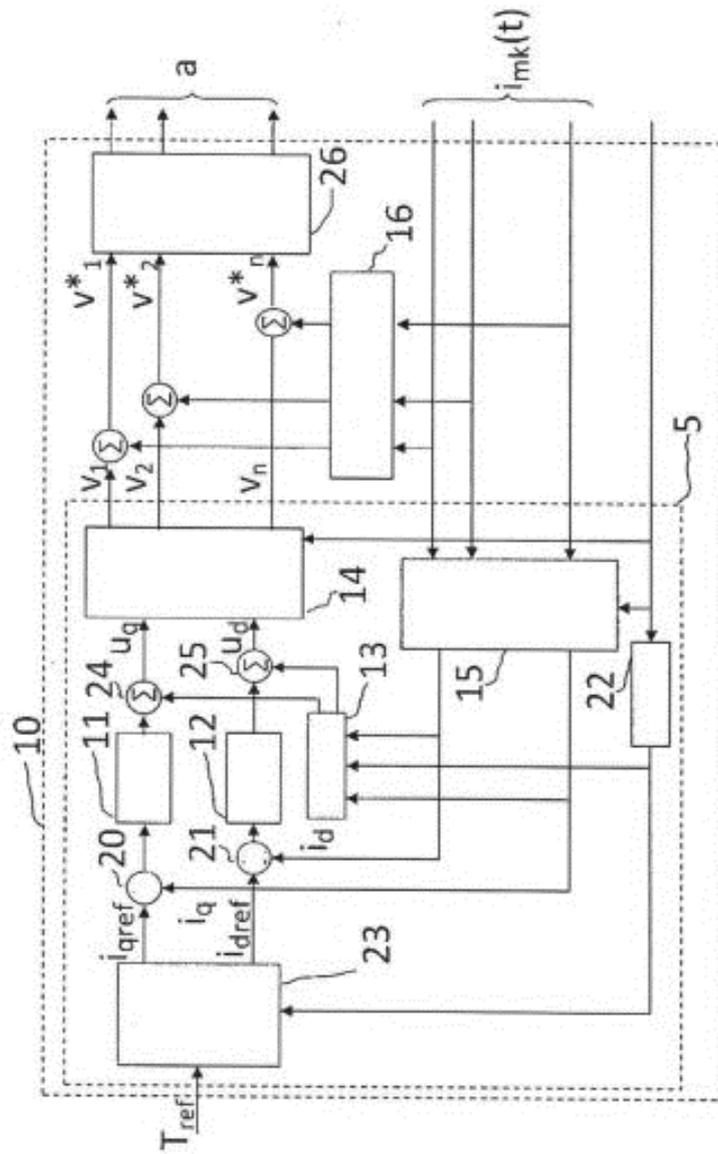


Figura 8

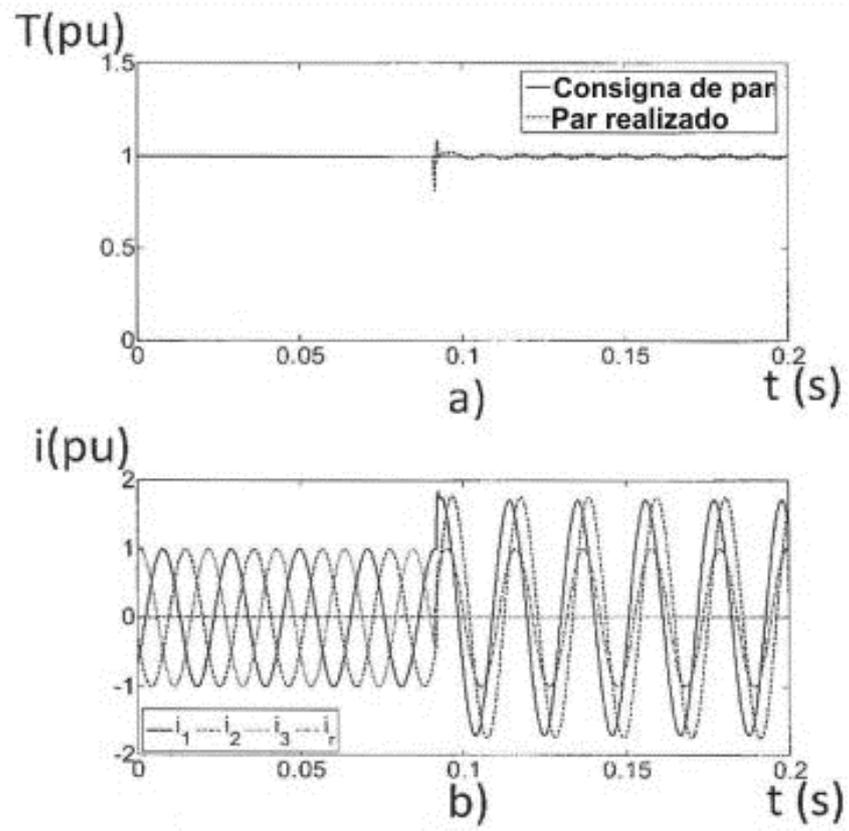


Figura 9

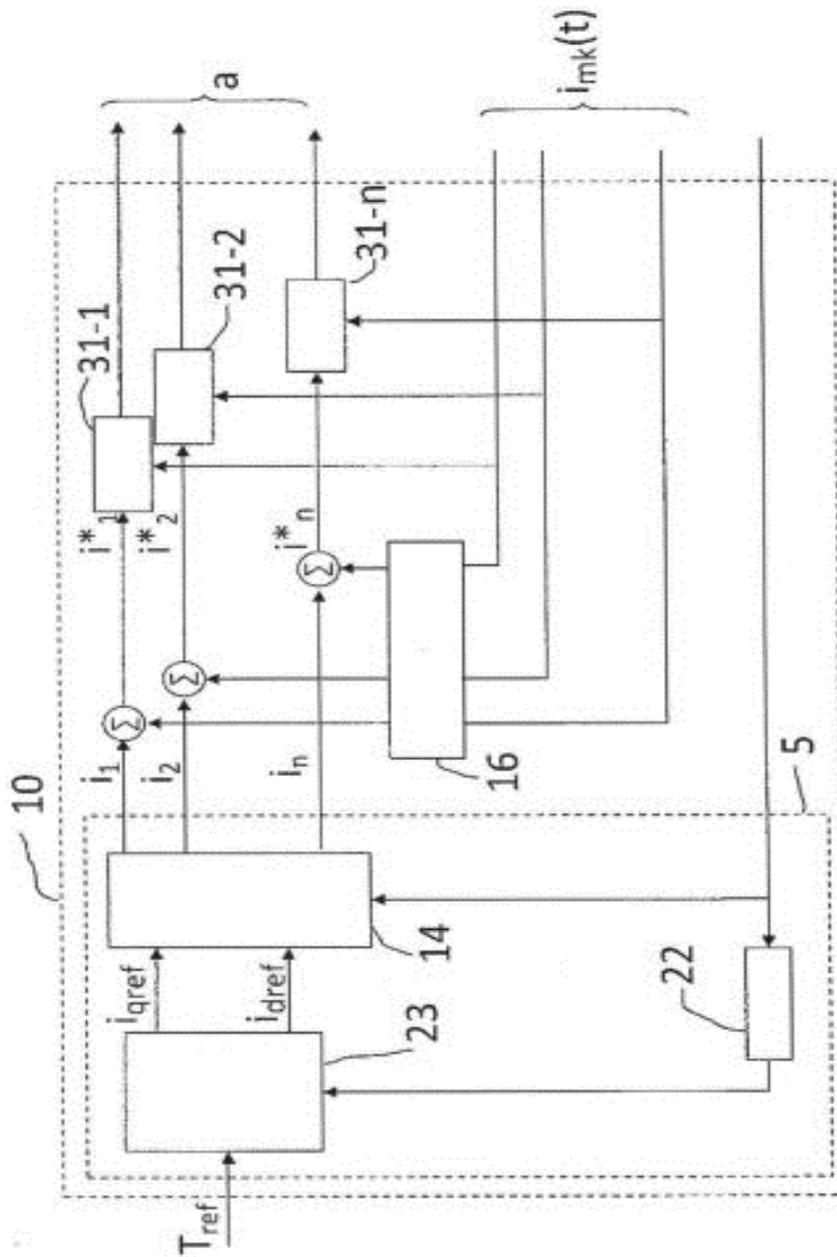


Figura 10

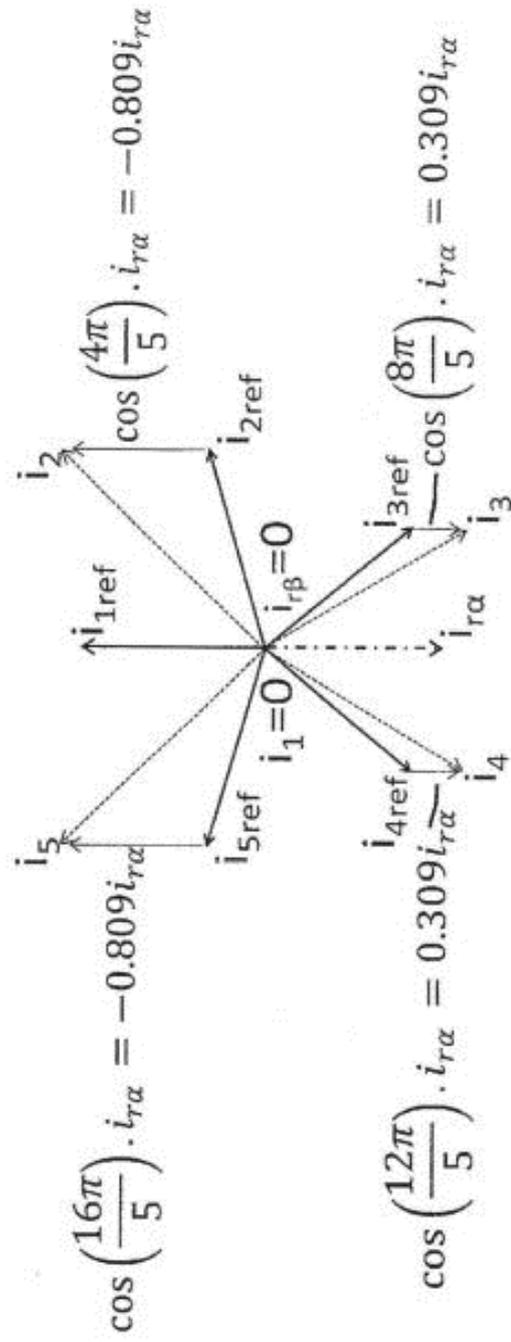


Figura 11