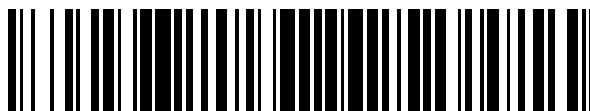


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 694 234**

51 Int. Cl.:

**H02P 6/185** (2006.01)

**H02P 27/08** (2006.01)

**H02P 6/18** (2006.01)

**H02P 21/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.06.2009 PCT/EP2009/057777**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.01.2010 WO10000640**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.06.2009 E 09772340 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.08.2018 EP 2294688**

54 Título: **Procedimiento de determinación de inductancias de una máquina síncrona con imanes permanentes**

30 Prioridad:

**01.07.2008 FR 0854427**

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

**19.12.2018**

73 Titular/es:

**SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS  
(100.0%)**

**33, rue André Blanchet  
27120 Pacy sur Eure, FR**

72 Inventor/es:

**BASIC, DUROC/O SCHNEIDER ELECTRIC  
INDUSTRIES SASSERVICE PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE;  
CAPITANEANU, STÉFAN y  
MALRAIT, FRANÇOIS**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 694 234 T3

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

**DESCRIPCIÓN**

Procedimiento de determinación de inductancias de una máquina síncrona con imanes permanentes

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para determinar inductancias de una máquina síncrona con imanes permanentes también llamada PMSM (del inglés "Permanent Magnet Synchronous Machine"). La invención también se refiere a un variador de velocidad adecuado para implementar dicho procedimiento.

10 De manera conocida, un variador de velocidad consta de un módulo rectificador que proporciona una tensión continua a partir de una red de alimentación alternativa exterior y un módulo ondulator (o interruptor chopper). Este módulo ondulator comprende componentes electrónicos de semiconductores de potencia para cortar la tensión continua en Modulación por Ancho de Impulsos (Pulse Width Modulation PWM, del inglés), para proporcionar en la salida mediante un cable de potencia una tensión eléctrica variable pulsada y una frecuencia de rotación variable a la máquina. Un dispositivo de control del variador controla la conducción y el bloqueo de los componentes semiconductores a la frecuencia de muestreo, para controlar la máquina en PWM con una tensión variable adecuada.

15 Las máquinas síncronas con imanes permanentes se usan cada vez más en la variación de velocidad debido a su simplicidad de construcción y su alta eficacia. Estas máquinas se pueden clasificar en dos grandes categorías: las máquinas dotadas de un rotor liso o cilíndrico y máquinas dotadas de un rotor sobresaliente. Para ambos tipos de máquina, es importante conocer las inductancias de flujo en el eje d y del par en el eje q para obtener un bucle de control y un modelo de referencia fiables y coherentes.

20 Se conoce a partir de las patentes US 6.498.452 y US 7.067.997 unos procedimientos para determinar la posición inicial del rotor de una máquina síncrona. Estos procedimientos se basan, en particular, en la medición de inductancias a lo largo de las direcciones de las fases.

25 Hay que tener en cuenta también el trabajo de Pr. M. Shroedl (por ejemplo, "Sensorless control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the "INFORM" Method", 31st Conférence Record of IEEE Industry Applications Conférence, IAS 1996., vol. 1, páginas 270 a 277, 6-10 de octubre de 1996). Los siguientes documentos forman parte del estado de la técnica de la presente solicitud: US6172498, US2007/070560, US2006/284582, NOBUYUKI MATSUI: "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives", PARASILITI F Y COL.: "Initial rotor position estimation method for PM motors", WO2004/023639, US2004/051495, US2002/060548. El objeto de la invención es proponer un procedimiento que permite determinar las inductancias de flujo y de par de una máquina síncrona con imanes permanentes.

30 Este objeto se consigue mediante un procedimiento de control implementado en un variador de velocidad para determinar las inductancias de flujo y de par de una máquina síncrona con imanes permanentes que consta de tres fases, cada una orientada según una dirección, un estator y un rotor, caracterizado porque dicho procedimiento comprende unas etapas de:

- 35 - aplicación según la dirección de cada fase de un vector de tensión (en sentido positivo y de un vector de tensión en el sentido negativo durante una duración determinada,
- medición de una respuesta en corriente en cada fase después de aplicar los vectores de tensiones en los dos sentidos, constanding la respuesta en corriente para cada fase de un pico positivo y un pico negativo,
- determinación de un ángulo de posición del rotor con respecto al estator a partir de las asimetrías entre los picos positivos y los picos negativos de las respuestas en corriente medidas en todas las fases,
- 40 - determinación de las inductancias de flujo y par de la máquina en función del ángulo determinado.

El procedimiento de la invención es aplicable independientemente del tipo de rotor empleado (liso o sobresaliente) e independientemente del tipo de prominencia ( $L_d > L_q$  o  $L_d = L_q$  o  $L_d < L_q$ ).

Según una particularidad, para cada fase, el vector de tensión aplicado en el sentido positivo y el vector de tensión aplicado en el sentido negativo tienen un mismo estándar.

45 Según otra particularidad, para una fase, la aplicación del vector de tensión en el sentido positivo y el vector de tensión en el sentido negativo consiste en aplicar una secuencia de tensión que consta de un nicho positivo de tensión de un ancho de impulso determinado, seguido por un nicho de tensión negativo que tiene el doble del ancho de impulso determinado, seguido por un nicho positivo de tensión del ancho de impulso determinado.

50 Según otra particularidad, la respuesta actual en la fase consta de un pico en corriente positiva y un pico de corriente negativa y el procedimiento consiste en recuperar para cada fase y al mismo tiempo, dos valores de corriente distintos en el pico de corriente positiva, en su fase de crecimiento y dos valores de corriente distintos en el pico de corriente negativa, en su fase de disminución.

Más específicamente, el procedimiento consiste en determinar los siguientes valores:

5

$$\Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

El ángulo se determina a partir de las siguientes relaciones:

$$\Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3} \text{ et } \theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$$

Las inductancias de flujo y par de la máquina se determinan a partir de las siguientes relaciones:

10

$$\Delta I_{ave} = \frac{1}{3}(\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

$$\Delta I_{var} = \frac{2}{3}(\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta_r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta_r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta_r + 4\pi/3))$$

$$\Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

$$\Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

$$L_d = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_d}$$

$$L_q = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_q}$$

15

La invención también se refiere a un variador de velocidad que comprende un ondulador de tipo PWM para proporcionar una tensión pulsada a una máquina síncrona trifásica con imanes permanentes, implementando dicho variador el procedimiento descrito anteriormente.

20

Otras características y ventajas se pondrán de manifiesto en la siguiente descripción detallada, hecha con referencia a un modo de realización aportado a título de ejemplo y representado por los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 representa de manera simplificada un ondulador de tipo PWM que alimenta una máquina eléctrica síncrona trifásica con imanes permanentes,
- las figuras 2A y 2B representan respectivamente las combinaciones de apertura/cierre de los interruptores del

módulo ondulator para obtener respectivamente un vector de tensión V1 después de la fase a y un vector de tensión V4 después de esta misma fase a,

- la figura 3 representa de manera vectorial, las tensiones aplicadas según las direcciones de cada fase de la máquina,
- 5 - la figura 4 representa la secuencia de tensión aplicada para la fase a y la respuesta en corriente obtenida en la fase a,
- la figura 5 es una representación de manera vectorial de las respuestas en corriente obtenidas para cada fase después de la aplicación en cada fase de los vectores de tensiones representados en la figura 3.

10 Con referencia al diagrama simplificado de la figura 1, un variador de velocidad destinado a controlar una máquina M trifásica síncrona con imanes permanentes comprende un módulo rectificador (no representado) generalmente compuesto de un puente de diodos, proporcionando una tensión continua en un bus continuo de alimentación de potencia. El bus continuo consta de una línea 20 positiva y una línea 21 negativa, estando un condensador de bus (no representado) conectado entre la línea 20 positiva y la línea 21 negativa del bus continuo. El bus continuo alimenta un módulo 1 ondulator conectado a la máquina M mediante un cable 3 de potencia que alimenta las tres fases a, b, c de la máquina orientadas según tres direcciones, cada una compensada por 120°. Para cada fase a, b, c de la máquina M, el módulo 1 ondulator comprende dos interruptores 11, 12 electrónicos semiconductores de potencia, de tipo IGBT u otros (representados en la figura 1 como interruptores simples para simplificar el dibujo), que permiten generar una tensión variable en la máquina a partir de la tensión continua Vdc del bus. El variador también consta, además, de medios de control, de procesamiento y memorización para implementar sus diferentes funciones.

20 El procedimiento de la invención es aplicable a máquinas síncronas con imanes permanentes dotadas de un rotor liso o de un rotor sobresaliente.

25 El principio de la invención es aplicar para cada fase, una tras otra, siguiendo cada dirección de las fases, un vector de tensión en el sentido positivo y un vector de tensión en el sentido negativo. Por lo tanto, se aplican dos vectores de tensión para cada fase a, b, c. Por vector de tensión, se entiende un vector cuyo resultado se deriva de las diferentes tensiones aplicadas a las tres fases. Las figuras 2A y 2B muestran una combinación de accionamiento de los interruptores de cada fase que permite, respectivamente, obtener un vector de tensión positiva V1 según la dirección de la fase a y un vector de tensión negativa V4 según esta misma dirección. Para cada fase, el vector de tensión positiva y el vector de tensión negativa aplicados son preferentemente del mismo estándar para no crear un movimiento del rotor. El estándar de cada vector de tensión Vi aplicado depende de la tensión Vdc del bus continuo y es, por ejemplo, 2/3 de la tensión Vdc.

$$V_i = 2/3 V_{dc}$$

Con referencia a la figura 3, los vectores de tensión V1, V2, V3, V4, V5 y V6 se aplican, por lo tanto, según las direcciones de las fases a, b, c en los sentidos positivo y negativo.

35 Para una fase (la fase a), la secuencia de tensión que permite obtener un vector de tensión positiva y un vector de tensión negativa según la dirección de la fase se muestra en la figura 4. Esta secuencia de tensión consiste en aplicar, gracias al módulo 1 ondulator, una tensión entre la fase estudiada y las otras dos fases y consta de un primer nicho de tensión positiva de un ancho de impulso Tp determinado, seguido por un nicho de tensión negativo que tiene el doble del ancho de impulso Tp determinado, seguido por un nicho positivo de tensión del ancho de impulso Tp determinado. Esta secuencia de tensión se optimiza para no generar un par en la máquina y, por lo tanto, no provocar el movimiento del rotor.

El ancho de impulso Tp empleado puede determinarse escaneando diferentes anchos de impulso hasta obtener un pico de corriente que tiene un valor lo suficientemente alto como para causar un efecto de saturación detectable.

45 Según la invención, la respuesta en corriente obtenida en la fase estudiada se analiza para extraer varios valores. Como se representa en la figura 4, para una secuencia de tensión tal como se definió anteriormente, la respuesta en corriente obtenida presenta sucesivamente un pico positivo y un pico negativo.

50 El análisis de la respuesta en corriente consiste en recuperar cuatro valores de corriente para cada fase con ayuda de un circuito de muestreo específico. Con referencia a la figura 4, se recuperan dos valores de corriente en la fase de crecimiento del pico de corriente positiva y se recuperan dos valores de corriente en la fase de disminución del pico de corriente negativa. Los valores se recuperan al mismo tiempo para todas las fases, el intervalo de tiempo Δt entre dos mediciones en el sentido negativo o en el sentido positivo es siempre idéntico. Para el primer impulso de tensión positiva, el primer valor Ia1+ se recupera, por ejemplo, en un tercio del ancho del impulso (en t1 en la figura 4) mientras que el segundo valor Ia2+ se recupera hacia el final del impulso de tensión (en t2 en la figura 4).

Como se representa en la figura 5, para la fase a se recupera, por lo tanto, para el pico positivo, en t1, el valor Ia1+ y

en t2, el valor  $I_{a2+}$  y para el pico negativo, en t3, el valor  $I_{a1-}$  y en t4, el valor  $I_{a2-}$ . Las mismas mediciones se efectúan al mismo tiempo para cada una de las respuestas en corrientes de las otras fases. De este modo, se obtiene para la fase b, los valores  $I_{b2+}$ ,  $I_{b1+}$ ,  $I_{b2-}$ ,  $I_{b1-}$  y para la fase c, los valores  $I_{c2+}$ ,  $I_{c1+}$ ,  $I_{c2-}$ ,  $I_{c1-}$ .

5 A continuación, de estos valores de corriente, se trata de determinar para cada fase las variaciones de corriente en las direcciones negativa y positiva. Se obtiene, entonces

$$\delta I_{a+} = |I_{a2+}| - |I_{a1+}|$$

$$\delta I_{a-} = |I_{a2-}| - |I_{a1-}|$$

$$\delta I_{b+} = |I_{b2+}| - |I_{b1+}|$$

$$\delta I_{b-} = |I_{b2-}| - |I_{b1-}|$$

10

$$\delta I_{c+} = |I_{c2+}| - |I_{c1+}|$$

$$\delta I_{c-} = |I_{c2-}| - |I_{c1-}|$$

Los vectores correspondientes están representados en la figura 5.

15 Aunque las tensiones aplicadas a cada fase en el sentido positivo y en el sentido negativo son idénticos, los valores de corrientes obtenidos para la misma fase no son simétricos debido al efecto de saturación magnética del motor. De hecho, las respuestas en corriente a los impulsos de tensión aplicados a cada fase dependen de la posición del rotor. Con el fin de tener en cuenta el efecto de saturación magnética, se calculan, por lo tanto, para cada fase, el promedio de las variaciones en los sentidos positivo y negativo y la diferencia entre las variaciones en los sentidos positivo y negativo, es decir:

$$\Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

20

$$\Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

25 El vector resultante de las diferencias presentadas anteriormente se define de la siguiente manera:

$$\Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3}$$

El vector de diferencia  $\Delta I_{diff}$  está orientado según una dirección en la que la saturación magnética es la más pronunciada, es decir, según el eje d sobre el que está posicionado el rotor. En consecuencia, la posición del rotor definida por el ángulo  $\theta_r$  puede deducirse directamente del vector  $\Delta I_{diff}$ , de manera que:

$$\theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$$

5 No obstante, el objeto de la invención no es determinar la posición del rotor, sino las inductancias de flujo  $L_d$  y del par  $L_q$ . Para ello, el procedimiento de la invención usa los promedios  $\Delta I_{a_{ave}}$ ,  $\Delta I_{b_{ave}}$ ,  $\Delta I_{c_{ave}}$  calculada para cada fase en ambos sentidos. A partir de los promedios de las corrientes obtenidas para cada fase en ambos sentidos, esto permite promediar el efecto de saturación que es diferente según si la corriente está orientada según una dirección negativa o según una dirección positiva.

Por otra parte, se sabe que las corrientes determinadas para cada fase constan de un componente constante y un componente variable dependiente del coseno del doble del ángulo  $\theta_r$  definido anteriormente. El componente constante es:

$$10 \quad \Delta I_{ave} = \frac{1}{3}(\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

Según el modelo estándar de alta frecuencia de una máquina síncrona, la amplitud del componente variable  $\Delta I_{var}$  puede determinarse después de la demodulación de los promedios.

$$\Delta I_{var} = \frac{2}{3}(\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta_r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta_r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta_r + 4\pi/3))$$

15 A partir del componente constante  $\Delta I_{ave}$  y el componente variable  $\Delta I_{var}$ , es posible determinar los valores máximos y mínimos de corriente que se deberían obtener cuando los vectores de tensiones se aplican según los ejes d de flujo y q de par del rotor. Se obtiene, entonces:

$$\Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

$$\Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

Las inductancias  $L_d$ ,  $L_q$  se deducen, entonces, de las siguientes relaciones

$$20 \quad L_d = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_d}$$

$$L_q = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_q}$$

Con  $V_{dc}$ , que es la tensión del bus continuo y  $\Delta t$  el tiempo medido entre dos mediciones de corriente en el pico positivo o en el pico negativo.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de control implementado en un variador de velocidad para determinar las inductancias de flujo y de par (Ld, Lq) de una máquina síncrona con imanes permanentes que consta de tres fases (a, b, c) cada una orientada según una dirección, un estator y un rotor, **caracterizado porque** dicho procedimiento comprende unas etapas de:

- 5 - aplicación según la dirección de cada fase (a, b, c) de un vector de tensión (V1, V3, V5) en el sentido positivo y un vector de tensión (V2, V4, V6) en el sentido negativo durante una duración determinada, para una fase, consistiendo la aplicación del vector de tensión en el sentido positivo y el vector de tensión en el sentido negativo en aplicar una secuencia de tensión que consta de un nicho positivo de tensión de un ancho de impulso (Tp) determinado, seguido por un nicho de tensión negativo que tiene el doble del ancho de impulso (Tp) determinado,
- 10 - medición de una respuesta en corriente en cada fase después de aplicar los vectores de tensiones en los dos sentidos, constando la respuesta en corriente para cada fase de un pico positivo y un pico negativo,
- recuperación para cada fase y, al mismo tiempo, de dos valores de corriente distintos (Ia1+, Ia2+, Ib1+, Ib2+, Ic1+, Ic2+) en el pico de corriente positiva, en su fase de crecimiento y dos valores de corriente distintos (Ia1-, Ia2-, Ib1-, Ib2-, Ic1-, Ic2-) en el pico de corriente negativa, en su fase de disminución,
- 15 - determinación de los siguientes valores:

$$\Delta I_{a_{ave}} = \frac{|\delta I_{a+}| + |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{a_{diff}} = \frac{|\delta I_{a+}| - |\delta I_{a-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{ave}} = \frac{|\delta I_{b+}| + |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{b_{diff}} = \frac{|\delta I_{b+}| - |\delta I_{b-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{ave}} = \frac{|\delta I_{c+}| + |\delta I_{c-}|}{2}$$

$$\Delta I_{c_{diff}} = \frac{|\delta I_{c+}| - |\delta I_{c-}|}{2}$$

en los que  $\delta I_{a+}$ ,  $\delta I_{a-}$ ,  $\delta I_{b+}$ ,  $\delta I_{b-}$ ,  $\delta I_{c+}$ ,  $\delta I_{c-}$  representan para cada fase las variaciones de corriente calculadas a partir de los valores de corriente recuperados en el pico de corriente positiva y en el pico de corriente negativa obtenidos.

- determinación de un ángulo ( $\theta_r$ ) de posición del rotor con respecto al estator a partir de la siguiente relación:  
 -  $\Delta I_{diff} = \Delta I_{a_{diff}} + \Delta I_{b_{diff}} e^{j2\pi/3} + \Delta I_{c_{diff}} e^{j4\pi/3}$  y  $\theta_r = \arctan(\Delta I_{diff})$   
 - determinación de las inductancias de flujo (Ld) y de par (Lq) de la máquina en función del ángulo ( $\theta_r$ ) determinado.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque**, para cada fase (a, b, c), el vector de tensión aplicado en el sentido positivo y el vector de tensión aplicado en el sentido negativo tienen un mismo estándar.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado porque** las inductancias de flujo y par de la máquina se determinan a partir de las siguientes relaciones:

$$\Delta I_{ave} = \frac{1}{3} (\Delta I_{a_{ave}} + \Delta I_{b_{ave}} + \Delta I_{c_{ave}})$$

$$\Delta I_{var} = \frac{2}{3} (\Delta I_{a_{ave}} \cos(2\theta_r) + \Delta I_{b_{ave}} \cos(2\theta_r + 2\pi/3) + \Delta I_{c_{ave}} \cos(2\theta_r + 4\pi/3))$$

$$\Delta I_d = \Delta I_{ave} + \Delta I_{var}$$

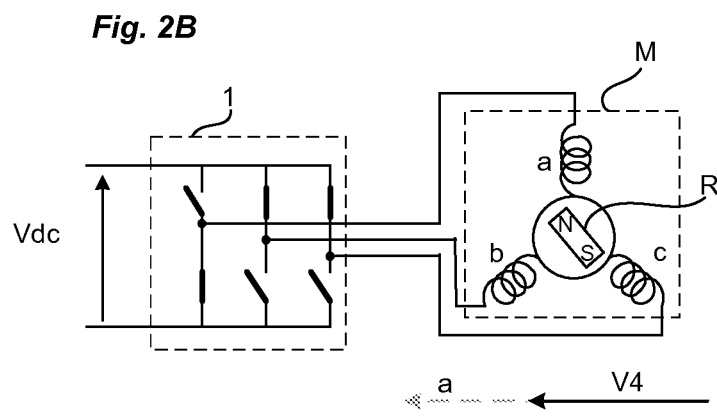
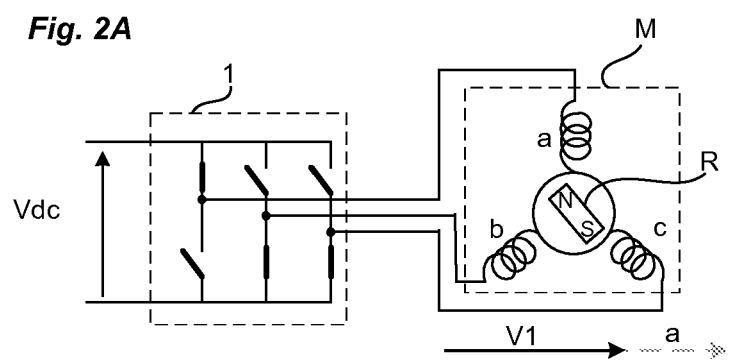
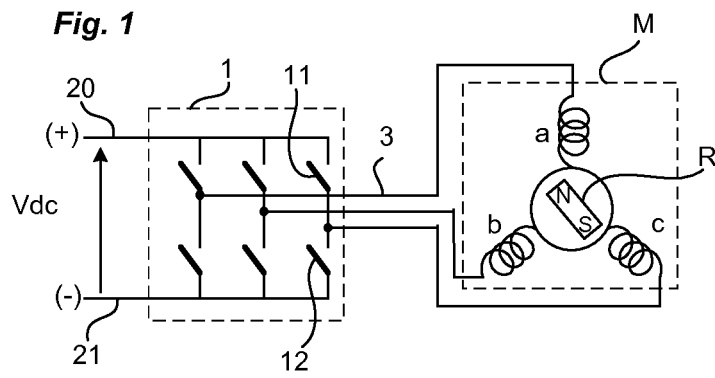
$$\Delta I_q = \Delta I_{ave} - \Delta I_{var}$$

$$L_d = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_d}$$

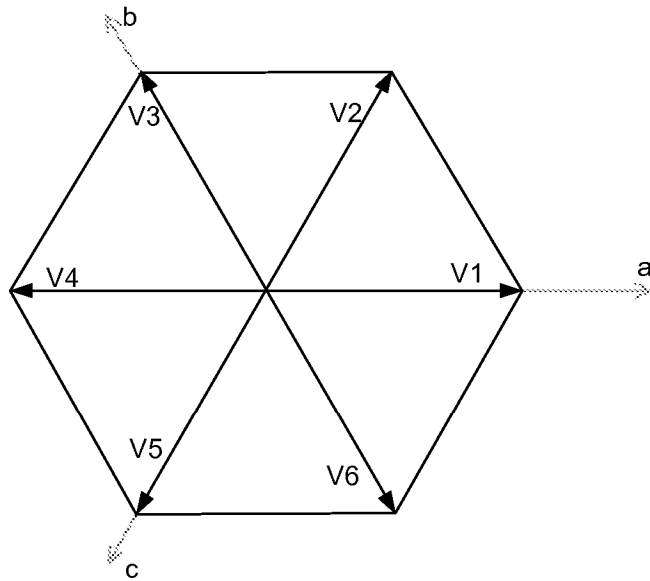
$$L_q = \frac{2/3V_{dc}\Delta t}{\Delta I_q}$$

- 5 4. Variador de velocidad que comprende un ondulator de tipo PWM para proporcionar una tensión pulsada a una máquina síncrona trifásica con imanes permanentes, **caracterizado porque** implementa el procedimiento definido en una de las reivindicaciones 1 a 3.

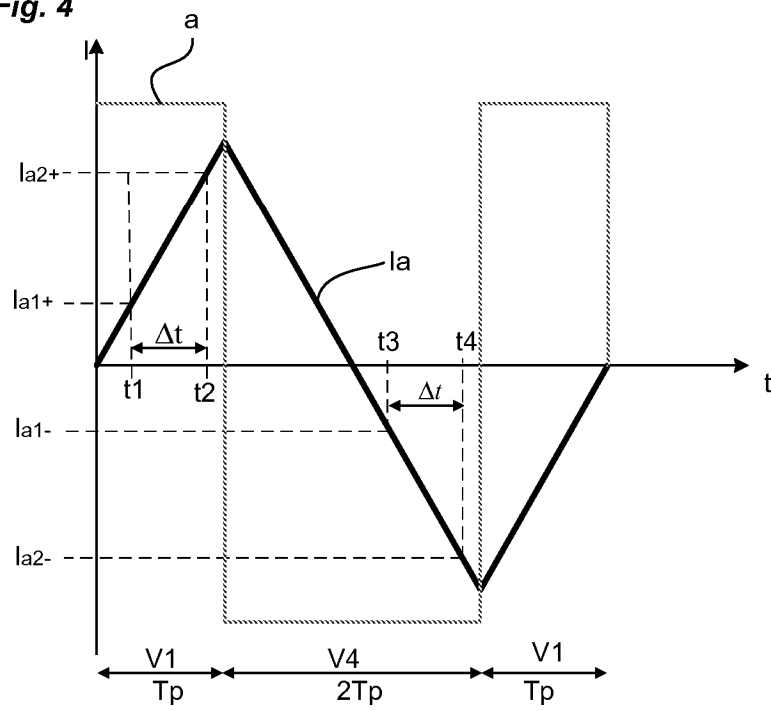




**Fig. 3**



**Fig. 4**



**Fig. 5**

