

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 219**

51 Int. Cl.:

H02P 21/00 (2006.01)

H02P 21/06 (2006.01)

H02P 25/02 (2006.01)

H02M 7/538 (2007.01)

H02P 6/10 (2006.01)

H02M 5/458 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.07.2009 E 09165817 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **19.01.2011 EP 2276162**

54 Título: **Método y sistema para controlar un motor eléctrico sin escobillas**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.02.2013

73 Titular/es:

**EBM-PAPST MULFINGEN GMBH & CO. KG
(100.0%)
Bachmühle 2
74673 Mulfingen, DE**

72 Inventor/es:

**WYSTUP, RALPH y
LIPP, HELMUT**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 395 219 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 sistema para controlar un motor eléctrico sin escobillas

5 La presente invención se refiere en primer lugar, según el concepto general de la reivindicación 1, a un método para controlar un motor sincrónico de imán permanente, sin escobillas y de conmutación electrónica, especialmente un motor sincrónico trifásico, en que una corriente alterna monofásica con una frecuencia de red se rectifica y, como tensión de circuito intermedio con una pulsación igual al doble de la frecuencia de red, se dirige mediante un circuito intermedio delgado, que no contiene ninguna o solo una mínima reactancia, a un convertidor controlado para la alimentación y la conmutación del motor eléctrico, donde el control se efectúa mediante una regulación del fasor espacial de tensión (regulación vectorial) por campo orientado en el sistema cartesiano de coordenadas fijado en el rotor, donde una corriente q se regula perpendicularmente al campo magnético permanente, como componente del fasor espacial de tensión que forma el momento de giro, y una corriente d puede regularse en la dirección del campo magnético permanente, como componente del fasor espacial de tensión que influye en el campo.

15 Además la presente invención también se refiere, según el concepto general de la reivindicación 7, a un sistema de control correspondiente, en concreto mediante el uso del método de la presente invención, con un rectificador de red, un circuito intermedio delgado conectado en serie, que no contiene ninguna o solo una mínima reactancia, así como un convertidor que se alimenta por el circuito intermedio y se puede controlar para conmutar el motor eléctrico, y que está dotado de medios para regular el fasor espacial de tensión por campo orientado, con un regulador del número de revoluciones para establecer una corriente q como componente del fasor espacial de tensión que forma el momento de giro.

20 Los motores de conmutación electrónica, llamados motores EC, suelen emplearse para accionar el ventilador. Estos accionamientos constan generalmente de un motor sincrónico de imán permanente (PMSM) con electrónica de potencia y señalización integrada. En este caso se trata frecuentemente de motores de rotor externo.

25 Estos motores eléctricos se pueden accionar con una corriente alterna de red, monofásica o trifásica, rectificando primero la corriente alterna de red en la tensión de un circuito intermedio que después, mediante un convertidor controlado, se transforma en un voltaje operativo para la alimentación y la conmutación del motor. El convertidor se controla generalmente mediante una regulación de fasor espacial de tensión por campo orientado, ajustando una corriente q - como componente del fasor espacial de tensión que forma el momento de giro - perpendicularmente al campo magnético permanente, a fin de alcanzar un momento máximo de giro. Una corriente d , que se puede regular en la dirección del campo magnético permanente, forma un componente del fasor espacial de tensión que influye en el campo, es decir generándolo o debilitándolo según el sentido de la corriente. Habitualmente, en los motores sincrónicos la corriente d se ajusta a cero para lograr un rendimiento óptimo.

30 Para conseguir un momento de giro del motor lo más uniforme y constante posible con un mínimo de ondulación (la ondulación del momento de giro en el entrehierro, es decir, del momento interno del motor) y por tanto un buen comportamiento acústico (sobre todo en accionamientos de ventilador), la tensión continua del circuito intermedio debería ser lo más constante posible. Para ello, hasta la fecha, la tensión continua rectificada por un convertidor de red y fuertemente pulsante se nivelaba mediante al menos un condensador de alisado y además ocasionalmente con una inductancia oscilante. Para ello el condensador de alisado debe tener realmente una capacidad bastante grande (p.ej. varios cientos de μF), por lo cual solían usarse condensadores electrolíticos (Elkos). Sin embargo tienen en la práctica estos condensadores tienen desventajas, sobre todo un gran volumen y una baja duración.

35 Por tanto hoy en día se tiende cada vez más a prescindir totalmente de condensadores de alisado o, al menos, de condensadores electrolíticos, de manera que en el segundo caso se emplean condensadores de plástico de larga duración, de menor capacidad (solo hasta algunos μF). Debido a la ausencia o a la poca (mínima) presencia de reactancias se habla de un "circuito intermedio delgado", lo cual permite renunciar totalmente o en gran parte a un desacoplamiento del lado de la red y del motor mediante elementos de almacenamiento tales como condensadores y bobinas (reactancias). Esto significa que un circuito intermedio delgado no contiene ninguna o solo una mínima reactancia.

40 Con esta tecnología del "circuito intermedio delgado" surgen ciertos problemas, sobre todo en la alimentación por la red monofásica (cuya frecuencia usual es p.ej. de 50 Hz), porque la tensión continua rectificada tiene una fuerte pulsación, igual al doble de la frecuencia de la red (p.ej. 100 Hz), y su curso corresponde al módulo de la tensión alterna sinusoidal de la red. Si un motor EC (PMSM) se alimentara directamente con tal tensión continua fuertemente pulsante, por debajo de una determinada tensión límite solo llegaría al bobinado del motor una corriente demasiado pequeña para poder mantener constante el momento de giro necesario.

45 La reducción del condensador del circuito intermedio y de la ondulación del momento de giro es objeto de varias patentes, p.ej. EP2039605, JP 2002051589, JP10248300. La presente invención tiene por objeto optimizar de modo técnicamente ventajoso y con medios sencillos, económicamente factibles, el funcionamiento de un motor eléctrico de conmutación electrónica (motor EC) con "circuito intermedio".

En la presente invención esto se consigue mediante un método según la reivindicación 1. La reivindicación 7 tiene por objeto un sistema de control adecuado para el uso del método. Las reivindicaciones secundarias y la siguiente descripción contienen formas de ejecución ventajosas de la presente invención.

5 Así pues, según la presente invención, tiene lugar un debilitamiento dinámico del campo, estableciendo la corriente d en la zona negativa con un desarrollo sinusoidal y el doble de frecuencia de la red y regulando la corriente d según su desfase (respecto a la frecuencia de red) y su amplitud en función de la corriente q , de manera que se minimice la ondulación de la corriente q . Puesto que la corriente d - como componente que forma el momento de giro - es proporcional al mismo, la ondulación del momento de giro (ondulación del momento de giro en el entrehierro = momento interno del motor) también se minimiza.

15 La presente invención está basada en el conocimiento de que, en un caso ideal, la corriente d debería regularse dinámicamente para que el fasor espacial de tensión siempre se reponga en el sistema de coordenadas fijado en el rotor, de modo que en dicho sistema el fasor espacial de tensión (correspondiente a las amplitudes de las tensiones de fase) tenga la mayor longitud posible al formarse la tensión pulsante del circuito intermedio (reposición de la tensión de fase). La parte de corriente q que forma el momento de giro permanece constante. Sin embargo, para ello haría falta una resolución exacta de una ecuación diferencial y una implementación técnica correspondiente. Pero en la presente invención se logra que, al variar temporalmente la corriente d , se reponga la tensión de fase mediante la evolución temporal de la tensión del circuito intermedio, con lo cual las tensiones de fase del motor resultantes aún pueden generarse con suficiente aproximación a partir de la tensión pulsante del circuito intermedio. Una corriente d negativa produce un debilitamiento del campo, cuya consecuencia es que el motor puede accionarse con una menor tensión en los bornes y, por lo tanto con una menor tensión del circuito intermedio, y no obstante alcanza luego su rendimiento nominal (momento de giro nominal, número nominal de revoluciones) con un consumo de corriente más elevado. Así pues, a pesar de la tensión pulsante del circuito intermedio y también de los menores voltajes, inferiores a la tensión límite determinada, debido al debilitamiento del campo, el motor se puede mantener en marcha con un momento de giro casi constante. Asimismo, el debilitamiento dinámico del campo produce un almacenamiento dinámico de energía en las inductancias del motor y con ello una recuperación energética en el circuito intermedio, así como un alisado de la tensión de fase. Se trata prácticamente de un "efecto convertidor elevador" mediante el que se aumenta adicionalmente la tensión del circuito intermedio y se sigue reduciendo la ondulación del momento de giro.

25 Para completar, debe observarse que a partir de la tensión momentánea del circuito intermedio siempre se puede generar un fasor espacial de tensión, cuya longitud es como máximo la mitad de la tensión del circuito intermedio. Las amplitudes de las tres tensiones de fase en el sistema de coordenadas fijado al rotor corresponden a la longitud del fasor espacial de tensión en dicho sistema de coordenadas. Las tensiones de fase se forman sobre la base del fasor espacial de tensión, mediante una transformación con la ayuda de la modulación por ancho de pulsos (PWM) de la tensión del circuito intermedio. Aquí, la amplitud máxima posible de las tensiones de fase corresponde a la mitad de la tensión del circuito intermedio.

35 Una alta conductividad del motor favorece la recuperación de tensión mediante la modulación por la corriente d . Además contribuye al alisado de las corrientes del motor y por tanto a mantener constante el momento de giro, lo cual tiene el siguiente fundamento: el debilitamiento dinámico del campo permite accionar el motor hasta una mínima tensión de fase, y por tanto del circuito intermedio, sin que caiga el momento de giro. La recuperación de energía a través de la modulación por la corriente d aumenta la tensión del circuito intermedio "efecto convertidor elevador", pero no siempre hasta la tensión mínima alcanzable con el debilitamiento del campo. La diferencia de potencial remanente hace caer brevemente (pulsas) la corriente de fase, provocando oscilaciones del momento de giro. Una gran conductividad del motor - que debe existir de todos modos como consecuencia de la disminución de la tensión por el debilitamiento dinámico del campo - alisa el curso pulsante de la corriente como cualquier inductancia alisa un perfil de corriente (almacenamiento de energía) y facilita que el flujo de corriente se mantenga prácticamente constante. De la fórmula de la ecuación diferencial que da la solución exacta del perfil de la corriente d en función de la tensión del circuito intermedio se deduce que: mediante el debilitamiento dinámico del campo, la tensión de fase y con ella, tal como se ha dicho, la tensión del circuito intermedio, se puede aminorar más de lo que sería posible (a igual valor máximo de la corriente i_d) con un debilitamiento constante del campo, ya que las caídas de tensión diferenciales debidas a la velocidad de variación de la corriente d también repercuten en la tensión de fase.

40 Para el control del convertidor, la corriente q que forma el momento de giro se predetermina independientemente de la corriente d de un regulador del número de revoluciones. Esto significa que el debilitamiento dinámico del campo con variación de la corriente d - aparte la reducción de la ondulación - no tiene ninguna influencia en la corriente q y en el número de revoluciones del motor ya ajustado. Al variar la corriente d solo cambian respectivamente la longitud y el ángulo del fasor espacial de tensión resultante de los componentes perpendiculares entre sí.

50 Un sistema de control según la presente invención consta en primer lugar de componentes usuales de un control EC, es decir un rectificador de red y un convertidor postconectado en serie mediante un circuito intermedio que es controlado por un regulador PWM, con el fin de generar corrientes de motor casi sinusoidales para la pulsación del voltaje (modulación). Para ello se prevén medios de regulación del fasor espacial de tensión por campo orientado, con un regulador del número de revoluciones para fijar una corriente q como componente que forma el momento de

giro del fasor espacial de tensión. En la presente invención el sistema de control posee un generador de funciones para establecer una corriente d que varía dinámicamente y tiene un desarrollo sinusoidal y una frecuencia de red doble, como componente de corriente para la debilitación dinámica del campo, así como un regulador bidimensional de valores extremos que regula la corriente d sinusoidal según su desfase y amplitud, en función de la corriente q , de manera que se minimice la ondulación de la corriente q . Los demás componentes del sistema de control, es decir el generador de funciones y el regulador de valores extremos, son relativamente sencillos y fáciles de implementar desde el punto de vista técnico.

Seguidamente la presente invención se describe con mayor exactitud mediante un ejemplo. En las figuras están representados:

Fig. 1 un diagrama de bloques simplificado de un sistema de control según la presente invención, como ejemplo de ejecución preferido,

Fig. 2 un diagrama de tensión para posterior comentario y

Fig. 3 un diagrama de fasor espacial de tensión en el sistema cartesiano de coordenadas fijado en el rotor.

En primer lugar, como se desprende de la fig. 1, un sistema de control según la presente invención para un motor eléctrico sin colector 2, conmutado electrónicamente (EC-PMSM = motor sincrónico activado por imán permanente y conmutado electrónicamente), consta de un rectificador de red 4, de un circuito intermedio delgado 6 conectado tras él, que no contiene ninguna o solo una mínima reactancia, así como de un convertidor 8 alimentado a través del circuito intermedio 6 y controlado para conmutar el motor eléctrico 2. Con el rectificador de red 4 - representado de forma simplificada, pero construido como puente completo - se convierte una tensión alterna monofásica de red U_N con una frecuencia de red f_N en una tensión del circuito intermedio U_Z fuertemente pulsante. Esta tensión del circuito intermedio U_Z está esquematizada en la fig. 2; tiene una pulsación $2f_N$ - el doble que la de la red - entre cero y un valor máximo. El curso de la tensión corresponde al módulo de la tensión alterna sinusoidal U_N de la red.

Según la fig. 1 el circuito intermedio 6 contiene, dado el caso, un condensador del circuito intermedio C_{ZK} de baja capacidad. Se puede tratar de un condensador de plástico pequeño y económico. No obstante este condensador del circuito intermedio C_{ZK} es insuficiente para alisar la tensión del circuito intermedio U_Z y ésta tiene en cualquier caso una fuerte pulsación (v. fig. 2).

En el caso del convertidor 8 se trata de una fase de salida de potencia de una conexión puente (puente completo de corriente trifásica) con seis interruptores, que en la fig. 1 no están representados en detalle.

El motor eléctrico 2, representado de manera muy simple en la fig. 1, contiene tres arrollamientos de fase, sobre todo en conexión estrella, controlados por el convertidor 8, para generar un campo rotativo del modo consabido. En este caso el sistema de control trabaja con una regulación habitual del fasor espacial de tensión por campo orientado (regulación vectorial).

Para ello se remite al diagrama de la fig. 3. Se trata de una representación en el sistema cartesiano de coordenadas. El eje horizontal d indica la orientación del campo magnético permanente (véase como ejemplo el imán dibujado con sus polos S y N). Un eje q es perpendicular a él. Como ejemplo se representa un fasor espacial de tensión i que es la resultante de dos componentes, una corriente i_q regulada perpendicularmente al campo magnético permanente (eje d) como componente del momento de giro y una corriente i_d regulada en la dirección del campo magnético como componente que influye en el mismo y no forma ningún momento de giro. En los motores sincrónicos la corriente d suele ajustarse a cero para alcanzar un momento máximo de giro mediante la corriente q , con una eficiencia óptima. Entonces el fasor espacial de tensión i resultante corresponde con un módulo mínimo a la corriente i_q .

La corriente i_q que forma el momento de giro se prefija y se regula con un regulador del número de revoluciones 10. Para ajustar o prefijar un determinado número de revoluciones n se dispone de un actuador opcional 12. El control del convertidor 8 tiene lugar a través de un generador PWM 14 en función del ángulo de giro del motor eléctrico 2.

Si el motor eléctrico 2 se alimentara directamente con la tensión U_Z fuertemente pulsante U_Z , según la fig. 2, debido al circuito intermedio delgado 6, por debajo de una determinada tensión límite U_G solo podría llegar al bobinado del motor una corriente demasiado pequeña para mantener constante el momento de giro necesario.

Por tanto, según la presente invención, el sistema de control trabaja con un novedoso debilitamiento dinámico de campo, estableciendo la corriente i_d en la zona negativa con un desarrollo sinusoidal y una frecuencia $2f_N$ que duplica la de la red. En este sentido, la corriente d prefijada como valor de consigna se regula según su desfase respecto a la tensión alterna de la red U_N y según su amplitud, de manera que se minimice una ondulación de la corriente i_q . En el fondo la secuencia de estas regulaciones es opcional (1º desfase y 2º amplitud o viceversa). A causa de la modulación de la corriente i_d , la corriente de fase resultante también presenta una modulación de fases-amplitudes.

Según la fig. 1 el sistema de control posee con esta finalidad, conforme a la presente invención, un generador de funciones 16 para prefijar una corriente i_d dinámicamente variable, con un curso sinusoidal y una frecuencia doble respecto a la de la red, como componente de debilitamiento dinámico del campo. En relación con el generador de

funciones 16 se prevé además un regulador bidimensional de valores extremos 18, concebido de manera que regule la corriente sinusoidal i_d según su desfase y amplitud en función de la corriente i_q controlada para ello, con el fin de minimizar una ondulación de la corriente q . De esta forma se obtiene una tensión de fase del motor que sigue con una exactitud bastante buena el desarrollo de la tensión pulsante U_z del circuito intermedio.

5 Con el debilitamiento dinámico de campo según la presente invención y los procesos que para ello tienen lugar en el sistema de control, sobre todo mediante la variación dinámica de la desarrollo d , se consigue ventajosamente como efecto adicional un almacenamiento dinámico de energía en las inductancias del motor. Esta energía almacenada se realimenta al circuito intermedio 6, aumentando su tensión U_z . Se trata por consiguiente de un efecto convertidor elevador. También esto contribuye favorablemente a disminuir la ondulación de la corriente q y por tanto a reducir
10 asimismo la ondulación del momento de giro. El alisado de la corriente de fase por la inductancia del motor también tiene el efecto de un almacenamiento energético, de modo que la inductancia del motor debe considerarse como un acumulador de energía para la realimentación a través de la corriente d y para el alisado de la tensión de fase, que se puede manejar ventajosamente con independencia de la formación del momento de giro.

15 El debilitamiento dinámico de campo según la presente invención funciona especialmente bien en motores que poseen una gran inductancia de fase; por un lado, para poder reducir mucho la tensión de fase y , por otro, para alisarla (respuesta de paso bajo).

20 Además el método funciona especialmente bien en motores con una frecuencia de corriente de fase (frecuencia de fase) inferior a la frecuencia de la tensión pulsante del circuito intermedio (tal como se ha descrito puede quedar una cierta ondulación residual). Las caídas de corriente más frecuentes que resultan de ello se pueden filtrar mediante la respuesta de paso bajo del arrollamiento, estabilizando (alisando) el curso de la corriente y con ello el momento de giro.

25 El método de la presente invención se puede emplear en combinación con un convertidor elevador, previsto en el circuito intermedio, que incrementa los valores momentáneos de la tensión del circuito intermedio, al menos hasta una tensión límite, alisándola. Además las inductancias de fuga de los extremos del bobinado se pueden usar para la operación con el convertidor elevador. Un método correspondiente es objeto de la anterior solicitud de patente europea EP 09163651.

30 En el marco de las reivindicaciones adjuntas hay lugar para variaciones y modificaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método para controlar un motor sincrónico (2) sin escobillas, conmutado electrónicamente, en concreto un motor sincrónico de imán permanente, en que una tensión alterna monofásica (U_N) con una frecuencia de red (f_N) se rectifica y, como tensión de circuito intermedio (U_Z) con una pulsación ($2f_N$) igual al doble de la frecuencia de red, se dirige mediante un circuito intermedio delgado (6), que no contiene ninguna o solo una mínima reactancia, a un convertidor (8) controlado para la alimentación y la conmutación del motor eléctrico (2), donde el control se efectúa mediante una regulación del fasor espacial de tensión por campo orientado en el sistema cartesiano de coordenadas fijado en el rotor, donde una corriente q (i_q) se regula perpendicularmente al campo magnético permanente, como componente del fasor espacial de tensión (i) que forma el momento de giro, y una corriente d (i_d) puede regularse en la dirección del campo magnético permanente, como componente del fasor espacial de tensión (i) que influye en el campo, caracterizado por un debilitamiento dinámico del campo, en el cual la corriente d (i_d) se prefija en la zona negativa con un curso sinusoidal y una frecuencia ($2f_N$) doble respecto a la de la red, y la corriente q (i_q) se regula según su desfase y amplitud, de manera que se minimice una ondulación de la corriente q (i_q).
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la corriente q (i_q) se prefija independientemente de la corriente d (i_d), mediante un regulador del número de revoluciones (10).
3. Método según la reivindicación 1 o 2, caracterizado porque mediante el debilitamiento dinámico del campo tiene lugar un almacenamiento dinámico de energía en las inductancias del motor y con él una recuperación de energía en el circuito intermedio (6), así como un alisado de la corriente de fase.
4. Método según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por una aplicación para un motor (2) con gran inductancia de fase y/o para un motor (2) cuya frecuencia de fase es inferior a la frecuencia de pulso de la tensión del circuito intermedio (U_Z).
5. Método según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque la tensión (U_Z) del circuito intermedio (6) se incrementa mediante un convertidor elevador, al menos hasta una tensión límite, con respecto a sus valores instantáneos y de este modo se alisa.
6. Método según la reivindicación 5, caracterizado porque las inductancias de fuga de los extremos del bobinado del motor se usan como inductancia para el convertidor elevador.
7. Sistema de control para un motor eléctrico (2) sin escobillas, conmutado electrónicamente, en concreto un motor sincrónico de imán permanente, sobre todo con la aplicación del método según una de las reivindicaciones anteriores, que consta de un rectificador de red (4), de un circuito intermedio delgado (6) conectado tras él, que no contiene ninguna o solo una mínima reactancia, así como de un convertidor (8) alimentado a través del circuito intermedio (6) y controlado para conmutar el motor eléctrico (2), con medios para regular el fasor espacial de tensión por campo orientado en el sistema cartesiano de coordenadas fijado en el rotor, con un regulador (10) del número de revoluciones, para establecer una corriente q (i_q) como componente del fasor espacial de tensión (i) que forma el momento de giro, caracterizado porque posee un generador de funciones (16) para prefijar una corriente d (i_d) que varía dinámicamente y tiene un desarrollo sinusoidal y una frecuencia de red doble ($2f_N$), como componente de corriente para la debilitación dinámica del campo, así como un regulador (18) de valores extremos que regula la corriente d (i_d) sinusoidal según su desfase y amplitud, en función de la corriente q (i_q), de manera que se minimice una ondulación de la corriente q (i_q).
8. Sistema de control según la reivindicación 7, caracterizado porque el motor eléctrico (2) está diseñado como motor sincrónico trifásico y en particular como motor de rotor externo.
9. Sistema de control según la reivindicación 7 u 8, caracterizado porque en el circuito intermedio (6) se prevé un convertidor elevador que incrementa la tensión (U_Z) del circuito intermedio, al menos hasta una tensión límite, con respecto a sus valores instantáneos, de este modo la alisa.
10. Sistema de control según la reivindicación 9, caracterizado porque como inductancia para el convertidor elevador se usan inductancias de fuga de los extremos del bobinado del motor.

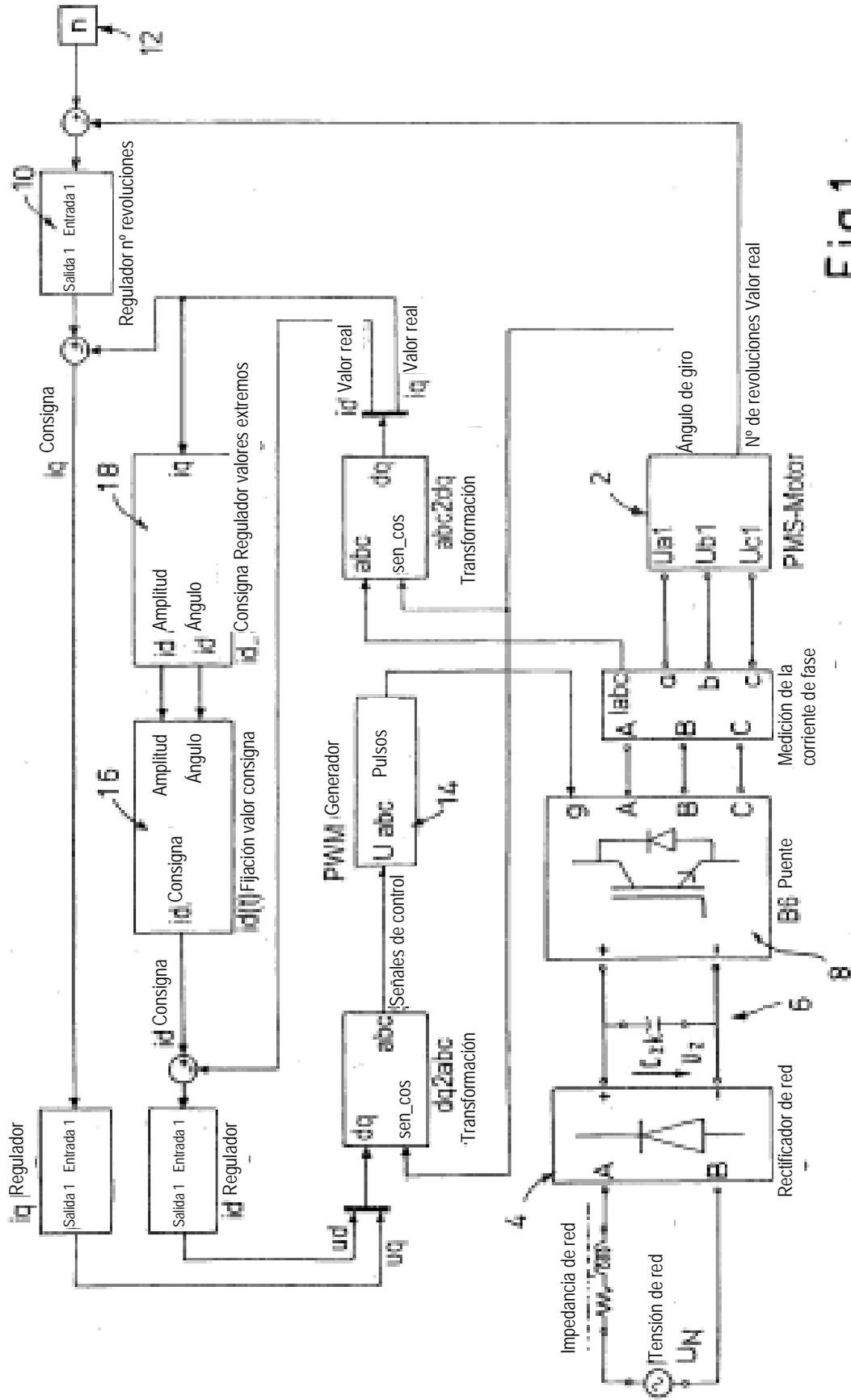


Fig.1

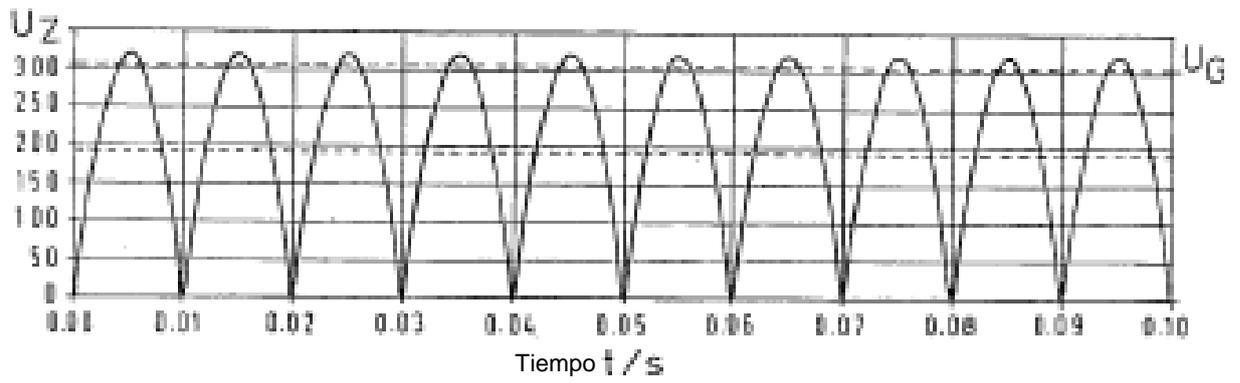


Fig.2

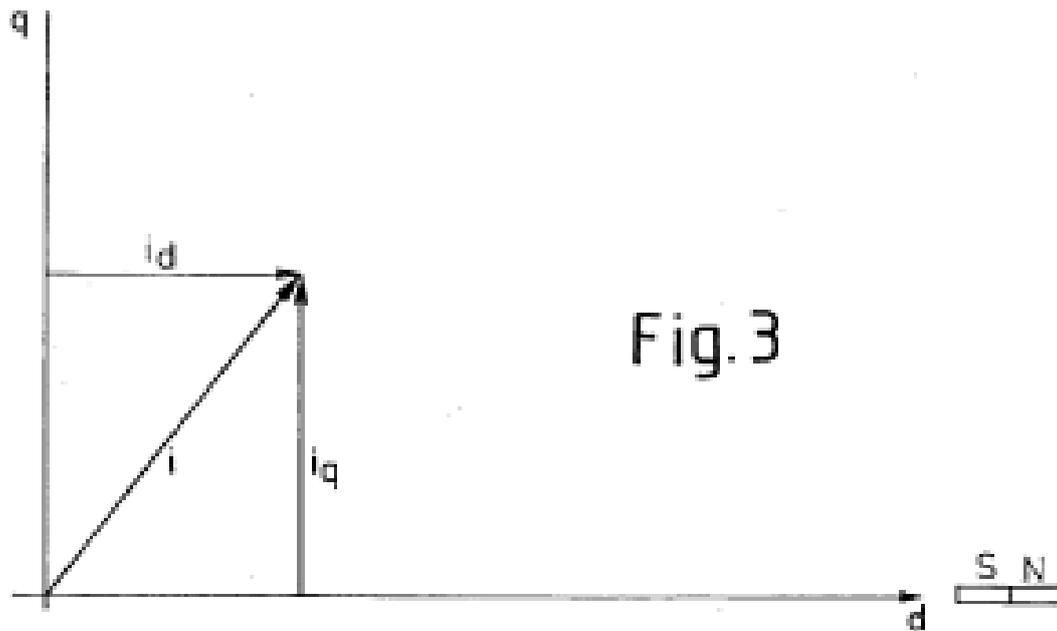


Fig.3