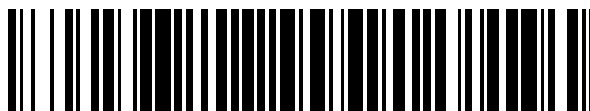


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 389 841**

51 Int. Cl.:  
**H02K 1/27** (2006.01)  
**H02K 21/16** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **04742388 .4**  
96 Fecha de presentación: **29.03.2004**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1609226**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.12.2005**

54 Título: **Máquina eléctrica sincrona que comprende un estator y por lo menos un rotor y dispositivo de control asociado**

30 Prioridad:  
**31.03.2003 FR 0303980**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**02.11.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**02.11.2012**

73 Titular/es:  
**MOTEURS LEROY-SOMER (100.0%)  
BOULEVARD MARCELLIN LEROY  
16000 ANGOULÉME, FR**

72 Inventor/es:  
**ABOU-AKAR, ATEF y  
SAINT-MICHEL, JACQUES**

74 Agente/Representante:  
**CURELL AGUILÁ, Mireia**

ES 2 389 841 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

Máquina eléctrica síncrona que comprende un estator y por lo menos un rotor y dispositivo de control asociado.

La presente invención se refiere al campo de las máquinas eléctricas giratorias.

5 La invención se refiere más particularmente aunque no exclusivamente a las máquinas síncronas de imanes permanentes que pueden funcionar a potencia sustancialmente constante en un amplio intervalo de velocidades, por ejemplo, las máquinas de elevación o de tracción eléctrica. Se describen unas máquinas de imanes permanentes por ejemplo en el documento DE 30 16540.

10 En el marco de la elevación, es útil adaptar la velocidad de elevación a la carga elevada con el fin de reducir el tiempo de elevación cuando esta carga es pequeña al tiempo que se permite garantizar la elevación de las piezas más pesadas.

En el marco de la tracción eléctrica, en el arranque o cuando el vehículo aborda una subida, el motor debe proporcionar un fuerte par a baja velocidad. En cambio, en un recorrido horizontal, los esfuerzos que debe proporcionar son menores, y el vehículo puede rodar más rápido sin necesitar más potencia del motor.

15 Las máquinas síncronas pueden funcionar a par constante hasta una determinada velocidad denominada velocidad de base. Hasta esta velocidad de base, la potencia crece de manera sustancialmente proporcional a la velocidad de rotación del rotor. Más allá de la velocidad de base, el par disminuye a potencia sustancialmente constante.

20 Las fases del inducido se pueden modelizar cada una mediante una inductancia que agrupa los términos de autoinducción, de mutuas entre fases y de fuga. Esta inductancia depende de la posición angular del rotor con respecto al estator, y presenta como componentes en un sistema de referencia vinculado a la pulsación eléctrica la inductancia directa  $L_d$  y la inductancia en cuadratura  $L_q$ . La reactancia directa  $X_d$  designa el producto de la inductancia directa  $L_d$  por la pulsación eléctrica  $\omega$ , y la reactancia en cuadratura  $X_q$  designa el producto de la inductancia  $L_q$  en cuadratura por la pulsación eléctrica  $\omega$ . La velocidad de rotación del rotor  $\Omega$  esta vinculada a la pulsación eléctrica  $\omega$  por la relación  $\omega = z\Omega$ , en la que  $z$  designa el número de pares de polos.

25 En el sistema de referencia vinculado a la pulsación eléctrica, la inductancia directa  $L_d$  de una fase del inducido es el valor de la inductancia en el eje  $d$  denominado directo, es decir, cuando el eje de los polos inductores coincide con el de las bobinas del estator de esta misma fase. La inductancia en cuadratura  $L_q$  es el valor de la inductancia en el eje  $q$  denominado en cuadratura, es decir cuando el eje de los polos inductores es perpendicular al eje de las bobinas del estator para esta misma fase.

30 Las máquinas eléctricas giratorias de imanes permanentes conocidas para la elevación y la tracción eléctrica son mayoritariamente unas máquinas denominadas de polos lisos, para las cuales la reactancia directa  $X_d$  es sustancialmente igual a la reactancia en cuadratura  $X_q$ .

35 Además de las máquinas de polos lisos, el artículo "Salient-Rotor PM synchronous motors for an extended flux-weakening operation range" de Bianchi N *et al.* publicado por la IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36 nº 4 de julio/ agosto de 2000 describe unas máquinas de imanes permanentes para las cuales la reactancia directa  $X_d$  es superior a  $X_q$ . Se encuentran también unas máquinas denominadas de saliencia inversa, para las cuales la reactancia directa  $X_d$  es netamente inferior a la reactancia en cuadratura  $X_q$ . Su principal ventaja es que el par de reluctancia, que es proporcional a la diferencia entre las reactancias  $X_q$  y  $X_d$ , se suma, en funcionamiento normal, al par de fuerza electromotriz generado por los imanes, lo cual permite, a igualdad de par demandado, reducir el volumen de los imanes y por tanto el precio de la máquina. Para este tipo de máquina, existe un desplazamiento óptimo en avance de fase de la corriente con respecto a la fuerza electromotriz para la cual el par es máximo. Este punto de funcionamiento es el que se conserva hasta la velocidad de base.

Más allá de la velocidad de base, la tensión en los bornes de las fases de la máquina se vuelve, permaneciendo el resto igual, superior a la tensión disponible proporcionada por la red a la máquina por medio del dispositivo de control, debido a la fuerza electromotriz que varía proporcionalmente a la velocidad.

45 Para reducir la tensión en los bornes de las fases de la máquina, se actúa sobre la corriente en los arrollamientos del estator y en su desfase con respecto al flujo inductor, es decir, el de los imanes, para crear un flujo magnético que se opone parcialmente al flujo inductor. Esta operación se denomina "disminución de flujo" y genera pérdidas eléctricas tanto más importantes cuanto mayor es la corriente necesaria para la disminución de flujo.

50 Existe la necesidad de mejorar las máquinas síncronas y permitir que funcionen con un rendimiento elevado a potencia sustancialmente constante en un gran intervalo de velocidades, y en particular más allá de la velocidad de base.

La invención responde a esta necesidad gracias a una máquina eléctrica síncrona según la reivindicación 1. Siendo  $X_d$  la reactancia directa y  $X_q$  la reactancia en cuadratura, se tiene por ejemplo  $X_d/X_q > 1,1$ , mejor  $X_d/X_q > 1,5$ . Se puede tener por ejemplo  $X_d/X_q \cong 3$ .

Las ventajas aportadas por la invención son las siguientes.

5 Por una parte, variando el factor de potencia  $\cos \Phi$  en sentido inverso de la reactancia en cuadratura  $X_q$ , un valor pequeño de  $X_q$  permite obtener un factor de potencia elevado. Se tiene por ejemplo, según el nivel de factor de potencia buscado,  $X_q I_0/E$  comprendido entre 0,33 y 0,6, en el que  $I_0$  designa la intensidad máxima de la corriente de línea impuesta por el calibre del variador y  $E$  la fuerza electromotriz inducida por fase de la máquina.

10 Por otra parte, estando orientado el flujo de los imanes en el eje  $d$  directo, la disminución de flujo se efectúa inyectando en el inducido una corriente con objeto de generar en el eje directo  $d$  un flujo proporcional a la reactancia directa  $X_d$  y a la componente  $I_d$  de la intensidad en el eje directo. Con una reactancia directa  $X_d$  elevada, se obtiene una disminución de flujo importante con menos corriente directa  $I_d$  y por tanto menos pérdidas correspondientes, lo cual tiene como consecuencia reducir el calibre del dispositivo de control y mejorar el rendimiento.

15 Además, con  $X_d$  elevada, se disminuye el riesgo de desmagnetización en caso de cortocircuito, vinculado al valor de la corriente de cortocircuito. Esta corriente es proporcional a la relación entre la fuerza electromotriz y la reactancia directa, y por tanto es pequeña cuando la reactancia directa  $X_d$  es grande. Se tiene por ejemplo, según el intervalo de disminución de flujo demandado,  $X_d I_0/E$  comprendido entre 0,66 y 1, en el que  $I_0$  designa la intensidad máxima de la corriente de línea impuesta por el calibre del variador y  $E$  la fuerza electromotriz inducida por fase de la máquina.

Hasta la velocidad de base, la máquina puede funcionar con una corriente en fase con la fuerza electromotriz. El par de fuerza electromotriz es máximo y el par de reluctancia es nulo. La velocidad de base puede ser superior a 100 o 200 vueltas por minuto, por ejemplo.

20 En una forma de realización particular, el estator comprende unos dientes que soportan cada uno por lo menos una bobina individual y estos dientes carecen de expansiones polares. Esto permite en particular la colocación en los dientes de bobinas prefabricadas, lo cual simplifica la fabricación de la máquina.

El rotor es ventajosamente de concentración de flujo, estando los imanes permanentes del rotor dispuestos entre piezas polares. Esto permite disminuir la cantidad de imanes, por tanto, reducir el coste de la máquina.

25 Se puede determinar los valores de las reactancias directa y en cuadratura por la forma de las piezas polares del rotor, y en particular por la forma de las partes sobresalientes de estas piezas polares.

Las partes sobresalientes de dos piezas polares sucesivas definen entre sí una muesca que presenta dos bordes opuestos que comprenden unas partes radiales y un fondo parcialmente formado por una cara de por lo menos un imán permanente.

30 Dicha forma de las piezas polares provoca una asimetría entre las reactancias directa y en cuadratura y una diferencia positiva relativamente importante entre las reactancias directa y en cuadratura.

Las piezas polares del rotor comprenden, cada una, una cara vuelta hacia el estator que presenta una parte convexa. La parte convexa de una pieza polar presenta un radio de curvatura comprendido entre el 20% y el 30% de un radio del estator, en particular de un radio interior del estator, incluso el 25% aproximadamente.

35 Los extremos circunferenciales de esta parte convexa pueden estar desplazados angularmente con respecto a los imanes permanentes que son adyacentes a esta pieza polar. El desplazamiento angular de los extremos circunferenciales con respecto a los imanes permanentes adyacentes puede estar comprendido:

- entre  $\frac{80^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{100^\circ}{n_{dientes}}$ , siendo por ejemplo de aproximadamente  $\frac{90^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina cuya relación entre el número de dientes  $n_{dientes}$  del estator y el número de polos  $n_{polos}$  del rotor es de 3/2 o que verifica la

40 relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n-2}$ , siendo  $n$  un número entero superior o igual a 2, y

- entre  $\frac{50^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{70^\circ}{n_{dientes}}$ , siendo por ejemplo de aproximadamente  $\frac{60^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina que verifica la

relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n+2}$ , siendo  $n$  un número entero superior o igual a 2.

45 Cada uno de los imanes permanentes del rotor se sitúa radialmente retirado hacia atrás de los extremos circunferenciales de las partes convexas de las dos piezas polares adyacentes. La retirada hacia atrás en la dirección radial de los imanes con respecto a los extremos circunferenciales de las partes convexas puede estar

comprendida entre el 10% y el 20%, siendo por ejemplo del 15% aproximadamente, de un radio del estator, en particular de un radio interior del estator.

Cada una de las piezas polares del rotor puede comprender dos rebordes. Un imán permanente puede estar situado entre los rebordes de dos piezas polares adyacentes.

- 5 Cada una de las piezas polares del rotor comprende una parte sobresaliente que se extiende en dirección del estator, que presenta unos bordes radiales que están desplazados angularmente con respecto a unos bordes dirigidos radialmente de los imanes permanentes adyacentes a esta pieza polar.

10 Los imanes permanentes del rotor pueden presentar, cuando se observa la máquina según el eje de rotación del rotor, una sección transversal de forma alargada en una dirección radial. En particular, los imanes permanentes del rotor pueden presentar, cuando se observa la máquina según el eje de rotación del rotor, una sección transversal rectangular de lado mayor orientado paralelamente a un radio de la máquina.

15 En una forma de realización particular de la invención, la relación  $X_d/X_q$  se elige de manera que se obtenga para la velocidad máxima de rotación del rotor sustancialmente la misma potencia que la obtenida a la velocidad de base, con la misma tensión y la misma corriente.

20 Preferentemente, entre los valores posibles para la relación  $X_d/X_q$  que permiten obtener el resultado mencionado anteriormente, se elige el más pequeño para evitar tener una saliencia elevada que se traduciría por unos polos de menor abertura y un entrehierro equivalente más grande, y lo cual tendría como consecuencia aumentar el volumen de los imanes, por tanto el precio y el peso de la máquina. Una saliencia elevada reduciría además el par máximo que la máquina estaría en condiciones de proporcionar, lo cual limitaría las posibilidades de sobrecarga.

El estator puede comprender  $6n$  dientes y el rotor  $6n \pm 2$  polos, siendo  $n$  superior o igual a 2. Una estructura de este tipo puede permitir reducir a la vez las oscilaciones de par y los armónicos de tensión.

25 La máquina puede comprender un solo rotor interior o, como variante, un rotor interior y un rotor exterior, dispuestos radialmente a ambos lados del estator y acoplados en rotación. La utilización de un rotor doble puede permitir reducir las pérdidas en el hierro.

La máquina puede constituir un generador o un motor.

La potencia de la máquina puede ser superior o igual a 0,5 kW, siendo por ejemplo del orden de 1,5 kW, siendo este valor en absoluto limitativo.

30 Se describe asimismo, independientemente o en combinación con lo anterior, una máquina eléctrica que comprende:

- por lo menos un estator,
- por lo menos un rotor, comprendiendo el rotor unas piezas polares y unos imanes permanentes dispuestos entre las piezas polares, comprendiendo cada pieza polar una parte sobresaliente y a ambos lados de esta parte sobresaliente un reborde.

35 Los rebordes de dos piezas polares adyacentes se pueden nivelar con el imán permanente dispuesto entre ellas.

Cada parte sobresaliente puede estar delimitada en el sentido circunferencial por un borde que se extiende radialmente.

Cada pieza polar puede no recubrir los imanes permanentes adyacentes en el sentido circunferencial.

Cada parte sobresaliente puede estar delimitada radialmente por un borde redondo de manera continua.

40 Cada pieza polar puede ser simétrica con respecto a un plano medio orientado radialmente.

Cada pieza polar puede comprender un apilamiento de chapas magnéticas.

La parte sobresaliente puede comprender un borde radialmente exterior circular cuyo centro de curvatura es diferente del centro de rotación, estando el centro de curvatura, situado por ejemplo en un radio entre el centro de rotación y el semidiámetro máximo del rotor.

45 La separación angular entre dos partes sobresalientes adyacentes puede ser superior a la anchura angular del imán permanente dispuesto entre las piezas polares correspondientes.

Los imanes permanentes pueden comprender una cara exterior enfrentada al estator.

Se describe asimismo un dispositivo de control que permite controlar una máquina tal como se ha definido anteriormente.

5 Se describe asimismo, independientemente o en combinación con lo anterior, un dispositivo de control de un motor síncrono que permite el funcionamiento del motor a potencia constante  $P_0$  en un intervalo de velocidad de rotación del rotor, que comprende un calculador dispuesto para determinar los valores de intensidades directa  $I_d$  y en cuadratura  $I_q$  de la corriente de alimentación del motor, siendo las intensidades  $I_d$  e  $I_q$  iguales, aproximadamente al 20%, mejor aproximadamente al 10%, mejor incluso aproximadamente al 5%, a:  $I_d \cong i_d \cdot I_0 \cong -i \sin \alpha \cdot I_0$  e  $I_q \cong i_q \cdot I_0 \cong i \cos \alpha \cdot I_0$ , en las que  $I_0$  es la intensidad máxima de la corriente de línea impuesta por el calibre del dispositivo de control,

10 
$$\alpha = \arctg \left( \frac{x_q (e - y)}{x_d x} \right),$$

$$i = \sqrt{\left( \frac{x}{x_q} \right)^2 + \left( \frac{e - y}{x_d} \right)^2},$$

circulando la corriente unitaria en una fase del inducido,

siendo (x, y) una de las raíces reales de las ecuaciones

$$x^2 + y^2 = \frac{v^2}{m^2} \quad e \quad y = e \left( 1 - \frac{x_d}{x_d - x_q} \right) + \frac{p}{m} e \frac{x_d x_q}{x_d - x_q} \frac{1}{x},$$

m designa la relación entre la velocidad de rotación del rotor y la velocidad de base,

15 e es la relación entre, por una parte, la fuerza electromotriz, y por otra parte, el producto de m por la tensión máxima por fase  $V_0$  impuesta por la red de alimentación,

v es la relación entre la tensión en los bornes de una fase del inducido y la tensión  $V_0$  impuesta por la red de alimentación,

p es la relación entre la potencia efectiva y la potencia constante  $P_0$  a la que se desea que funcione la máquina, y

20  $\alpha$  el desfase entre la intensidad y la fuerza electromotriz.

Por "intensidad directa" e "intensidad en cuadratura", se entienden los valores de la intensidad proyectada en los ejes directo d y en cuadratura q del sistema de referencia vinculado a la pulsación eléctrica.

Se designa por  $x_d$  el cociente  $\frac{X_d I_0}{m V_0}$ , siendo  $X_d$  la reactancia directa.

De igual manera,  $x_q = \frac{X_q I_0}{m V_0}$ , siendo  $X_q$  la reactancia en cuadratura.

25 Un dispositivo de control de este tipo desplaza la corriente un ángulo  $\alpha$  con respecto a la fuerza electromotriz, al tiempo que se mantiene la tensión constante, y la componente  $i_d$  de i en el eje directo d va a crear un flujo que se va a oponer al flujo principal. La fuerza magnetomotriz total se encuentra por tanto reducida, lo cual conlleva por consiguiente una caída de la tensión inducida global.

30 No se puede aumentar el valor unitario i. de la corriente más allá de su valor nominal por motivos relacionados con el calentamiento de la máquina y con el calibre del dispositivo de control.

Se puede obtener la tensión deseada con el mínimo de desplazamiento  $\alpha$ , es decir, la intensidad directa unitaria más pequeña  $i_d$ , con el fin de disponer de más corriente en cuadratura que contribuye a la creación del par.

35 La relación de disminución de flujo es el valor de m máximo que permite obtener la misma potencia  $P_0$  que la que se obtiene a la velocidad de base con la misma tensión  $V_0$  y la misma corriente  $I_0$  definidas anteriormente. Se pueden deducir a partir de esto los valores de la fuerza electromotriz, y el de las reactancias directa y en cuadratura para una máquina dada. La relación  $X_d/X_q$  así hallada para  $P_0$ ,  $V_0$  e  $I_0$  dadas es una función creciente de la relación de disminución de flujo buscado, pudiendo ser esta última por ejemplo superior a 2, siendo por ejemplo igual a 6.

Entre las soluciones (x, y) posibles, se elige preferentemente la que minimiza i.

El dispositivo de control que se acaba de describir se utiliza preferentemente en combinación con un motor síncrono

que presenta  $X_d > X_q$  tal como se ha definido anteriormente.

El dispositivo de control puede comprender además:

- un ondulator trifásico,
- un controlador vectorial dispuesto para transmitir en función de las intensidades  $i_d$  e  $i_q$  las señales de control a los interruptores electrónicos del ondulator.

Se describe asimismo, independientemente o en combinación con lo anterior, un procedimiento de control de un motor en el que se mide por lo menos la tensión de alimentación de un ondulator conectado al motor y la velocidad de rotación del motor, y se determinan mediante cálculo en tiempo real y/o mediante acceso a un registro las intensidades directa  $i_d$  y en cuadratura  $i_q$  de la corriente de alimentación que permite mantener, para una consigna de velocidad  $\Omega^*$  dada por encima de la velocidad de base, la potencia constante.

Se puede determinar una consigna de par  $t^*$  en función por lo menos de la diferencia entre la velocidad de rotación medida y la consigna de velocidad de rotación del rotor  $\Omega^*$ . Se puede determinar una consigna de potencia en función por lo menos de la consigna de par y de la velocidad de rotación medida. Se pueden calcular las intensidades unitarias directa  $i_d$  y en cuadratura  $i_q$  en tiempo real a partir de la consigna de potencia, de la velocidad de rotación medida y de la tensión continua de alimentación del ondulator. Las intensidades directa y en cuadratura se pueden determinar según las leyes de control en función de la carga y de la tensión de alimentación del ondulator. Estas leyes de control se pueden integrar al calculador con el fin de mejorar sus rendimientos dinámicos.

Se describe asimismo, independientemente o en combinación con lo anterior, un vehículo eléctrico que comprende un motor que comprende:

- un estator, y
- por lo menos un rotor de imanes permanentes, estando el motor dispuesto con objeto de tener  $X_d > X_q$ , en la que  $X_d$  es la reactancia directa y  $X_q$  la reactancia en cuadratura.

El vehículo puede comprender incluso un dispositivo de control de un motor síncrono, que permite el funcionamiento del motor a potencia constante en un intervalo de velocidades de rotación del rotor, que comprende un calculador dispuesto para determinar los valores de las intensidades directa  $i_d$  y en cuadratura  $i_q$  de la corriente de alimentación del motor inyectadas en el motor, siendo las intensidades  $i_d$  e  $i_q$  iguales, aproximadamente al 20%, mejor aproximadamente al 10%, mejor incluso aproximadamente al 5%, a:  $i_d \cong i_d \cdot I_o \cong -i \cdot \sin \alpha \cdot I_o$  e  $i_q \cong i_q \cdot I_o \cong i \cdot \cos \alpha \cdot I_o$  en las que  $I_o$  es la intensidad máxima de la corriente impuesta por el calibre del dispositivo de control,

$$\alpha = \text{arctg} \left( \frac{x_q (e - y)}{x_d x} \right),$$

$$i = \sqrt{\left( \frac{x}{x_q} \right)^2 + \left( \frac{e - y}{x_d} \right)^2},$$

, circulando la corriente unitaria en una fase del inducido,

siendo (x, y) una de las raíces reales de las ecuaciones

$$x^2 + y^2 = \frac{v^2}{m^2} \text{ e } y = e \left( 1 - \frac{x_d}{x_d - x_q} \right) + \frac{p}{m} e \frac{x_d x_q}{x_d - x_q} \frac{1}{x},$$

m designa la relación entre la velocidad de rotación del rotor y la velocidad de base,

e es la relación entre, por una parte, la fuerza electromotriz, y por otra parte, el producto de m por la tensión máxima por fase  $V_o$  impuesta por la red de alimentación,

v es la relación entre la tensión en los bornes de una fase del inducido y la tensión  $V_o$  impuesta por la red de alimentación,

p es la relación entre la potencia efectiva y la potencia constante a la que se desea que funcione la máquina, y

$\alpha$  el desfase entre la intensidad y la fuerza electromotriz.

La presente invención se pondrá más claramente de manifiesto a partir de la lectura de la descripción detallada siguiente de un ejemplo no limitativo de realización de la invención, y del examen del dibujo adjunto, en el que:

- la figura 1 representa de manera esquemática y parcial, en sección transversal, una máquina según la

invención,

- la figura 2 es un diagrama de Blondel que representa diferentes amplitudes sinusoidales en un sistema de referencia relacionado con la pulsación eléctrica,
- la figura 3 es un esquema simplificado en bloques de un dispositivo de control de un motor síncrono según la invención, y
- la figura 4 representa esquemáticamente un ejemplo de realización del calculador principal del dispositivo de control de la figura 3.

Máquina eléctrica

Se ha representado en la figura 1 una máquina eléctrica síncrona 1 que comprende un estator 10 y un rotor 20 de imanes permanentes 21.

El estator 10 comprende unos dientes 11 que soportan cada uno una bobina individual 12, estando las bobinas 12 conectadas eléctricamente entre sí de manera que sean alimentadas mediante una corriente trifásica.

El rotor 20 es de concentración de flujo, estando los imanes permanentes 21 dispuestos entre unas piezas polares 22. Los imanes permanentes 21 y las piezas polares 22 están fijados de manera apropiada a un árbol 23 de la máquina.

Las piezas polares 22 pueden estar sujetas en el árbol 23 mediante pegado, o incluso mediante la realización de formas complementarias en el árbol y las piezas polares, o incluso ser sujetadas mediante barras acopladas en las piezas polares 22 y fijadas en sus extremos a unos escudos del rotor.

Las piezas polares 22 están realizadas mediante un apilamiento de chapas magnéticas recubiertas cada una de un barniz aislante, con el fin de limitar las pérdidas por corrientes inducidas.

Los imanes 21 presentan unas polaridades de la misma naturaleza, dirigidas hacia la pieza polar 22 dispuesta entre ellos, tal como se puede observar en la figura 1.

Las piezas polares 22 comprenden, cada una, una parte sobresaliente 27, y su cara vuelta hacia el estator 10 presenta una parte convexa 24. La parte convexa 24 de una pieza polar 22 puede presentar un radio de curvatura comprendido entre el 20% y el 30% de un radio del estator, en particular del radio interior del estator, incluso el 25% aproximadamente.

Cada parte convexa 24 comprende unos extremos circunferenciales 25 desplazados angularmente con respecto a los imanes permanentes 21 adyacentes. El desplazamiento angular  $\beta$  de los extremos circunferenciales 25 con respecto a los imanes permanentes 21 adyacentes puede estar comprendido:

- entre  $\frac{80^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{100^\circ}{n_{dientes}}$  siendo por ejemplo de aproximadamente  $\frac{90^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina cuya relación entre el número de dientes  $n_{dientes}$  del estator y el número de polos  $n_{polos}$  del rotor es de 3/2 o que verifica la relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n-2}$ , siendo n un número entero superior o igual a 2, por ejemplo igual a 2 ó 3, y
- entre  $\frac{50^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{70^\circ}{n_{dientes}}$  siendo por ejemplo de aproximadamente  $\frac{60^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina que verifica la relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n+2}$ , siendo n un número entero superior o igual a 2, por ejemplo igual a 2 ó 3.

En estas relaciones,  $n_{dientes}$  designa el número de dientes 11 del estator y  $n_{polos}$  el número de piezas polares 27.

Los imanes permanentes 21 se sitúan radialmente retirados hacia atrás de los extremos circunferenciales 25 de las partes convexas 24. La retirada hacia atrás r en la dirección radial de los imanes 21 con respecto a los extremos circunferenciales 25 de las partes convexas 24 puede estar comprendida entre el 10% y el 20%, incluso aproximadamente del 15% del radio interior R del estator.

Cada pieza polar 22 comprende además dos rebordes 26 situados a ambos lados de la parte sobresaliente 27, situándose cada imán permanente 21 entre dos rebordes 26.

Las partes sobresalientes 27 de cada una de las piezas polares 22 del rotor presentan unos bordes radiales 28 que al igual que los extremos circunferenciales 25 están desplazados angularmente con respecto a los bordes 29, dirigidos radialmente, de los imanes permanentes 21 adyacentes.

Los imanes permanentes 21 presentan, cuando se observa la máquina según el eje de rotación X, una sección transversal de forma alargada en una dirección radial. Esta sección transversal es, en el ejemplo descrito, rectangular, de lado mayor orientado paralelamente a un radio de la máquina. Como variante, los imanes permanentes podrían presentar, cada uno, una forma de cuña.

5 En el ejemplo considerado, el rotor comprende diez polos y el estator doce dientes, comprendiendo el estator por tanto  $6n$  dientes y el rotor  $6n \pm 2$  polos, siendo  $n$  igual a 2. No se sale del marco de la presente invención si  $n$  es superior a 2.

En el ejemplo descrito, el rotor es interior, aunque no se sale del marco de la presente invención si el rotor es exterior, o si la máquina comprende a la vez un rotor interior y un rotor exterior, dispuestos cada uno radialmente a ambos lados del estator y acoplados en rotación. El motor satisface ventajosamente, según la invención, la relación  $X_d > X_q$ .

#### Dispositivo de control

15 La máquina que se acaba de describir haciendo referencia a la figura 1 se puede controlar mediante un dispositivo de control que permite su funcionamiento a potencia constante en un gran intervalo de velocidades de rotación del rotor, tal como se describirá haciendo referencia a las figuras 2 y 3. Este dispositivo de control está particularmente adaptado a una máquina para la que  $X_d > X_q$ .

Para mayor claridad, se ha representado en la figura 2 un sistema de referencia ampliamente conocido vinculado a la pulsación eléctrica  $\omega$ , que comprende un eje directo  $d$  que presenta el mismo sentido y la misma dirección que el flujo inductor  $\varphi$ , o flujo principal, que atraviesa una fase del inducido, y un eje en cuadratura  $q$  desplazado un ángulo de  $+\frac{\pi}{2}$  con respecto al eje directo  $d$ . Las amplitudes sinusoidales se pueden representar mediante vectores fijos.

En lo sucesivo, se utilizan los valores unitarios  $e$ ,  $x_d$  y  $x_q$  definidos anteriormente.

25 El desplazamiento de la corriente unitaria  $i$  con respecto a la fuerza electromotriz unitaria  $e$  se elige para mantener la tensión constante a las velocidades superiores a la velocidad de base dado que la componente unitaria  $i_d$  de  $i$  en el eje directo  $d$  va a crear un flujo que se va a oponer al flujo principal, encontrándose la fuerza magnetomotriz total por tanto reducida y conllevando por consiguiente una caída de la tensión unitaria inducida  $v$ , esto sin perjudicar demasiado al par motor, estando el dispositivo de control dispuesto de manera que permita que la máquina funcione con el par más grande posible más allá de la velocidad de base. En particular, se pretende que el dispositivo de control pueda funcionar con una potencia más allá de la velocidad de base sustancialmente igual a la potencia a la velocidad de base.

30 El motor síncrono 1 se alimenta mediante una corriente trifásica procedente de un ondulator 35 que comprende seis interruptores electrónicos 60, por ejemplo uno o varios IGBT, asociados cada uno a un diodo 61, y controlados mediante seis señales de control 62 procedentes de un controlador vectorial 37.

35 Este último permite corregir la intensidad de la corriente proporcionada al motor en función de consignas de intensidades directa  $i_d$  y en cuadratura  $i_q$  que recibe de un calculador principal 45, de las intensidades medidas  $i_a$  e  $i_b$  para dos de las tres fases, y de una información  $\theta$  de posición angular.

La información  $\theta$  de posición angular se transmite mediante un calculador de posición 40 conectado a un sensor de posición 39.

El sensor de posición 39 está conectado asimismo a un calculador de velocidad 41.

40 El valor de la velocidad de rotación  $\Omega$  calculado por el calculador de velocidad 41 se transmite al calculador principal 45, a un multiplicador 46 y a un sustractor 47.

La velocidad de rotación  $\Omega$  se resta a una consigna de velocidad de rotación del rotor  $\Omega^*$  en el sustractor 47, a continuación se trata la diferencia  $\Omega^* - \Omega$  mediante un circuito de regulación 48 de tipo PID (proporcional-integral-derivada) y se transmite a un calculador de par 49 que determina una consigna de par  $t^*$  en función de la diferencia entre la velocidad de rotación medida  $\Omega$  y la consigna de velocidad de rotación del rotor  $\Omega^*$ . La consigna de par  $t^*$  se maximiza al par máximo  $t_{max}$  que puede proporcionar la máquina.

La consigna de par  $t^*$  se transmite al multiplicador 46 que, en función de la velocidad de rotación medida  $\Omega$  del rotor, calcula una consigna de potencia  $p^*$ .

Esta consigna de potencia  $p^*$  se transmite al calculador principal 45.

50 Por otro lado, se mide la tensión  $V_{DC}$  en los bornes del ondulator 35 y se transmite al calculador principal 45 mediante un circuito de regulación 50 del tipo PID para alisar las variaciones eventuales. Este circuito de regulación 50 proporciona una tensión unitaria  $v$  que puede variar, siendo dependiente de la tensión de la red.



El calculador principal 45 determina a partir de los datos que recibe las intensidades directa  $i_d$  y en cuadratura  $i_q$  correspondientes al funcionamiento a la potencia  $p^*$ .

Estos valores  $i_d$  e  $i_q$  se transmiten al controlador vectorial 37 y le permiten controlar, tal como se ha descrito anteriormente, el ondulator 35.

- 5 El calculador principal 45 puede determinar los valores  $i_d$  e  $i_q$  para acceder a un registro 53 que contiene unos valores precalculados, tal como se ilustra en la figura 4. Este registro 53 agrupa los valores de  $i_d$  e  $i_q$  para un gran número de entradas  $v$ ,  $p^*$  y  $\Omega$ . Para los valores  $v$ ,  $p^*$  y  $\Omega$ , el calculador determina los valores de  $v$ ,  $p^*$  y  $\Omega$  más próximos para los cuales se conoce, en el registro, 53  $i_d(v, p^*, \Omega)$  e  $i_q(v, p^*, \Omega)$ .

- 10 El calculador principal 45 puede incluso determinar  $i_d$  e  $i_q$  analíticamente, mediante un cálculo en tiempo real, gracias a las fórmulas siguientes:

$$i_d = -i \operatorname{sen} \alpha \text{ e } i_q = i \operatorname{cos} \alpha,$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_q (e - y)}{x_d x} \right),$$

$$i = \sqrt{\left( \frac{x}{x_d} \right)^2 + \left( \frac{e - y}{x_d} \right)^2},$$

siendo  $(x, y)$  una de las raíces reales de las ecuaciones

15 
$$x^2 + y^2 = \frac{v^2}{m^2} \text{ e } y = e \left( 1 - \frac{x_d}{x_d - x_q} \right) + \frac{p}{m} e \frac{x_d x_q}{x_d - x_q} \frac{1}{x},$$

- 20 Los términos “calculador”, “registro”, “circuito de regulación”, “sustractor” y “multiplicador” se deben entender en un sentido amplio. Todas estas funciones se pueden realizar mediante uno o varios circuitos electrónicos específicos alojados en una o varias tarjetas electrónicas. Estas funciones se pueden realizar en forma material y/o de software. En particular, los elementos 40, 41, 47, 48, 49, 46, 45, 50 y 37 se pueden integrar en una misma tarjeta electrónica que comprende uno o varios microcontroladores y/o microprocesadores.

En el ejemplo considerado, la relación de disminución de flujo es de 6, es decir, que la velocidad máxima de rotación del rotor es de seis veces la velocidad de base, y por ejemplo de 1350 vueltas por minuto aproximadamente.

- 25 Evidentemente, no se sale del marco de la presente invención si la relación de disminución de flujo es diferente de 6, en particular es superior o igual a 2 por ejemplo. Por tanto, se dimensionan los interruptores electrónicos 60 del ondulator 35 en consecuencia.

Evidentemente, la invención no está limitada al ejemplo de realización que acaba de ser descrito. Por ejemplo, se puede realizar la máquina eléctrica de manera diferente siempre que se tenga  $X_d > X_q$ .

- 30 En toda la descripción, la expresión “que comprende un” debe considerarse como sinónimo de “que comprende por lo menos un”, salvo que se especifique lo contrario.

REIVINDICACIONES

1. Máquina eléctrica síncrona que comprende:
- un estator (10), y
  - por lo menos un rotor (20) de imanes permanentes (21),
- 5 siendo el rotor (20) un rotor de concentración de flujo, estando los imanes permanentes (21) del rotor dispuestos entre unas piezas polares (22), comprendiendo cada una de las piezas polares (22) del rotor (20) una parte sobresaliente (27) que se extiende en dirección del estator (10) y que presenta una cara vuelta hacia el estator (10) que presenta una parte convexa (24) y dos bordes radiales (28) que están desplazados angularmente con respecto a unos bordes (29) radiales de los imanes permanentes (21) adyacentes a cada una de dichas piezas polares (22),
- 10 formando las partes sobresalientes de dos piezas polares sucesivas entre sí una muesca que presenta dos de dichos bordes radiales (28) opuestos y un fondo parcialmente formado por una cara circunferencial de por lo menos un imán permanente, situándose dicho imán permanente (21) radialmente retirado hacia atrás de extremos circunferenciales de partes convexas (24) de dos piezas polares adyacentes (22),
- 15 presentando la parte convexa (24) de una pieza polar (22) del rotor un radio de curvatura comprendido entre el 20% y el 30% del radio interior (R) del estator,
- provocando dicha forma de las piezas polares una asimetría entre las reactancias directa  $X_d$  y en cuadratura  $X_q$  y una diferencia positiva entre las reactancias directa y en cuadratura tal que  $X_d > X_q$ .
2. Máquina según la reivindicación 1, caracterizada porque  $X_d/X_q > 1,1$ , mejor  $X_d/X_q > 1,5$ .
3. Máquina según la reivindicación 2, caracterizada porque  $X_d/X_q \cong 3$ .
- 20 4. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque  $X_q I_0/E$  está comprendido entre 0,33 y 0,6, en el que  $I_0$  designa la intensidad máxima de la corriente de línea impuesta por el calibre de un variador y E la fuerza electromotriz inducida por fase de la máquina.
5. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque  $X_d I_0/E$  está comprendido entre 0,66 y 1, en el que  $I_0$  designa la intensidad máxima de la corriente de línea impuesta por el calibre de un variador y E la fuerza electromotriz inducida por fase de la máquina.
- 25 6. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque el estator (10) comprende unos dientes (11) que soportan cada uno por lo menos una bobina individual (12).
7. Máquina según la reivindicación anterior, caracterizada porque los dientes (11) del estator (10) están desprovistos de expansiones polares.
- 30 8. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque unos extremos circunferenciales (25) de la parte convexa (24) de una pieza polar (22) están desplazados angularmente con respecto a los imanes permanentes (21) adyacentes a esta pieza polar (22).
9. Máquina según la reivindicación anterior, caracterizada porque el desplazamiento angular  $\beta$  de los extremos circunferenciales (25) con respecto a los imanes permanentes (21) adyacentes está comprendido:
- 35 - entre  $\frac{80^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{100^\circ}{n_{dientes}}$  siendo en particular de aproximadamente  $\frac{90^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina cuya relación entre el número de dientes  $n_{dientes}$  del estator y el número de polos  $n_{polos}$  del rotor es de 3/2 o que verifica la relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n-2}$ , siendo n un número entero superior o igual a 2, y
- entre  $\frac{50^\circ}{n_{dientes}}$  y  $\frac{70^\circ}{n_{dientes}}$  siendo en particular de aproximadamente  $\frac{60^\circ}{n_{dientes}}$ , para una máquina que verifica la relación  $\frac{n_{dientes}}{n_{polos}} = \frac{6n}{6n+2}$ , siendo n un número entero superior o igual a 2.
- 40 10. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque la retirada hacia atrás (r) en la dirección radial de los imanes (21) con respecto a unos extremos circunferenciales (25) de las partes convexas (24) está comprendida entre el 10% y el 20% del radio interior (R) del estator (10).

11. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque cada una de las piezas polares (22) del rotor (20) comprende dos rebordes (26), situándose por lo menos un imán permanente (21) entre los rebordes de dos piezas polares (22) adyacentes.
- 5 12. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque los imanes permanentes (21) presentan, cuando se observa la máquina según el eje (X) de rotación del rotor, una sección transversal de forma alargada de eje longitudinal que se extiende en una dirección radial.
13. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque los imanes permanentes (21) del rotor (20) presentan, cuando se observa la máquina según el eje (X) de rotación del rotor, una sección transversal rectangular de lado mayor orientado paralelamente a un radio de la máquina.
- 10 14. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque el estator (10) comprende  $6n$  dientes (11) y el rotor (20)  $6n \pm 2$  polos (22), siendo  $n$  superior o igual a 2.
15. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque comprende un solo rotor interior.
- 15 16. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque la potencia de la máquina es superior o igual a 0,5 kW.
17. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizada porque constituye un generador.
18. Máquina según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16, caracterizada porque constituye un motor.

