

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 464 565**

51 Int. Cl.:

H02P 21/12 (2006.01)

H02P 21/14 (2006.01)

H02P 25/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.06.2011** **E 11738594 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.04.2014** **EP 2589142**

54 Título: **Identificación de perfil de inductancia de generador de imán permanente**

30 Prioridad:

29.06.2010 US 359629 P
29.06.2010 DK 201070300

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
03.06.2014

73 Titular/es:

VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 44
8200 Aarhus N, DK

72 Inventor/es:

CAO, SHU, YU;
TRIPATHI, ANSHUMAN;
FONN, SWEE, YEE;
ANBARASU, RAMASAMY y
GUPTA, AMIT, KUMAR

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 464 565 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

Identificación de perfil de inductancia de generador de imán permanente

Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a la identificación del perfil de inductancia de un generador de imán permanente (PM), usando el bucle de control vectorial de flujo de estátor o de corriente de estátor.

Antecedentes de la invención

Los generadores de PM y, en particular, los generadores de imanes permanentes interiores (IPM), tienen la ventaja de una alta eficacia de conversión de energía y de una estructura mecánica robusta.

La carga de un generador de PM con una energía eléctrica de valor y calidad deseados puede incluir dos cuestiones:

- 10 1. Los parámetros de los generadores podrían ser incongruentes con el valor indicado y variar de un fabricante a otro, y
2. Parámetros tales como las inductancias de máquinas son sumamente dependientes de las condiciones de carga de las máquinas, según lo descrito en el documento US 2008 129243, que determina posiciones de rotor en base a las variaciones de inductancia, según lo expresado por las relaciones entre el flujo magnético y la corriente de un estátor.

15 En particular, las inductancias de máquina dependientes de la carga dificultan lograr una eficacia optimizada durante el funcionamiento. Además, la estabilidad del sistema podría verse sumamente afectada si el parámetro del generador se desvía demasiado de su valor indicado.

Por tanto, existe la necesidad de una determinación sobre la marcha de los parámetros de generador, en particular una determinación sobre la marcha de perfiles de inductancia de máquinas.

20 Puede verse como un objeto de las realizaciones de la presente invención proporcionar un procedimiento para la identificación de perfiles de inductancia de generador sobre la marcha, usando el bucle de control vectorial del flujo de estátor o de la corriente de estátor.

Descripción de la invención

La presente invención se refiere a un nuevo enfoque para la identificación de perfiles de inductancia de generadores de PM, usando el bucle de control vectorial del flujo de estátor o de la corriente de estátor.

25 Las ventajas de la solución propuesta de acuerdo con la presente invención son:

(1) La invención mitiga el riesgo de inestabilidad del control de energía debida a parámetros de máquina incongruentes con el valor nominal dado por los diseñadores de la máquina.

30 (2) La invención rastrea eficazmente la inductancia del generador para todas las condiciones operativas a lo largo de la curva de energía. Esto hace que la carga de la energía eléctrica sea fiable con independencia del tipo de generador, e independiente de la condición operativa.

(3) El procedimiento de acuerdo con la presente invención puede ser usado para evaluar el diseño de la máquina y dar una retroalimentación valiosa para mejorar el diseño del generador.

35 (4) El procedimiento para la identificación de inductancia del estátor, de acuerdo con la presente invención, es general y puede ser aplicado tanto para un generador de imán permanente montado en superficie (SPM) como para un generador de imán permanente interior (IPM), ya que el mismo observador de flujo y medición de corriente podrían ser aplicados tanto para el SPM como para el IPM. El SPM puede ser tratado como una máquina de IPM con una razón de prominencia muy pequeña.

40 (5) El procedimiento de acuerdo con la presente invención puede ser aplicado tanto para un sistema de control vectorial de flujo de estátor como para un sistema de control vectorial de corriente de estátor. Para ambos sistemas de control se aplica un observador de flujo de estátor en modalidad de voltaje, de modo que el efecto del valor inexacto de inductancia de estátor usado en el control es eliminado en el proceso de identificación.

(6) El procedimiento propuesto de identificación de perfil de inductancia de estátor, de acuerdo con la presente invención, puede ser implementado como un algoritmo de software que puede ser fácilmente integrado en el proceso de arranque del convertidor, sin coste adicional de hardware.

45 (7) Se propone un procedimiento sencillo y fiable de medición de amplitud de respuesta sinusoidal para evitar usar la FFT o un algoritmo complicado de detección de máximos.

(8) El efecto de la variación de inductancia del estátor debido a la saturación del circuito magnético con alta corriente puede ser eliminado aplicando los resultados de la identificación en el control, lo que posibilita lograr prestaciones de control estables y optimizadas incluso para el IPM con alta razón de prominencia.

5 La estimación precisa del flujo de estátor es posible usando el observador de flujo de estátor en la modalidad de corriente, después de que haya sido identificado y aplicado el perfil de inductancia del estátor. Esto posibilita aplicar el control de flujo de estátor a una velocidad extremadamente baja en la aplicación del impulso directo de un WTG.

Así, en un primer aspecto la presente invención se refiere a un procedimiento, de acuerdo con la reivindicación 1, para determinar una inductancia de una máquina de PM durante el funcionamiento de dicha máquina de PM, comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- 10 a) hacer funcionar una máquina de PM dentro de una ventana de velocidad de rotación predeterminada,
- b) aumentar el nivel de Corriente Continua de una primera señal de referencia, hasta que haya sido alcanzado un primer nivel deseado de corriente,
- c) calcular un nivel de Corriente Continua de una segunda señal de referencia, usando una restricción limitadora de voltaje, para asegurar que se proporcione suficiente corriente debilitadora de campo en el proceso del
- 15 aumento del nivel de la Corriente Continua de la primera señal de referencia,
- d) añadir una primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo al nivel de Corriente Continua, tanto de la primera señal de referencia como de la segunda señal de referencia,
- e) calcular un primer valor de inductancia inducida de auto-saturación en respuesta a la primera señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho primer valor de inductancia inducida de
- 20 auto-saturación en un medio de memoria adecuado,
- f) calcular un primer valor de inductancia inducida de saturación cruzada en respuesta a la primera señal aplicada de prueba dependiente del tiempo, y almacenar dicho primer valor de inductancia inducida de saturación cruzada en el medio de memoria,
- g) eliminar la primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo,
- 25 h) repetir las etapas b) a g) hasta que la inductancia inducida de auto-saturación y la inductancia inducida de saturación cruzada hayan sido calculadas y almacenadas para un número predeterminado de primeros niveles de corriente, y
- i) eliminar la primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo y reducir el nivel de Corriente Continua de la primera señal de referencia hasta el valor cero.
- 30 El procedimiento de acuerdo con el primer aspecto puede comprender adicionalmente las etapas de:
- a) aumentar el nivel de Corriente Continua de las señales de referencia primera y segunda hasta que hayan sido alcanzados los niveles deseados de corriente,
- b) añadir una señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo al nivel de Corriente Continua, tanto de la primera señal de referencia como de la segunda señal de referencia,
- 35 c) calcular un segundo valor de inductancia inducida de auto-saturación en respuesta a la segunda señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho segundo valor de inductancia inducida de auto-saturación en el medio de memoria,
- d) calcular un segundo valor de inductancia inducida de saturación cruzada, en respuesta a la segunda señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho segundo valor de inductancia
- 40 inducida de saturación cruzada en el medio de memoria,
- e) eliminar la segunda señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo,
- f) repetir las etapas c) a e) hasta que la inductancia inducida de auto-saturación y la inductancia inducida de saturación cruzada hayan sido calculadas y almacenadas para un número predeterminado de segundos niveles de corriente, y
- 45 g) eliminar la segunda señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y reducir las señales de referencia de Corriente Continua hasta el valor cero.

Las señales de referencia de Corriente Continua, con la señal de Corriente Alterna añadida, pueden ser convertidas en

señales de referencia del flujo de estátor usando la inductancia L_d nominal y la L_q nominal cuando el procedimiento es aplicado a un generador de PM controlado por un controlador de flujo de estátor.

Alternativamente, las señales de referencia de Corriente Continua, con señal de Corriente Alterna añadida, pueden ser señales de referencia de corriente de estátor cuando el procedimiento es aplicado a un generador de PM controlado por el controlador de corriente de estátor.

La identificación de inductancia del estátor puede ser implementada como parte del proceso de arranque del generador de PM antes de que se cierre un bucle de control de energía. El mismo controlador de flujo de estátor o el controlador de corriente de estátor pueden hacerse funcionar en la modalidad normal de control de energía después de que se haya completado la identificación de la inductancia del estátor.

Un observador de flujo de estátor en modalidad de voltaje puede ser aplicado para obtener la señal de flujo del estátor en el proceso de identificación de la inductancia del estátor, tanto para el sistema de control de flujo de estátor como para el sistema de control de corriente de estátor.

El valor de inductancia inducida de auto-saturación del eje q (o del eje d), puede ser calculado como la razón entre la respuesta de Corriente Alterna de la señal de flujo de estátor del eje q (o del eje d) y la respuesta de Corriente Alterna de la correspondiente señal de corriente de estátor del eje q (o del eje d) en un número predeterminado de niveles de Corriente Continua de la corriente del eje q (o del eje d), con el nivel de Corriente Continua de la corriente del eje d (o del eje q) fijado más cerca del valor cero.

De manera similar, el valor de inductancia inducida de saturación cruzada del estátor del eje q (o del eje d) puede ser calculado como la razón entre la respuesta de Corriente Alterna de la señal del flujo del estátor del eje q (o del eje d) y la respuesta de Corriente Alterna de la correspondiente señal de corriente del estátor del eje q (o del eje d) en un número predeterminado de niveles de Corriente Continua de la corriente del eje d (o del eje q), con el nivel de Corriente Continua de la corriente del eje q (o del eje d) fijado más cerca del valor cero.

En el proceso de identificación de inductancia del estátor, las correspondientes corrientes del estátor pueden ser llevadas desde el nivel de baja corriente al nivel de alta corriente por las correspondientes señales de referencia de Corriente Continua, de modo que la gama total de la corriente de funcionamiento del generador de PM puede ser cubierta en el proceso de identificación del perfil de inductancia.

La identificación de la inductancia del estátor puede ser llevada a cabo en la ventana predeterminada de la velocidad de rotación. La velocidad debería ser escogida lo bastante alta como para asegurar que el flujo de estátor obtenido a partir del observador de flujo de estátor en modalidad de voltaje sea exacto, y para permitir que se aplique una gran corriente en el proceso de identificación de la inductancia del estátor, sin superar el límite de torsión mecánica. La velocidad debería ser escogida como inferior a la velocidad de funcionamiento debilitadora de campo de la máquina de PM y, por otro lado, para permitir que se aplique una gran corriente de estátor en el proceso de identificación sin superar el límite de energía del sistema de control del generador.

En una realización del procedimiento de acuerdo con la presente invención, la señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, añadida a las señales de referencia de Corriente Continua, es una señal sinusoidal de frecuencia fija. Sin embargo, otros tipos de señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, como la señal cuadrada o la señal triangular de frecuencia fija, pueden ser aplicados asimismo como una señal de excitación. La frecuencia de la señal de prueba de Corriente Alterna es escogida en la gama entre 30 Hz y 100 Hz, para minimizar la indeseada ondulación de torsión de baja frecuencia, inducida en el proceso de identificación de inductancia. Para un cálculo fiable del valor de inductancia, la frecuencia de la señal de prueba de Corriente Alterna debería ser fijada por debajo del ancho de banda del correspondiente controlador de flujo de estátor o del controlador de corriente de estátor, para asegurar una suficiente respuesta de Corriente Alterna en la corriente del estátor y el flujo del estátor. La amplitud de la señal de prueba de Corriente Alterna se escoge de modo que la respuesta de corriente para la Corriente Alterna esté alrededor de entre el 10% y el 20% de la corriente nominal de la máquina.

En una realización, las amplitudes de respuesta de Corriente Alterna del flujo del estátor y de la corriente del estátor pueden ser calculadas a partir de la señal ortogonal generada por el filtro resonante en la frecuencia de inyección y un filtro de desplazamiento de fase de 90°. La componente de Corriente Continua del flujo del estátor y de la corriente del estátor puede ser eliminada por el filtro resonante. Sin embargo, también puede ser usado otro procedimiento de medición de amplitud de respuesta de Corriente Alterna con el mismo fin.

Los números predeterminados de niveles de corriente primeros y segundos pueden ser decididos por la resolución deseada del perfil de inductancia del estátor, la gama de corrientes del estátor para la identificación de inductancia y el tiempo empleado en la identificación de la inductancia del estátor. Normalmente, un nivel de corriente entre 4 y 10 debería ser suficiente.

La primera corriente deseada puede corresponder a una corriente de estátor del eje q, y la segunda corriente deseada

puede corresponder a una corriente de estátor del eje d. En consecuencia, la primera referencia de Corriente Continua es la correspondiente a una referencia de corriente de estátor de eje q, y la segunda referencia de Corriente Continua es la correspondiente a una referencia de corriente de estátor de eje d. Por lo tanto, el primer valor de inductancia de auto-saturación almacenado es el correspondiente a un punto en el perfil "Lq" de inductancia del estátor del eje q, con respecto a un nivel de Corriente Continua de la corriente del eje q, y el segundo valor de inductancia de auto-saturación almacenado es el correspondiente a un punto en el perfil "Ld" de inductancia del estátor del eje d, con respecto a un nivel de Corriente Continua de la corriente del eje d. De manera similar, el primer valor de inductancia de saturación cruzada almacenado es el correspondiente a un punto en el perfil "Ld_CC" de inductancia del estátor de eje d con respecto a un nivel de Corriente Continua de la corriente del eje q, y el segundo valor de inductancia de auto-saturación almacenado es el correspondiente a un punto en el perfil "Lq_CC" de inductancia del estátor del eje q con respecto a un nivel de Corriente Continua de la corriente del eje d.

Determinados datos del perfil de inductancia del estátor pueden ser procesados, ya sea en línea o fuera de línea, para obtener las funciones de inductancia del estátor con respecto a su corriente de auto-saturación y a su corriente de saturación cruzada. Las funciones de inductancia del estátor así obtenidas pueden ser aplicadas en el control de energía del generador para optimizar las prestaciones de control de la máquina de PM, tanto para el sistema de control de flujo de estátor como para el sistema de control de corriente de estátor. La función de inductancia del estátor puede ser aplicada para mejorar la precisión del observador del flujo del estátor en modalidad de corriente, para que el sistema de control del flujo del estátor mejore sus prestaciones en el funcionamiento con carga pesada y baja velocidad.

En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un producto de programa de ordenador para llevar a cabo el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores cuando dicho producto de programa de ordenador es ejecutado en un ordenador.

Breve descripción de los dibujos

La presente invención será ahora explicada en mayor detalle con referencia a los dibujos adjuntos, en los que

la Fig. 1 ilustra la identificación del perfil de inductancia de un controlador de generador de PM aplicado al sistema de retroalimentación vectorial del flujo del estátor,

la Fig. 2 ilustra la identificación del perfil de inductancia de un controlador de generador de PM aplicado al sistema de retroalimentación vectorial de corriente del estátor,

la Fig. 3 muestra un procedimiento de medición de amplitud de respuesta sinusoidal que usa un filtro resonante y un filtro de desplazamiento de fase de 90° para una frecuencia fija de señal,

la Fig. 4 muestra un procedimiento generalizado para la identificación del perfil de inductancia del estátor,

la Fig. 5 ilustra las respuestas de señales de la corriente de estátor medida y del flujo de estátor estimado de una máquina de IPM en el proceso de identificación de inductancia del estátor,

la Fig. 6 ilustra las respuestas de señales del flujo de estátor medido y de la corriente del estátor de una máquina de IPM en el proceso de identificación del valor "Lq" de inductancia inducida de auto-saturación y del valor "Ld" de inductancia inducida de saturación cruzada, con un nivel de corriente de prueba $ISQ = ISQ_{test}$ e $ISD \approx 0$, y

la Fig. 7 ilustra las respuestas de señales del flujo de estátor medido y de la corriente del estátor de una máquina de IPM en el proceso de identificación del valor "Ld" de inductancia inducida de auto-saturación y del valor "Lq" de inductancia inducida de saturación cruzada, con un nivel de corriente de prueba $ISD = ISD_{test}$ e $ISQ \approx 0$.

Si bien la invención es susceptible a diversas modificaciones y formas alternativas, las realizaciones específicas han sido mostradas a modo de ejemplos en los dibujos y serán descritas en detalle en el presente documento. Deberá entenderse, sin embargo, que la invención no está concebida para estar limitada a las formas específicas reveladas. En cambio, la invención ha de cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que caigan dentro del espíritu y el alcance de la invención, según lo definido por las reivindicaciones adjuntas. La aplicación de esta invención no está limitada a una máquina de generador de turbina eólica, sino que se extiende a aplicaciones de alta torsión y baja velocidad, como los elevadores y aparatos transportadores que utilizan máquinas de PM que funcionan usualmente en la operación en modalidad motriz.

Descripción detallada de la invención

Una realización de la presente invención describe un procedimiento sencillo para la identificación de perfiles de inductancia de máquinas de IPM, en base a la observación del flujo del estátor en modalidad de voltaje, que podría ser fácilmente aplicada en aplicaciones de turbinas eólicas, tanto para un sistema de control de retroalimentación vectorial de flujo de estátor como para un sistema de control de retroalimentación vectorial de corriente.

El fundamento del procedimiento propuesto es la ecuación del flujo del estátor en el entorno d-q de referencia del flujo del rotor, según lo descrito usando las ecuaciones (1) y (2).

$$\Psi_{sd} = L_d(i_{sd}, i_{sq}) * i_{sd} + \omega_r \quad (1)$$

$$\Psi_{sq} = L_q(i_{sd}, i_{sq}) * i_{sq} \quad (2)$$

- 5 La inductancia del estátor, debida al efecto de auto-saturación al nivel de la corriente del estátor del eje d (indicado como "ISD_Test") y al nivel de la corriente del estátor del eje q (indicado como "ISQ_Test"), puede ser obtenida a partir de la ecuación (3) y la ecuación (4).

$$L_d(i_{sd}, i_{sq} \approx 0) = \frac{\partial \Psi_{sd}}{\partial i_{sd}} \Big|_{i_{sd}=ISD_Test} \quad (3)$$

$$L_q(i_{sd} \approx 0, i_{sq}) = \frac{\partial \Psi_{sq}}{\partial i_{sq}} \Big|_{i_{sq}=ISQ_Test} \quad (4)$$

De manera similar, la inductancia del estátor debida al efecto de saturación cruzada puede ser obtenida como:

$$L_{d_CC}(i_{sd} \approx 0, i_{sq}) = \frac{\partial \Psi_{sd}}{\partial i_{sd}} \Big|_{i_{sq}=ISQ_Test} \quad (5)$$

$$L_{q_CC}(i_{sd}, i_{sq} \approx 0) = \frac{\partial \Psi_{sq}}{\partial i_{sq}} \Big|_{i_{sd}=ISD_Test} \quad (6)$$

- 10 La Fig. 1 y la Fig. 2 ilustran los esquemas de identificación de inductancia del estátor del generador de PM, respectivamente, para el control de retroalimentación vectorial del flujo del estátor y el sistema de control de retroalimentación vectorial de la corriente del estátor.

El procedimiento de identificación de parámetros de máquina es independiente de la estrategia de control empleada.

- 15 Tanto para el sistema de control de flujo del estátor como para el sistema de control de retroalimentación de la corriente del estátor, la identificación del perfil de inductancia del estátor es realizada usando los resultados de la estimación del flujo del estátor obtenidos a partir del observador de flujo del estátor en modalidad de voltaje, que es insensible a la variación de inductancia del estátor. La identificación del perfil de inductancia del estátor es llevada a cabo en una ventana de velocidad adecuada. La velocidad debería ser lo bastante alta como para asegurar una estimación fiable y precisa del flujo del estátor a partir del observador del flujo del estátor en modalidad de voltaje, y para evitar superar el límite de torsión del sistema generador cuando se aplica alta corriente en el proceso de identificación. La velocidad no debería ser demasiado alta para permitir que se aplique una corriente suficientemente alta en el proceso de identificación sin superar el límite de energía máximo del sistema generador. Si es posible, la ventana de velocidad debería ser fijada por debajo de la velocidad de funcionamiento debilitadora de campo, de modo que la corriente del estátor del eje q pueda ser llevada hasta un nivel suficientemente alto como para probar el efecto de saturación del generador con la corriente del estátor del eje d más cercana al valor cero.

- 20 La identificación del perfil de inductancia del estátor es llevada a cabo, principalmente, en una ventana de alta velocidad con un observador aplicado del flujo del estátor en modalidad de voltaje. Sin embargo, ha de observarse que, en el control normal de producción de energía, los resultados de la identificación de la inductancia del estátor se aplican para mejorar las prestaciones de control en condiciones de carga tanto ligeras como pesadas. En la práctica, el procesamiento en línea, o fuera de línea, del perfil identificado de inductancia del estátor es llevado a cabo de modo que la inductancia del estátor pueda ser representada como una función de las correspondientes corriente de auto-saturación y corriente de saturación cruzada, para este fin.

30 Cuando la identificación de la inductancia del estátor es implementada en el sistema de control del flujo del estátor, como se muestra en la Fig. 1, el bloque de generación de referencia del flujo del estátor y el bloque de cálculo de la

inductancia del estátor son activados junto con el bloque controlador del flujo del estátor. La energía del generador es directamente controlada desde las referencias generadas del flujo del estátor. Las señales de referencia de la corriente para la generación de energía del campo magnético (indicadas como "IS_FP_REF") y la desmagnetización (indicadas como "IS_MAG_REF"), con la señal sinusoidal de prueba inyectada, son convertidas en las señales de referencia del flujo (indicadas como "flux_FP_REF" y "flux_MAG_REF") usando el valor L_d nominal y el valor L_q nominal. Las señales de referencia de flujo resultantes son suministradas al bloque debilitador de campo basado en la limitación del voltaje. La señal sinusoidal de referencia del flujo del estátor es por tanto inyectada al sistema de control del flujo del estátor de la máquina de PM. Las señales de referencia del flujo del estátor son luego suministradas al controlador proporcional-integral (PI) de corrección de referencia del flujo del estátor. Las referencias resultantes del flujo del estátor después del control de corrección son luego convertidas en un entorno estático de referencia. La salida del controlador vectorial del flujo del estátor son señales de referencia del voltaje, que son suministradas al modulador de PWM [Modulación de Ancho de Pulso]. La señal de barrera del convertidor es generada por el modulador de PWM. Finalmente, el bucle de control de retroalimentación vectorial del flujo del estátor se cierra en un entorno estático de referencia, usando la señal de retroalimentación observada del flujo del estátor. El valor de inductancia del estátor es calculado usando la señal medida de la corriente del estátor y la señal observada del flujo del estátor en el bloque de cálculo de la inductancia del estátor. En este bloque, la señal del flujo del estátor y la señal de la corriente del estátor son transferidas primero al entorno de referencia d-q del flujo del rotor. Después, se extrae la amplitud de respuesta sinusoidal, tanto de la señal del flujo del estátor como de la señal de la corriente del estátor. Por último, se calcula la inductancia del estátor como la razón entre la amplitud de respuesta sinusoidal del flujo del estátor y la señal de la corriente del estátor. La amplitud sinusoidal de respuesta de la señal de corriente del estátor está limitada a estar por encima de 1uA para evitar la cuestión de la división entre cero en el cálculo de razones.

Cuando la identificación de la inductancia del estátor es implementada en el sistema de control de la corriente del estátor, según se muestra en la Fig. 2, el bloque de generación de referencia de la corriente del estátor y el bloque del cálculo de la inductancia del estátor son activados junto con el controlador de la corriente del estátor. La energía del generador está directamente controlada por las referencias de corriente generadas. Las señales de referencia de corriente, con la señal sinusoidal de prueba inyectada, son suministradas al bloque debilitador de campo basado en la limitación del voltaje. La señal sinusoidal de referencia de corriente del estátor es por tanto inyectada al sistema de control de la corriente del estátor de la máquina de PM. El control de retroalimentación vectorial de la corriente del estátor es cerrado con la señal medida de retroalimentación de la corriente del estátor, en el entorno d-q de referencia del flujo del rotor. Las señales del voltaje del estátor son luego convertidas en un entorno de referencia estático, y suministradas al modulador de PWM. Para el sistema de control de corriente del estátor, el observador del flujo del estátor en modalidad de voltaje es implementado en el bloque de cálculo de inductancia del estátor. La parte restante del cálculo del valor de inductancia del estátor es la misma que para el sistema de control del flujo del estátor.

Una descripción más detallada del procedimiento de identificación de inductancia del estátor se da a continuación.

El procedimiento según la presente invención usa el control de bucle cerrado del flujo, o la corriente, para aumentar / reducir la corriente del estátor del eje d o del eje q hasta el nivel deseado de amplitud de Corriente Continua, cambiando la señal de referencia del flujo / corriente del estátor, monitorizando a la vez la correspondiente corriente medida del estátor del eje d o del eje q.

En el proceso de aumentar / reducir el nivel de Corriente Continua de la corriente del estátor del eje q, se aplica una restricción limitadora del voltaje para evitar que el modulador de PWM funcione en la gama de modulación no lineal, proporcionando la corriente suficiente del campo debilitador del eje d, si es necesario, a alta velocidad, en el proceso de identificación de la inductancia del estátor. Para mayor simplicidad, en el proceso de aumentar / reducir el nivel de corriente del estátor del eje d, la referencia del flujo, o la corriente, del estátor del eje q se fija en cero, ya que en este caso la restricción limitadora del voltaje se satisface naturalmente.

Cuando se alcanza el nivel deseado de corriente del estátor del eje d o del eje q, se inyecta una señal sinusoidal de perturbación de referencia del flujo, o la corriente, del estátor, de frecuencia fija y de pequeña amplitud, en el sistema de control del flujo, o la corriente, del estátor. La correspondiente inductancia del estátor del eje d o del eje q, incluyendo el efecto de auto-saturación y el efecto de saturación cruzada, se calcula luego usando las ecuaciones (7) a (10) a partir de la respuesta sinusoidal de las correspondientes señales del flujo del estátor y de la corriente del estátor.

$$L_d(i_{sd}, i_{sq} \approx 0) = \frac{FLUX_D_AC_AMP}{ISD_AC_AMP} \Big|_{i_{sd}=ISD_TEST} \quad (7)$$

$$L_{q_CC}(i_{sd}, i_{sq} \approx 0) = \frac{FLUX_Q_AC_AMP}{ISQ_AC_AMP} \Big|_{i_{sd}=ISD_TEST} \quad (8)$$

$$L_q(i_{sd} \approx 0, i_{sq}) = \frac{FLUX_Q_AC_AMP}{ISQ_AC_AMP} \Big|_{i_{sq}=ISQ_TEST} \quad (9)$$

$$L_{d_CC}(i_{sd} \approx 0, i_{sq}) = \frac{FLUX_D_AC_AMP}{ISD_AC_AMP} \Big|_{i_{sq}=ISQ_TEST} \quad (10)$$

5 Tanto para el control vectorial del flujo del estátor como para el control vectorial de la corriente del estátor, se usa el observador del flujo del estátor en modalidad de voltaje para la estimación de la inductancia del estátor. El principio detrás de la observación del flujo del estátor en la modalidad de voltaje está representado como las ecuaciones (11) y (12) en el entorno de referencia α/β estático del estátor.

$$\Psi_{s\alpha} = \int (U_{s\alpha} - R_s * i_{s\alpha}) dt \quad (11)$$

$$\Psi_{s\beta} = \int (U_{s\beta} - R_s * i_{s\beta}) dt \quad (12)$$

10 Para simplificar la implementación, las señales de comando $U^*_{s\alpha}$, $U^*_{s\beta}$ del voltaje del estátor (señales de entrada del modulador de PWM) podrían ser usadas como señales del voltaje del estátor para la observación del flujo del estátor en la modalidad de voltaje.

Podrían usarse diversas técnicas conocidas para eliminar la deriva de integración debida al desfase de la Corriente Continua de la medición de corriente del estátor, por parte del observador del flujo del estátor en modalidad de voltaje, y para minimizar el efecto del error de cuantización de control. Un posible enfoque que puede lograr este fin es el observador de flujo en modalidad de voltaje y en base a filtros de paso bajo adaptable, dado en las ecuaciones (13) y (14), donde "V_VM" es un coeficiente para modelar la respuesta de la magnitud del filtro de paso bajo en una gama baja de frecuencias, y ω_{em} es la velocidad angular eléctrica del rotor, estimada a partir de la medición de la posición del codificador.

$$\Psi_{s\alpha} = \frac{(u^*_{s\alpha} - R_s * i_{s\alpha}) + K_VM * (u^*_{s\beta} - R_s * i_{s\beta})}{s + \omega_{em} * K_VM} \quad (13)$$

$$\Psi_{s\beta} = \frac{(u^*_{s\beta} - R_s * i_{s\beta}) - K_VM * (u^*_{s\alpha} - R_s * i_{s\alpha})}{s + \omega_{em} * K_VM} \quad (14)$$

20 El vector de salida $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$ de flujo del estátor, emitido desde el observador del flujo del estátor en modalidad de voltaje, es transferido a la referencia de la Corriente Continua de referencia del flujo del rotor, usando las ecuaciones (15) y (16), donde θ_{em} es el ángulo eléctrico del flujo del rotor con respecto al eje α del entorno de referencia estático del estátor.

$$\Psi_{sd} = \Psi_{s\alpha} * \cos \theta_{em} + \Psi_{s\beta} * \sen \theta_{em} \quad (15)$$

$$\Psi_{sq} = -\Psi_{sq} * \sin \theta_{em} + \Psi_{sp} * \cos \theta_{em} \quad (16)$$

Para el esquema de control basado en el control vectorial del flujo del estátor, el vector de referencia del flujo del estátor es generado aplicando la restricción limitadora del voltaje, descrita en la ecuación (17), donde "modu_max" es el máximo índice permitido de modulación de PWM y "Udc" es la señal del voltaje del enlace de Corriente Continua. La señal de Entrada es la señal de referencia del flujo del estátor de la potencia de campo (indicada como FLUX_FP_REF). La señal de salida es la referencia del flujo de magnetización del estátor (indicada como FLUX_MAG_REF).

$$FLUX_MAG_REF = \min \left(\Psi_r, \sqrt{\left(\text{modu_max} * \frac{U_{dc}}{\sqrt{3} * \omega_{em}} \right)^2 - (FLUX_FP_REF)^2} \right) \quad (17)$$

Para el esquema de control basado en el control vectorial de la corriente del estátor, el vector de referencia de la corriente del estátor es generado aplicando la restricción limitadora del voltaje descrita en la ecuación (18), donde "Ld_nom" y "Lq_nom" son los valores de inductancia nominales del estator del eje d y del eje q, y Ψ_r es la amplitud magnética del flujo del rotor. La señal de Entrada es la señal de referencia de la corriente del estátor del eje q (indicada como ISQ_REF). La señal de salida es la referencia de la corriente del eje d del estátor (indicada como ISD_REF).

$$ISD_REF = \min \left(0, -\frac{\Psi_r}{L_{d_nom}} + \sqrt{\left(\text{modu_max} * \frac{U_{dc}}{\sqrt{3} * \omega_{em} * L_{d_nom}} \right)^2 - \left(\frac{L_{q_nom} * ISQ_REF}{L_{d_nom}} \right)^2} \right) \quad (18)$$

La Fig. 3 muestra un procedimiento sencillo y efectivo para la medición de la amplitud sinusoidal de respuesta para las señales de flujo / corriente del estátor del eje d o del eje q. La señal inyectada de perturbación sinusoidal tiene una frecuencia definida como f_Perturb, y la frecuencia angular de la señal inyectada está representada como $\omega_0 = 2\pi f_Perturb$. La señal de flujo / corriente del eje d o del eje q es suministrada a un filtro resonante para eliminar la componente de Corriente Continua y la componente de frecuencia distinta a la frecuencia de la señal de perturbación inyectada. La señal de salida del filtro resonante es luego desplazada 90° en fase usando un filtro de desplazamiento de fase. La amplitud de respuesta sinusoidal de la señal es calculada a partir de las señales ortogonales antes y después del desplazamiento de fase de 90°.

La función de transferencia del filtro resonante está dada por la ecuación (19), donde "x1" es la señal de entrada del filtro resonante, "y1" es la señal de salida del filtro resonante y "K" es el coeficiente de ajuste del ancho de banda resonante. La función de transferencia del filtro de desplazamiento de fase de 90° está dada en la ecuación (20), donde "y1" es la señal de entrada del filtro de desplazamiento de fase e "y2" es la señal de salida del filtro de desplazamiento de fase. La amplitud de la respuesta del seno de la señal "x1" (indicada como "X1_AC_AMP") es calculada a partir de la ecuación (21).

$$\frac{y1}{x1} = \frac{K * \omega_0 * s}{s^2 + K * \omega_0 * s + (\omega_0)^2} \quad (19)$$

$$\frac{y2}{y1} = \frac{s - \omega_0}{s + \omega_0} \quad (20)$$

$$x1_AC_AMP = \sqrt{(y2)^2 + (y1)^2} \quad (21)$$

La Fig. 4 ilustra el procedimiento de implementación general para la identificación del perfil de inductancia del estátor, que es aplicable tanto para un sistema de control vectorial del flujo del estátor como para un sistema de control vectorial de la corriente del estátor.

Para simplificar la implementación, el perfil "Lq" de auto-saturación y el perfil "Ld" de saturación cruzada pueden ser identificados por separado del perfil "Ld" de auto-saturación y del perfil "Lq" de saturación cruzada, en dos etapas secuenciales, según se describe a continuación.

La primera etapa es el proceso de la identificación del perfil "Lq" inducido de auto-saturación y del perfil "Ld_CC" inducido de saturación cruzada. En esta etapa, el nivel de referencia del flujo, o la corriente, del estátor del eje q es ajustado de modo que la corriente del eje q sea aumentada hasta el nivel deseado de prueba de la corriente del eje q (indicado como "ISQ_Test"). La referencia del flujo, o la corriente, del eje d es calculada a partir de la restricción del límite de voltaje, con una mínima corriente aplicada del eje d, suficiente para mantener el modulador de PWM funcionando en la gama de modulación lineal cuando la velocidad es alta en el proceso de identificación. Cuando se alcanza el nivel deseado de la corriente de prueba del eje q, se inyecta una señal de perturbación sinusoidal de pequeña amplitud en la referencia del flujo, o la corriente, del estátor, tanto del eje d como del eje q. Se aplica un cierto retardo temporal para esperar a que desaparezca la dinámica de transición del sistema. Después, el "Lq" calculado es almacenado en la tabla de perfiles "Lq" de auto-saturación y el "Ld" calculado es almacenado en la tabla de perfiles "Ld_CC" de saturación cruzada. Cuando se obtiene la medición de inductancia en un nivel "ISQ_Test", se elimina la inyección de la perturbación sinusoidal individual. Luego, después de que haya desaparecido la transición de la señal, la corriente del estátor del eje q (puede aplicarse el filtrado de paso bajo para eliminar el ruido de la medición) es almacenada en la tabla ISQ correspondiente a la tabla de perfiles "Lq" y "Ld_CC". Las referencias del flujo, o la corriente, del estátor son aumentadas / reducidas hasta el próximo nivel de corriente "ISQ_Test", y el proceso se repite hasta que haya sido completada la medición del perfil de inductancia en todos los niveles de corriente de prueba ISQ. Después, las referencias de flujo / corriente del estátor son reducidas a cero y de tal modo se completa la primera etapa para la identificación del perfil de inductancia del estátor.

La segunda etapa es el proceso de la identificación del perfil "Ld" de auto-saturación y del perfil "Lq_CC" de saturación cruzada. En la segunda etapa, la identificación es realizada de manera similar a la del proceso de identificación de la primera etapa. La única diferencia es que la referencia del flujo, o la corriente, del estátor del eje q está más cerca de cero durante el proceso de aumento / reducción de la corriente de prueba del eje d (indicada como "ISD_Test").

El anterior proceso de identificación de la inductancia del estátor está ilustrado usando los datos de medición obtenidos en una máquina de IPM en el proceso de arranque del generador, para un sistema de control del flujo del estátor, en las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7.

La Fig. 5 muestra las señales medidas del flujo del estátor y de la corriente del estátor para la máquina de IPM, desde la etapa (1) a la etapa (2) del proceso de identificación de la inductancia del estátor. Las señales sinusoidales ortogonales para las correspondientes señales de la corriente del estátor o del flujo del estátor, después del filtro resonante y del filtro de desplazamiento en fase de 90°, también se dan en la Fig. 5.

La Fig. 6 muestra el gráfico ampliado de la Fig. 5 en la etapa (1) de identificación de la inductancia, en el nivel ISQ de corriente del estátor, alrededor de 2800A, y el ISD, alrededor de 100A. El valor "Lq" de inductancia inducida de auto-saturación y el valor "Ld" de inductancia inducida de saturación cruzada en ISQ = 2800A son, por tanto, identificados y almacenados en las correspondientes tablas de perfiles "Lq" y "Ld_CC".

La Fig. 7 muestra el gráfico ampliado de la Fig. 5 en la etapa (2) de identificación de la inductancia, en el nivel ISQ de corriente del estátor, alrededor de 500A, y el ISD de corriente del estátor, alrededor de 1700A. El valor "Ld" de inductancia inducida de auto-saturación y el valor "Lq" de inductancia inducida de saturación cruzada en el ISD = 1700A son, por tanto, identificados y almacenados en las correspondientes tablas de perfiles "Ld" y "Lq_CC".

Nomenclatura:

θ_m	Posición mecánica del rotor
θ_{em}	Posición eléctrica del rotor, estimada a partir de la medición de posición del codificador
ω_{em}	Velocidad angular eléctrica del rotor, estimada a partir de la medición de posición del codificador
Ψ_r	Amplitud magnética del flujo del rotor
U_{dc}	Voltaje del enlace de Corriente Continua
R_s	Resistencia del estátor
L_d	Inductancia efectiva del estátor del eje d
L_q	Inductancia efectiva del estátor del eje q
L_{d_NOM}	Inductancia nominal del estátor del eje d

(continuación)

L_{q_NOM}	Inductancia nominal del estátor del eje q
i^*_{FP} o IS_FP_REF	Referencia de corriente del estátor de la energía de campo
i^*_{MAG} o IS_MAG_REF	Referencia de corriente de magnetización
$i^*_{FP_AC}$ o $IS_FP_AC_REF$	Señal sinusoidal de referencia de prueba de la corriente de estátor de la energía de campo
$i^*_{mag_AC}$ o $IS_MAG_AC_REF$	Señal sinusoidal de referencia de prueba de la corriente de magnetización
$i^*_{FP_DC}$ o $IS_FP_DC_REF$	Nivel de magnitud de la señal de referencia de la corriente del estátor de la energía de campo usado en la prueba
$i^*_{mag_DC}$ o $IS_MAG_DC_REF$	Nivel de magnitud de la señal de referencia de la corriente de magnetización usado en la prueba
$\Psi^*_{FP_1}$ o $FLUX_FP_REF_1$	Referencia del flujo del estátor de la energía de campo, antes de aplicar la restricción de limitación del voltaje
$\Psi^*_{MAG_1}$ o $FLUX_MAG_REF_1$	Referencia del flujo de magnetización antes de aplicar la restricción de limitación de voltaje
Ψ^*_{FP} o $FLUX_FP_REF$	Referencia del flujo del estátor de la energía de campo, después de aplicar la restricción de limitación de voltaje
Ψ^*_{MAG} o $FLUX_MAG_REF$	Referencia del flujo de magnetización después de aplicar la restricción de limitación de voltaje
$i^*_{sd_AC}$ (o ISD_AC_REF)	Señal sinusoidal de referencia de la corriente del estátor del eje D
$i^*_{sq_AC}$ (o ISQ_AC_REF)	Señal sinusoidal de referencia de la corriente del estátor del eje Q
$i^*_{sd_DC}$ (o ISD_DC_REF)	Nivel de amplitud de la referencia de la corriente de estátor de eje D usado en la prueba
$i^*_{sq_DC}$ (o ISQ_DC_REF)	Nivel de amplitud de la referencia de la corriente de estátor de eje Q usado en la prueba
$i^*_{sd_1}$ (o ISD_REF_1)	Señal de referencia de la corriente del estátor del eje D, antes de aplicar la restricción de limitación de voltaje
$i^*_{sq_1}$ (o ISQ_REF_1)	Señal de referencia de la corriente del estátor del eje Q, antes de aplicar la restricción de limitación de voltaje
i^*_{sd} (o ISD_REF)	Señal de referencia de la corriente del estátor del eje D, después de aplicar la restricción de limitación de voltaje
i^*_{sq} (o ISQ_REF)	Señal de referencia de la corriente del estátor del eje Q, después de aplicar la restricción de limitación de voltaje
$U^*_{s\alpha}$	Componente α de la referencia del voltaje del estátor
$U^*_{s\beta}$	Componente β de la referencia del voltaje del estátor
U^*_{sd}	Componente del eje D de la referencia del voltaje del estátor
U^*_{sq}	Componente del eje Q de la referencia del voltaje del estátor
$U_{s\alpha}$	Componente α del voltaje del estátor

(continuación)

$U_{s\beta}$	Componente β del voltaje del estátor
i_{abc}	Corriente trifásica medida del estátor
$i_{s\alpha}$	Componente α medida de la corriente del estátor
$i_{s\beta}$	Componente β medida de la corriente del estátor
i_{sd} (o ISD)	Componente medida del eje D de la corriente del estátor
i_{sq} (o ISQ)	Componente medida del eje Q de la corriente del estátor
$\Psi_{s\alpha}$	Componente α observada del flujo del estátor
$\Psi_{s\beta}$	Componente β observada del flujo del estátor
Ψ_{sd}	Componente observada del eje D del flujo del estátor
Ψ_{sq}	Componente observada del eje Q del flujo del estátor
FLUX_D_AC_AMP	Amplitud sinusoidal de respuesta del flujo del estátor del eje D
FLUX_Q_AC_AMP	Amplitud sinusoidal de respuesta del flujo del estátor del eje Q
ISD_AC_AMP	Amplitud sinusoidal de respuesta de la corriente del estátor del eje D
ISQ_AC_AMP	Amplitud sinusoidal de respuesta de la corriente del estátor del eje Q

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para determinar una inductancia de una máquina de PM durante el funcionamiento de dicha máquina de PM, comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- a) hacer funcionar una máquina de PM dentro de una ventana de velocidad de rotación predeterminada,
- 5 b) aumentar un nivel de Corriente Continua de una primera señal de referencia hasta que se haya alcanzado un primer nivel deseado de corriente,
- c) calcular un nivel de Corriente Continua de una segunda señal de referencia,
- d) añadir una primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo en el nivel de Corriente Continua tanto de la primera señal de referencia como de la segunda señal de referencia,
- 10 e) calcular un primer valor de inductancia inducida de auto-saturación en respuesta a la primera señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho primer valor de inductancia inducida de auto-saturación en un medio de memoria adecuado,
- f) calcular un primer valor de inductancia inducida de saturación cruzada en respuesta a la primera señal aplicada de prueba dependiente del tiempo, y almacenar dicho primer valor de inductancia inducida de saturación cruzada en el medio de memoria,
- 15 g) eliminar la primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo,
- h) repetir las etapas b) a g) hasta que la inductancia inducida de auto-saturación y la inductancia inducida de saturación cruzada hayan sido calculadas y almacenadas para un número predeterminado de primeros niveles de corriente, y
- 20 i) eliminar la primera señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo y reducir el nivel de Corriente Continua de la primera señal de referencia hasta el valor cero.

2. Un procedimiento según la reivindicación 1, que comprende adicionalmente las etapas de:

- a) aumentar el nivel de Corriente Continua de las señales de referencia primera y segunda, hasta que hayan sido alcanzados los niveles de corriente deseados,
- 25 b) añadir una señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo en el nivel de Corriente Continua tanto de la primera señal de referencia como de la segunda señal de referencia,
- c) calcular un segundo valor de inductancia inducida de auto-saturación en respuesta a la segunda señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho segundo valor de inductancia inducida de auto-saturación en el medio de memoria,
- 30 d) calcular un segundo valor de inductancia inducida de saturación cruzada, en respuesta a la segunda señal aplicada de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo, y almacenar dicho segundo valor de inductancia inducida de saturación cruzada en el medio de memoria,
- e) eliminar la segunda señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo
- 35 f) repetir las etapas c) a e) hasta que la inductancia inducida de auto-saturación y la inductancia inducida de saturación cruzada hayan sido calculadas y almacenadas para un número predeterminado de segundos niveles de corriente, y
- g) eliminar la segunda señal de prueba de Corriente Alterna dependiente del tiempo y reducir las señales de referencia de Corriente Continua hasta el valor cero.

3. Un procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el cual las señales de referencia de Corriente Continua comprenden señales de referencia del flujo del estátor.

4. Un procedimiento según la reivindicación 3, que comprende adicionalmente la etapa de convertir las señales de referencia de Corriente Continua, con una señal de Corriente Alterna añadida a las señales de referencia del flujo del estátor, usando una inductancia L_d nominal y una inductancia L_q nominal cuando el procedimiento es aplicado a un generador de PM controlado por un controlador de flujo de estátor.

45 5. Un procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el cual las señales de referencia de Corriente Continua comprenden señales de referencia de corriente del estátor.

6. Un procedimiento según la reivindicación 5, que comprende adicionalmente la etapa de convertir las señales de referencia de Corriente Continua, con una señal de Corriente Alterna añadida a las señales de referencia de la corriente del estátor, cuando el procedimiento es aplicado a un generador de PM controlado por el controlador de corriente del estátor.
- 5 7. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la máquina de PM se hace funcionar en un estado saturado de funcionamiento.
8. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la ventana de velocidad de rotación predeterminada comprende ventanas de velocidades tales como las de entre 1.000 y 1.500 rpm, las de entre 300 y 500 rpm o las de entre 30 y 50 rpm.
- 10 9. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los niveles deseados de corriente primero y segundo son distintos.
10. Un procedimiento según la reivindicación 9, donde el primer nivel de corriente es mayor que el segundo nivel de corriente.
11. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el cual los números predeterminados de los niveles de corriente primero y segundo están dentro del intervalo comprendido entre 5 y 10.
- 15 12. Un producto de programa de ordenador para llevar a cabo el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuando dicho producto de programa de ordenador es ejecutado en un ordenador.

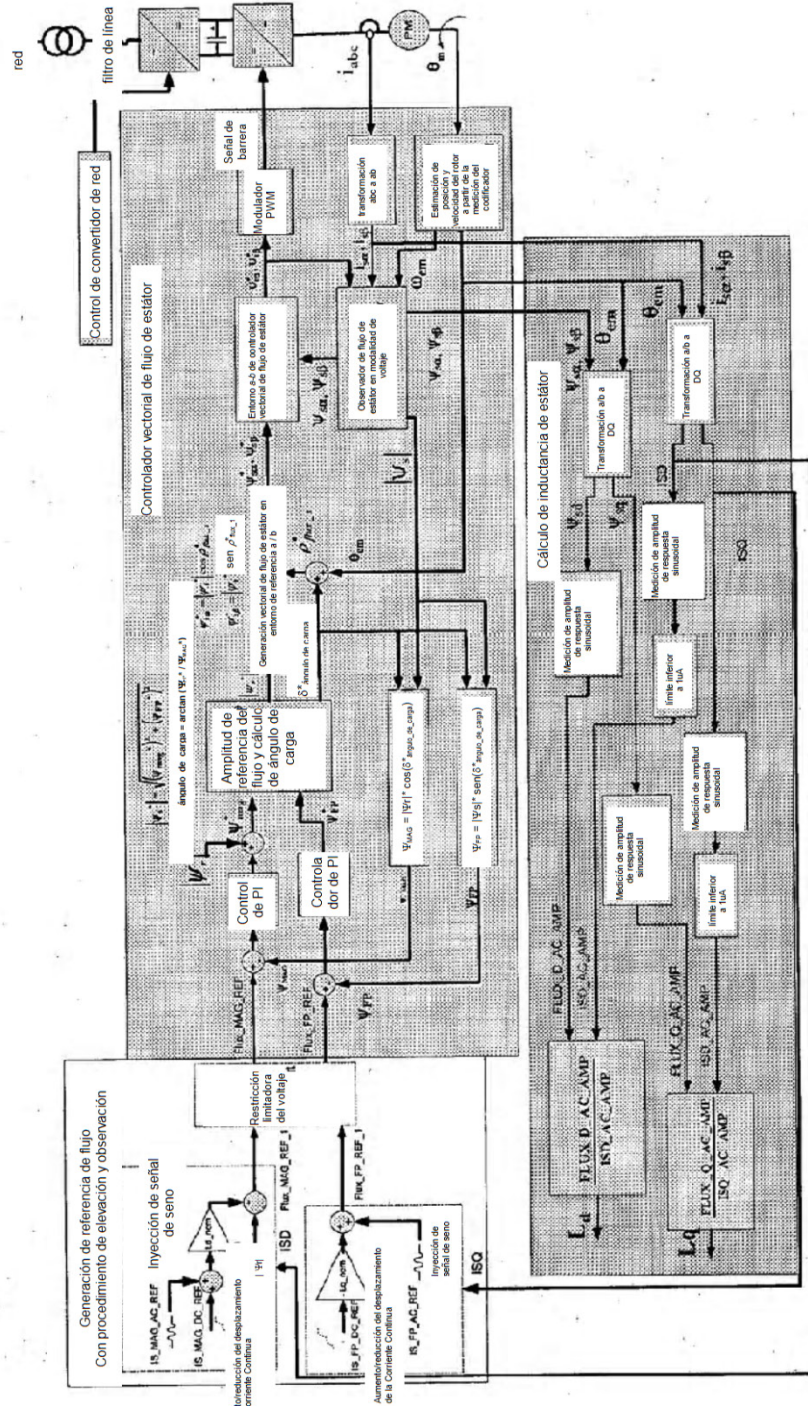


Fig.1

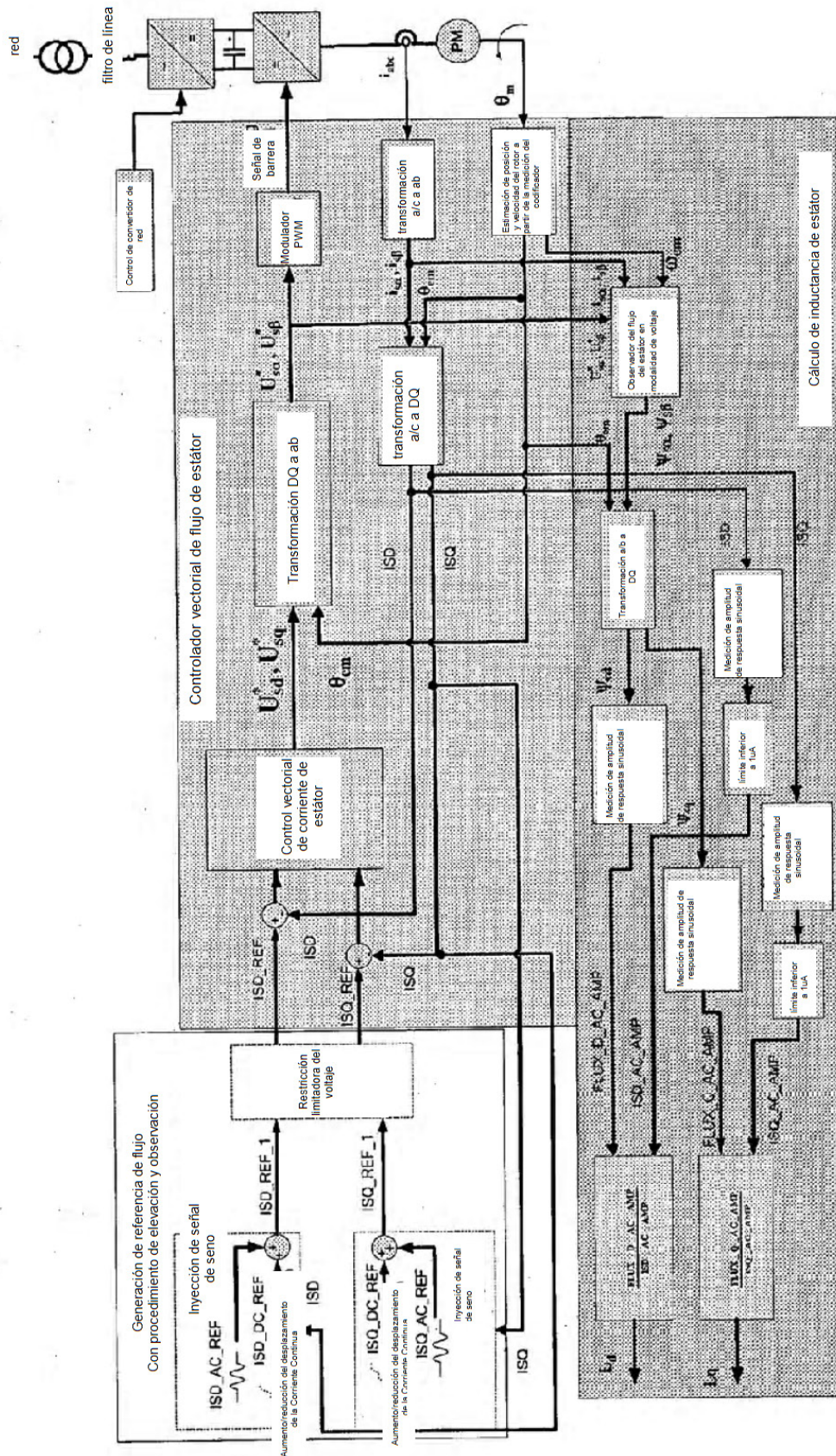


Fig. 2

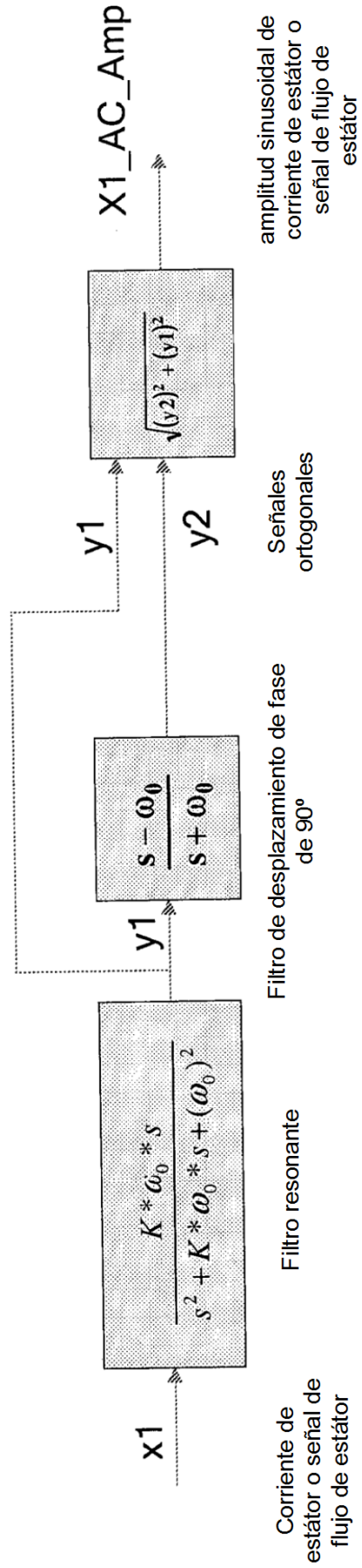


Fig. 3

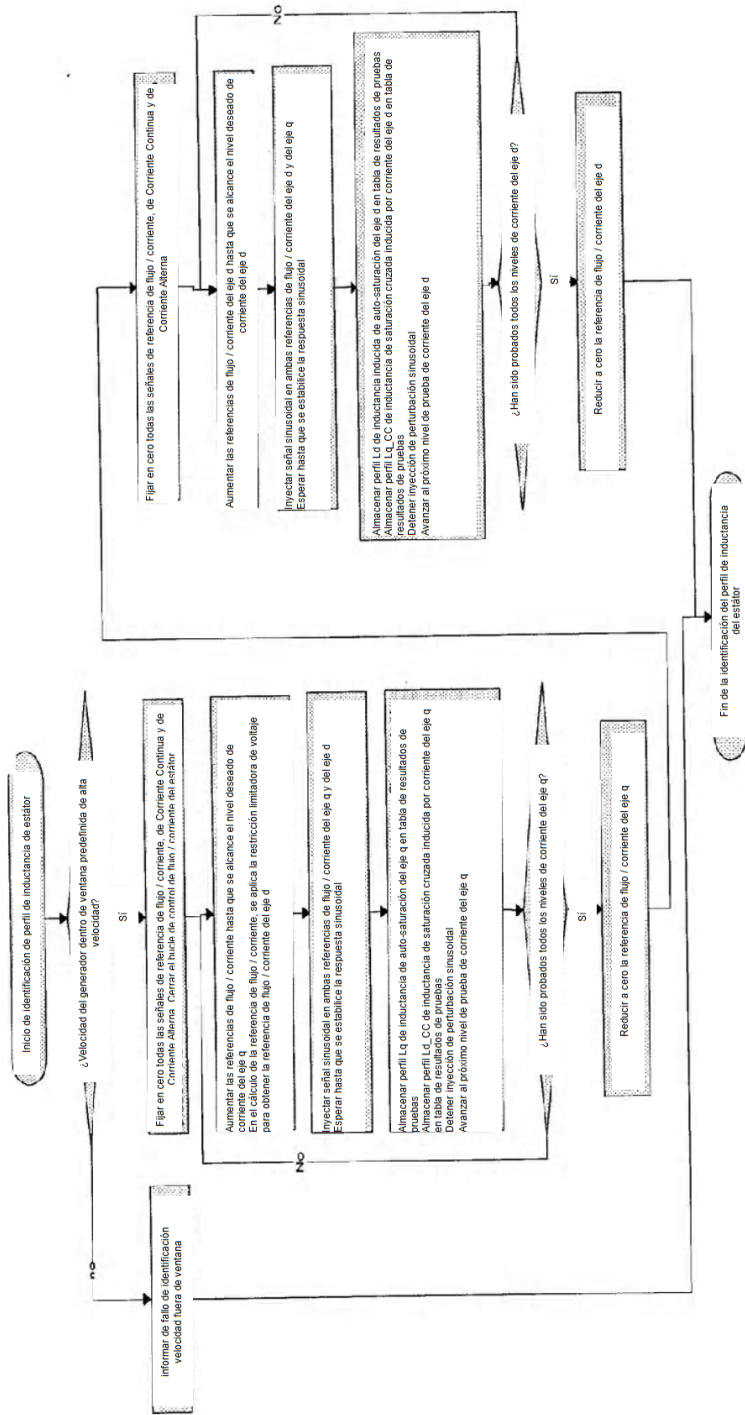


Fig. 4

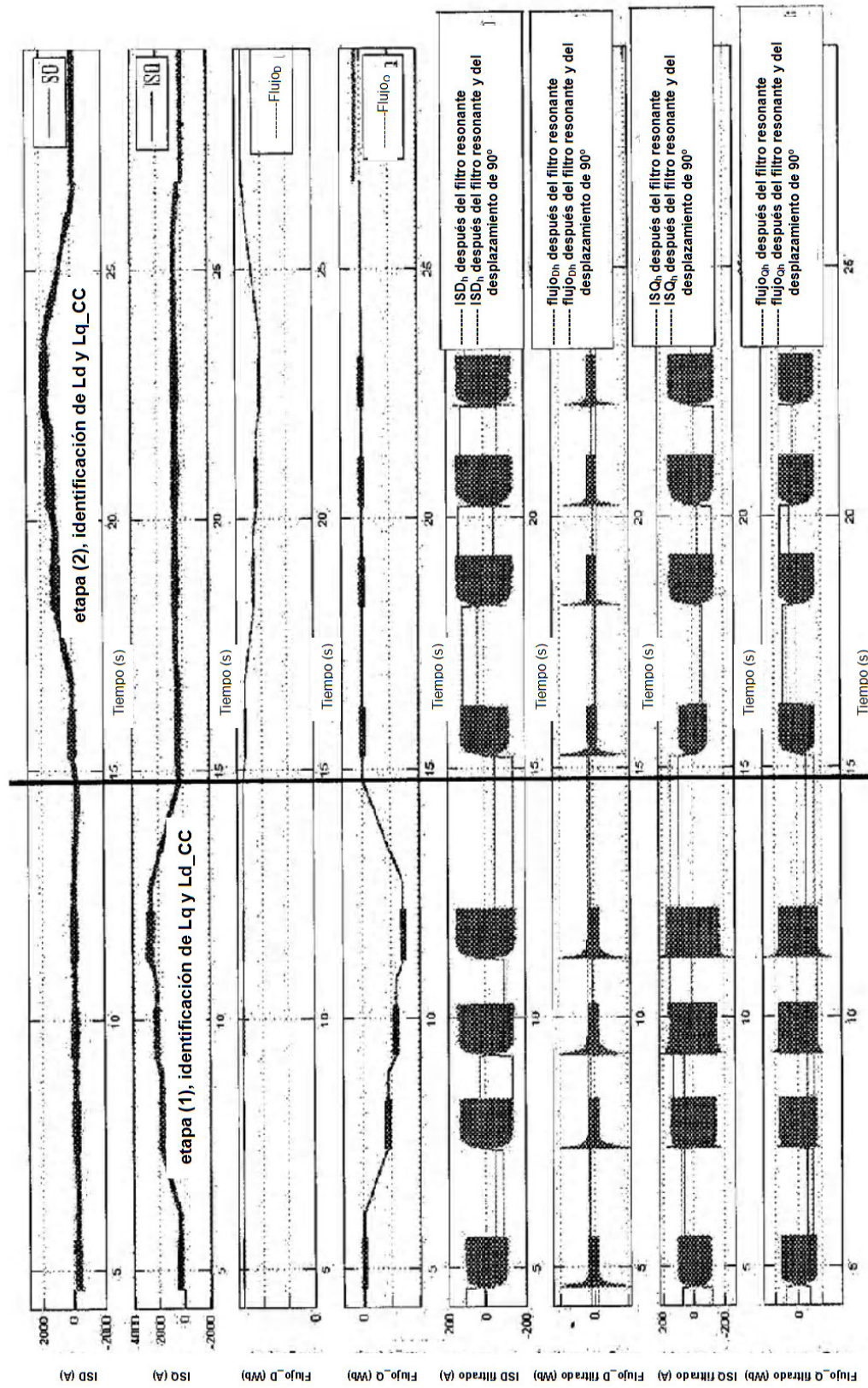


Fig. 5

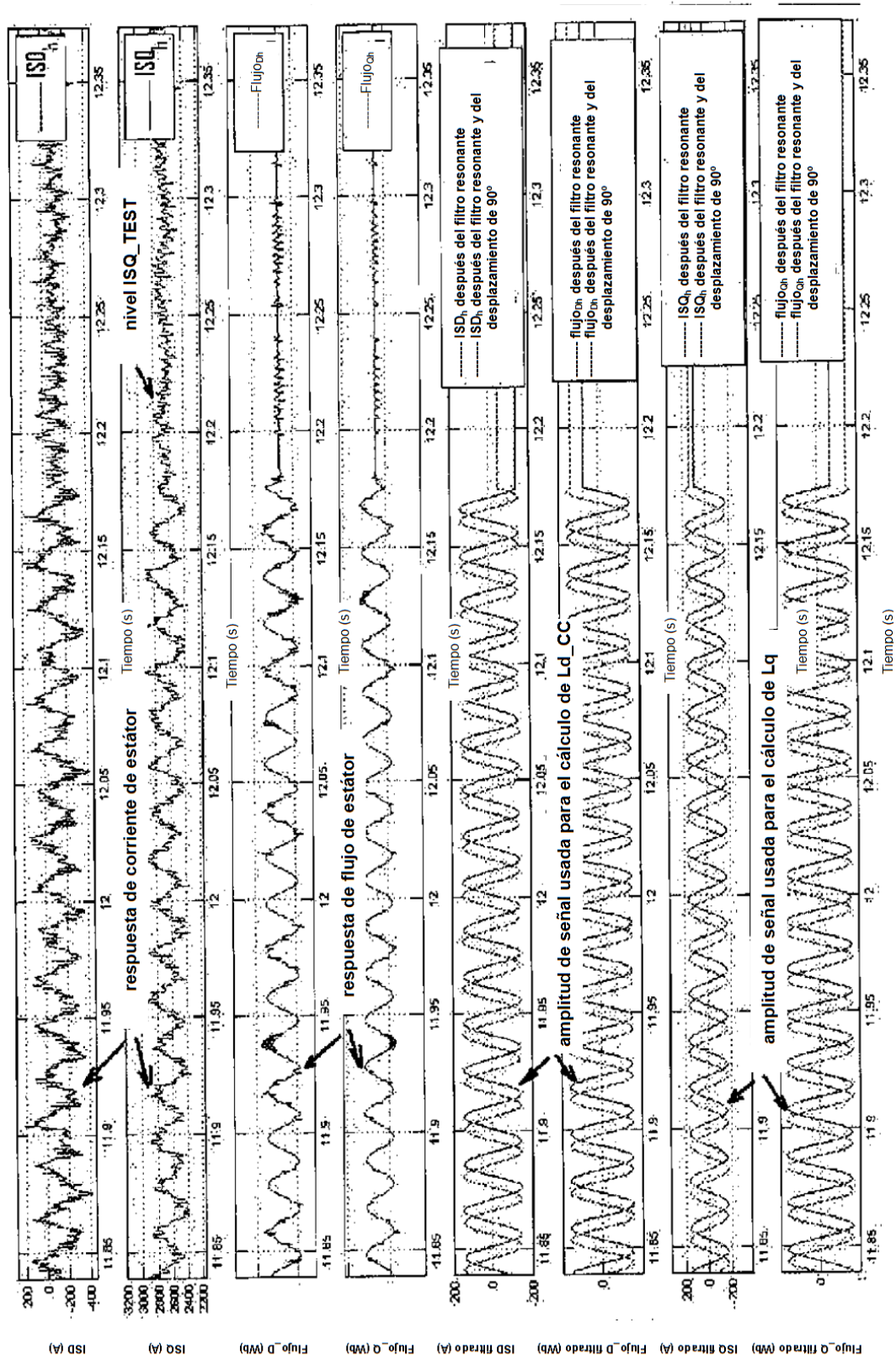


Fig. 6