

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 411 383**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2008 E 08734525 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.04.2013 EP 2140137**

54 Título: **Turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado compensado para variar la velocidad de rotor**

30 Prioridad:

**30.04.2007 DK 200700654  
03.05.2007 US 915836 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**05.07.2013**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**BENDIXEN, FLEMMING BUUS;  
ANDERSEN, GERT KARMISHOLT y  
LARSEN, KIM BRØNDUM**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 411 383 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

Turbina eólica de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado compensado para variar la velocidad de rotor

5 La presente invención se refiere a una turbina eólica de velocidad variable que comprende un generador de inducción doblemente alimentado y a un procedimiento para compensar el generador para una velocidad de rotor variable.

**Antecedentes**

En general, las turbinas eólicas comerciales se pueden dividir en turbinas de velocidad fija y turbinas de velocidad variable.

10 Para una turbina de velocidad fija, la producción de potencia sólo está optimizada para una velocidad específica del viento, mientras que para una turbina de velocidad variable, la salida de potencia óptima se puede lograr para una gama más amplia de velocidades de viento.

15 Desde finales de los 90, la mayor parte de las turbinas eólicas grandes implementadas han sido turbinas de velocidad variable, que requieren de sistemas eléctricos más complejos que las turbinas de velocidad fija. Además, se añaden nuevos requisitos de red a la complejidad de los sistemas eléctricos de una turbina eólica moderna.

20 Una turbina de velocidad variable en todo el intervalo se puede lograr mediante la conexión del estator del generador de la turbina eólica a la red a través de un convertidor de AC-AC (tales como un convertidor adosado o un convertidor matricial) que cambia la salida eléctrica de la frecuencia de salida del generador a la frecuencia nominal de red. Una ventaja de tal sistema es que, al menos en principio, se puede utilizar todo el intervalo de velocidades desde cero RPM a la velocidad máxima permitida por razones de seguridad para la producción de energía eléctrica. Una desventaja, por otra parte, es que el convertidor de AC-AC debe estar dimensionado para manejar la potencia máxima de salida de la turbina.

Con el fin de reducir los requerimientos del convertidor de AC-AC, es conocido el uso de sistemas de velocidad variable de intervalo limitado, como sistemas de generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).

25 En un sistema de DFIG estándar, el estator está conectado directamente a la red, normalmente a través de un transformador, mientras que el rotor está conectado a la red a través de anillos colectores y un convertidor de AC-AC. Las limitaciones en el intervalo de velocidad del sistema dependen del convertidor de AC-AC, ya que la cantidad de potencia a través del rotor es proporcional a la diferencia entre la velocidad eléctrica del rotor y la velocidad sincrónica (velocidad de campo del estator) del generador. Aquí y en lo que sigue, el término "velocidad eléctrica del rotor" se refiere al producto de la velocidad mecánica del rotor por el número de pares de polos en el rotor.

35 El sistema de DFIG adolece de una desventaja bien conocida, a saber, la deficiente amortiguación de las oscilaciones dentro de la dinámica de flujo debido al acoplamiento cruzado entre corrientes activa y reactiva, lo que hace el sistema potencialmente inestable bajo ciertas circunstancias y complica el trabajo del controlador de corriente del rotor, cuya principal tarea consiste en limitar la corriente del rotor con el fin de evitar que el convertidor de AC-AC se desconecte o se rompa. Debe notarse, que, aunque el controlador de corriente del rotor es, de hecho, un controlador de corriente, la señal de control de salida del controlador puede comprender una o más tensiones, así como corrientes, ya que las corrientes del rotor pueden ser controladas indirectamente muy bien mediante el control de las tensiones del rotor.

40 Una forma tradicional de evitar oscilaciones es reducir el ancho de banda del controlador de corriente del rotor en un factor determinado en comparación con el ancho de banda de los bucles de potencia dentro del sistema, lo que sin embargo hace que el controlador de corriente del rotor reaccione más lentamente a cambios en las condiciones de la red. Por otra parte, el rendimiento del controlador (ancho de banda, tiempo de subida, etc.) depende de la velocidad del rotor, lo que en el mejor de los casos da como resultado unos elevados costes de homologación y pruebas y en el peor de los casos puede causar la inestabilidad del controlador y fallos de equipo físico.

45 El documento: "Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Systems" (F. Poitiers, M. Machmoum, R. le Doeuff and M.E. Zaim, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Saint Nazaire, France) describe el control de la potencia eléctrica intercambiada entre el estator y la red mediante el control de la potencia activa y reactiva, respectivamente. Se divulga un modelo de un sistema de DFIG y se muestra un diagrama de bloques del control de potencia. Sin embargo, se afirma en el documento que el acoplamiento cruzado entre la potencia activa y reactiva es de pequeña influencia y se puede despreciar, lo que no está de acuerdo con la experiencia común de la mayoría de las personas que trabajan con turbinas modernas.

En el documento: "Stability Analysis of Field Oriented Doubly-fed Induction Machine Drive Based on Computer Simulation" (Song Wang and Yunshi Ding, Department of Electrical Drive Automation Research Institute of Ministry of Metallurgical Industry, Beijing, People's Republic of China, 1993), se presentan simulaciones por ordenador de diferentes características operativas de un modelo de un sistema de DFIG. El modelo de simulación introduce una función de alimentación directa de tensión que debilita el acoplamiento cruzado entre las corrientes a lo largo de los ejes d y q respectivamente. Sin embargo, no se describe un procedimiento de compensación real.

La tesis doctoral: "Analysis, Modelling and Control of Doubly-fed Induction Generator for Wind Turbines" (Andreas Petersson, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2003) divulga una gama de diferentes procedimientos para la compensación del acoplamiento cruzado, abordando todos ellos los problemas de oscilación y de ancho de banda. Todos los procedimientos mencionados sufren de desventajas, tales como la diferenciación necesaria de las señales medidas, la reducción de ancho de banda del controlador de corriente del rotor, la necesidad de equipo físico de inversor adicional, etc.

La solicitud de patente internacional WO 2004/098261 divulga una turbina eólica de velocidad variable con un DFIG, un controlador de corriente del rotor del cual regula el flujo de producción de corriente del rotor con el fin de asegurar que la turbina eólica puede permanecer conectada ("respaldada") en el caso de fluctuaciones de tensión y/o transitorios en la red de suministro eléctrico. Este sistema, sin embargo, no proporciona ninguna solución al problema antes mencionado de inestabilidad potencial del sistema debido a las oscilaciones en la dinámica de flujo.

Puesto que los problemas de oscilaciones en los trenes de accionamiento de las turbinas eólicas han sido conocidos desde hace años, han sido sugeridas diferentes soluciones para resolver o al menos reducir estos problemas. En la solicitud de patente internacional WO 99/07996 se describe un sistema para controlar las características de amortiguación del tren de accionamiento en base a la velocidad del rotor del generador en una turbina eólica con un DFIG. Aquí, un generador de mando de par motor con un filtro de amortiguación de alimentación directa se utiliza para generar un par motor controlado en respuesta a la velocidad del rotor del generador medida, siendo controlado el par motor a través de la corriente del rotor por un controlador de par, y un controlador PID realiza la regulación de paso sobre la base de la diferencia entre la velocidad del rotor del generador real y una velocidad del rotor del generador objetivo.

Un objetivo de la presente invención es proporcionar un sistema de generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) en el que las oscilaciones posibles anteriormente discutidas se puedan controlar o evitar sustancialmente de una manera mejorada.

Otro objetivo de la presente invención es proporcionar un sistema de DFIG con una mejor capacidad para controlar la calidad de la salida de potencia, lo cual es necesario para cumplir con las exigencias de red más recientes.

Además, es un objetivo de la presente invención proporcionar un sistema de DFIG compensado que no requiere ni diferenciación de las señales medidas ni equipo físico adicional en comparación con los sistemas tradicionales de DFIG.

### **Breve descripción de la presente invención**

La presente invención se refiere a una turbina eólica de velocidad de rotación variable que comprende

un rotor de turbina eólica que comprende una o más palas,

un generador de inducción doblemente alimentado acoplado al rotor de la turbina eólica,

un controlador de corriente del rotor dispuesto para controlar las corrientes de un rotor del generador,

medios de compensación que tienen medios de cálculo y

medios para proporcionar entrada a los medios de compensación, siendo representativa la entrada de al menos la velocidad angular instantánea del rotor del generador,

en el que los medios de cálculo están dispuestos para calcular una salida de control de compensación instantánea en dependencia de dicha velocidad angular instantánea del rotor del generador y alimentar la salida de control de compensación al rotor del generador, estando dispuestos los medios de cálculo para calcular dicha salida de control de compensación durante el funcionamiento de la turbina eólica para compensar al menos en parte las dependencias con la velocidad angular del rotor de las ubicaciones de polos de una función de transferencia de un generador, haciendo así que una función de transferencia de un generador resultante sea sustancialmente independiente de las variaciones en la velocidad angular del rotor durante el funcionamiento de la turbina eólica.

Cabe señalar que el problema de las oscilaciones en la dinámica de flujo del generador queda resuelto en la presente indirectamente, es decir, controlando la función de transferencia instantánea resultante del generador,

estando constituida dicha función de transferencia principalmente por las relaciones entre corrientes activa y reactiva del rotor y del estator del generador. La entrada para los medios de compensación, siendo representativa de la velocidad angular instantánea del rotor, podría ser una salida de un codificador de registro de la velocidad angular del rotor de la turbina eólica, o podría ser una o más corrientes o tensiones del rotor o una corriente o tensión de referencia, cuya frecuencia refleja la velocidad angular del rotor del generador.

En un modo de realización de la invención, la salida del control de compensación se añade a una salida desde el controlador de corriente del rotor.

Esto tiene la ventaja de que el controlador de corriente del rotor trabajará en la función de transferencia del generador resultante del sistema de generador de compensación y, por lo tanto, no se necesitan medios de compensación en el controlador.

En una forma de realización de la invención, los medios para proporcionar entrada a los medios de compensación proporcionan además una entrada que representa magnitudes eléctricas, tales como corrientes y tensiones.

En un modo de realización de la invención, dicha entrada incluye una referencia del rotor.

En un modo de realización de la invención, dicha entrada incluye, además, corrientes del estator.

En un modo de realización de la invención, dicha entrada incluye, además, corrientes del rotor.

Las corrientes del estator y el rotor utilizadas como entrada para los medios de compensación pueden ser activas, así como reactivas. La entrada puede incluir cualquier combinación de las corrientes medidas del estator y del rotor y la corriente de referencia del rotor y/u otras corrientes y tensiones medidas a partir del sistema de DFIG se utilizan como entrada para los medios de compensación. Dado que, como se mencionó anteriormente, todas las corrientes del estator y del rotor influyen en la dinámica de flujo del sistema, es relevante utilizarlas como parámetros de entrada y de control para los medios de compensación.

En un modo de realización preferido de la invención, la función de transferencia de los medios de compensación está diseñada, además, para el cálculo de la salida de control de manera que las corrientes del rotor están desacopladas efectivamente en dos componentes ortogonales entre sí, que pueden ser controladas de forma sustancialmente independiente por el controlador de corriente del rotor.

Organizar la función de transferencia de medios de compensación para proporcionar una salida de control que efectúa un desacoplamiento de las corrientes del rotor en dos componentes ortogonales entre sí es ventajoso porque permite que las corrientes sean controladas individualmente por el controlador de corriente del rotor, de modo que puede ser obtenido un control más preciso de las corrientes del rotor, y por lo tanto de las corrientes del estator y de la potencia entregada a la red. Un desacoplamiento completo o al menos casi completo de los componentes de la corriente puede ser obtenido debido a la disposición independiente de la velocidad angular del rotor.

En un modo de realización preferido de la invención, los medios de compensación comprenden medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones de la salida de control.

En aún una realización preferida adicional de la invención, los medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones de la salida de control comprenden uno o más filtros de avance.

El uso de filtros de avance para incrementar la fase de la señal de control de salida de los medios de compensación alrededor de la frecuencia de oscilación potencial es ventajoso porque reduce al mínimo las oscilaciones en torno a esta frecuencia, y por lo tanto la inestabilidad del sistema de control considerablemente.

En un modo de realización de la invención, los medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones están diseñados para proporcionar amortiguación a una frecuencia que se desvía menos del 5% de frecuencia de la red.

En otro modo de realización de la invención, los medios para proporcionar amortiguación de oscilaciones son sintonizables a una o más frecuencias bien definidas.

En otro aspecto de la invención, esta se refiere a un procedimiento para el funcionamiento de una turbina eólica de velocidad de rotación variable que tiene un generador de inducción doblemente alimentado acoplado a un rotor de la turbina eólica, que comprende las etapas de:

proporcionar entrada a medios de compensación, siendo representativa la entrada de al menos la velocidad angular instantánea del rotor del generador,

disponer medios de cálculo de los medios de compensación para calcular una salida de control de compensación instantánea en dependencia con dicha velocidad angular instantánea del rotor del generador durante el

funcionamiento de la turbina eólica para compensar al menos en parte dependencias de la velocidad angular del rotor de las ubicaciones de los polos de una función de transferencia del generador, haciendo así que una función de transferencia del generador resultante sea sustancialmente independiente de variaciones en la velocidad angular del rotor durante el funcionamiento de la turbina eólica, y

- 5 alimentar la salida de control de compensación al rotor del generador.

En un modo de realización adicional de la invención, el procedimiento comprende además la etapa de disponer los medios de cálculo para calcular la salida de control de manera que las corrientes del rotor estén desacopladas efectivamente en dos componentes ortogonales entre sí, que pueden ser controladas de forma sustancialmente independiente por el controlador de corriente del rotor.

- 10 En un modo de realización preferido de la invención, el procedimiento comprende además una etapa de disponer los medios de compensación para proporcionar amortiguación de las oscilaciones de la salida de control.

En todavía un modo de realización preferido de la invención, la amortiguación de oscilaciones proporcionada es sintonizable a una o más frecuencias bien definidas.

### Breve descripción de los dibujos

- 15 Un modo de realización preferido de la invención será descrito a continuación con referencia a las figuras en las que:

La fig. 1 ilustra una turbina eólica grande moderna vista desde el frente,

la fig. 2 ilustra una sección transversal de una góndola simplificada que muestra el tren de accionamiento como se ve desde el lado,

- 20 la fig. 3 ilustra el esquema de principio de un generador de inducción doblemente alimentado estándar,

la fig. 4 ilustra el diagrama equivalente T de estado estacionario estándar para un generador de inducción doblemente alimentado,

la fig. 5a ilustra la transformación de Clarke de vectores de un sistema trifásico equilibrado a un sistema estacionario ortogonal bifásico equilibrado,

- 25 la fig. 5b ilustra la transformación de Park de vectores de un sistema estacionario ortogonal bifásico equilibrado a un sistema rotacional ortogonal bifásico equilibrado,

la fig. 6 ilustra un modelo de un generador de inducción doblemente alimentado, ampliado para incluir el controlador de corriente del rotor y los puntos de medición, en el que las corrientes y tensiones reales están disponibles,

- 30 la fig. 7 ilustra el mismo modelo ampliado de un generador de inducción doblemente alimentado de la fig. 6 con la adición de medios de compensación,

la fig. 8 ilustra las posiciones de los polos y ceros para las ecuaciones del sistema del modo de realización descrito de la invención.

la fig. 9 ilustra el modelo ampliado de un generador de inducción doblemente alimentado compensado de la fig. 7 con la adición de un filtro de compensación de avance,

- 35 la fig. 10 ilustra el diagrama de Bode de un filtro de compensación de avance,

la fig. 11a ilustra la respuesta transitoria de tensiones del rotor a lo largo de los ejes d y q, respectivamente, a un impulso de 100 A en un sistema sin un filtro de compensación de avance, y

la fig. 11b ilustra la respuesta transitoria de tensiones del rotor a lo largo de los ejes d y q, respectivamente, a un impulso de 100 A en un sistema con un filtro de compensación de avance.

- 40 Las figuras adjuntas se proporcionan para ilustrar un modo de realización de la presente invención y no están destinadas a limitar el alcance de la protección tal como se define por las reivindicaciones.

### Descripción detallada

A continuación se describe un modo de realización de la presente invención con medios de compensación para convertir la función de transferencia del generador en independiente de la velocidad variable del rotor, que comprende un filtro de avance para la amortiguación de oscilaciones en torno a la frecuencia de red.

- 45

La fig. 1 ilustra una turbina eólica moderna 1, que comprende una torre 2 y una góndola de turbina eólica 3 situada en la parte superior de la torre 2. El rotor de la turbina eólica 4, que comprende tres palas de turbina eólica 5 está conectado a la góndola 3 a través del árbol de baja velocidad (no mostrado) que se extiende desde la parte frontal de la góndola 3.

5 La fig. 2 ilustra una sección transversal simplificada de una góndola de turbina eólica 3, como se ve desde el lado. En el modo de realización mostrado, el tren de accionamiento 6 en la góndola 3 comprende un engranaje 7, un sistema de frenado 8, un generador 9 y un convertidor de AC-AC 10.

10 Los esquemas de principio de un generador de inducción estándar doblemente alimentado 9 se ilustran en la fig. 3, en la que el estator 11 está conectado a la red 15 a través de un transformador de red 14 y el rotor 12 está conectado a la red 15 a través de anillos colectores 13, un convertidor de AC-AC 10 y el transformador de red.

15 La fig. 4 ilustra el diagrama equivalente T de estado estacionario estándar para un generador de inducción doblemente alimentado, donde  $u_s$ ,  $i_s$ ,  $R_s$  y  $L_{sl}$  son la tensión del estator, la corriente del estator, la resistencia del estator y la inductancia de fuga del estator, respectivamente. De manera parecida  $u_r$ ,  $i_r$ ,  $R_r$  y  $L_{rl}$  son la tensión de rotor, la corriente del rotor, la resistencia del rotor y la inductancia de fuga del rotor, respectivamente.  $L_{sr}$  es la inductancia de magnetización. Todos los parámetros del generador se transfieren a un marco de referencia de tensión de estator fijo.

A continuación, las corrientes y tensiones estarán todas referenciadas en un marco rotatorio de referencia equilibrado ortogonal bifásico, a saber, el llamado sistema de coordenadas dq. Las figs. 5a y 5b ilustran las dos etapas de transformación de las cantidades de un sistema trifásico equilibrado en el sistema dq.

20 La primera etapa, que se conoce como la transformación de Clarke, convierte cantidades trifásicas equilibradas en cantidades de cuadratura bifásicas equilibradas, como se ilustra en la fig. 5a. Las relaciones entre las cantidades trifásicas (a, b y c) y las cantidades bifásicas ( $\alpha$  y  $\beta$ ) están dadas por las ecuaciones:

$$\alpha = a$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(b - d) \quad (1)$$

25  $0 = a + b + c$

y

$$\alpha = a$$

$$b = -\frac{1}{2}(\alpha - \sqrt{3} \cdot \beta) \quad (2)$$

$$c = -\frac{1}{2}(\alpha + \sqrt{3} \cdot \beta)$$

La segunda etapa, conocida como la transformación de Park, convierte cantidades de un sistema bifásico estacionario a un sistema bifásico giratorio, como se ilustra en la fig. 5b. Las relaciones entre las cantidades en el sistema estacionario ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y las cantidades en el sistema rotatorio (d y q) están dados por las ecuaciones:

35  $\alpha = q \cdot \cos \gamma + d \cdot \sin \gamma$

$$\beta = q \cdot \sin \gamma - d \cdot \cos \gamma \quad (3)$$

y

$$q = \alpha \cdot \cos \gamma + \beta \cdot \sin \gamma$$

$$d = \alpha \cdot \sin \gamma - \beta \cdot \cos \gamma \quad (4)$$

40 en las que  $\gamma$  es el ángulo de rotación entre el sistema estacionario y el rotatorio.

Usando el subíndice  $_{sf}$  para indicar que la variable se da en un marco de referencia fijo de tensión de estator, un modelo transitorio (dinámico) de un generador de inducción doblemente alimentado estándar se puede escribir en coordenadas dq de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 u_{ds\_sf} &= -(R_s + L_s s) i_{ds\_sf} - L_{sr} s i_{dr\_sf} + \omega (L_s i_{qr\_sf} + L_{sr} i_{dr\_sf}) \\
 5 \quad u_{qs\_sf} &= -(R_s + L_s s) i_{qs\_sf} - L_{sr} s i_{qr\_sf} - \omega (L_s i_{ds\_sf} + L_{sr} i_{dr\_sf}) \\
 u_{dr\_sf} &= -L_{sr} s i_{ds\_sf} - (R_r + L_r s) i_{dr\_sf} + (\omega - \omega_r) (L_{sr} i_{qs\_sf} + L_r i_{qr\_sf}) \quad (5) \\
 u_{qr\_sf} &= -L_{sr} s i_{qs\_sf} - (R_r + L_r s) i_{qr\_sf} - (\omega - \omega_r) (L_{sr} i_{ds\_sf} + L_r i_{dr\_sf})
 \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores, así como en las siguientes,  $\omega$  es la velocidad de campo del estator (frecuencia de red) y  $\omega_r$  es la velocidad eléctrica del rotor. La inductancia transitoria del estator  $L_s$  y la inductancia transitoria del rotor  $L_r$  utilizadas en las ecuaciones se pueden calcular a partir de las inductancias mostradas en la fig. 4 mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 L_s &= L_{sl} + L_{sr} \\
 L_r &= L_{rl} + L_{sr} \quad (6)
 \end{aligned}$$

En notación matricial del espacio de estados, las ecuaciones (5) tendrán la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 15 \quad s \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} &= M_i \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + (-M_u) \cdot \begin{bmatrix} u_{ds\_sf} \\ u_{qs\_sf} \\ u_{dr\_sf} \\ u_{qr\_sf} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \dot{f}_{i_{ds\_sf}} \\ \dot{f}_{i_{qs\_sf}} \\ \dot{f}_{i_{dr\_sf}} \\ \dot{f}_{i_{qr\_sf}} \end{bmatrix} &= I_{4 \times 4} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + O_{4 \times 4} \cdot \begin{bmatrix} u_{ds\_sf} \\ u_{qs\_sf} \\ u_{dr\_sf} \\ u_{qr\_sf} \end{bmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

en las que las matrices incluidas  $M_u$  y  $M_i$  están dadas por:

$$\begin{aligned}
 M_u &= \frac{1}{L_s \cdot L_r - L_{sr}^2} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_{sr} & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_{sr} \\ -L_{sr} & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_{sr} & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad (8) \\
 M_i &= \frac{1}{L_s \cdot L_r - L_{sr}^2} \begin{bmatrix} -L_r \cdot R_s & \omega \cdot L_s \cdot L_r - (\omega - \omega_r) \cdot L_{sr}^2 & L_{sr} \cdot R_r & \omega_r \cdot L_r L_{sr} \\ -\omega \cdot L_s \cdot L_r + (\omega - \omega_r) \cdot L_{sr}^2 & -L_r \cdot R_s & -\omega_r \cdot L_r L_{sr} & L_{sr} \cdot R_r \\ L_{sr} \cdot R_s & -\omega_r \cdot L_s L_{sr} & -L_s R_r & (\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_r - \omega \cdot L_{sr}^2 \\ \omega_r \cdot L_s \cdot L_{sr} & L_{sr} R_s & -(\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_r + \omega \cdot L_{sr}^2 & -L_s R_r \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Los principales problemas de un sistema de DFIG estándar como el descrito por las ecuaciones anteriores recaen todos en los elementos fuera de la diagonal de  $M_i$ , que es la matriz dinámica que representa las relaciones entre las diferentes corrientes en las ecuaciones de espacio estado del sistema.

En primer lugar, algunos de los elementos fuera de la diagonal son no lineales debido a la dependencia de la velocidad variable del rotor, lo que significa que los controladores de corriente no pueden ser diseñados y analizados mediante la teoría de control lineal.

En segundo lugar, la misma dependencia de algunos de los elementos fuera de la diagonal de la velocidad eléctrica del rotor es una causa potencial de inestabilidad del sistema con las señales no controladas, especialmente en el

caso de altas aceleraciones, debido a que los polos y ceros del sistema creados por estos elementos fuera de la diagonal se mueven con el cambio de velocidad del rotor y están deficientemente amortiguados.

Por otra parte, los elementos fuera de la diagonal de  $M_i$  causan acoplamiento cruzado entre las corrientes de modo que las corrientes a lo largo de los ejes d y q, respectivamente, no pueden ser controladas de forma independiente.

5 De acuerdo con la presente invención, se añaden medios de compensación al sistema con el fin de eliminar o al menos disminuir el movimiento de los polos y ceros cuando cambia la velocidad del rotor. Aquí, hay que darse cuenta de que como el controlador de corriente solo puede variar las tensiones de rotor, no todos los elementos fuera de la diagonal pueden ser retirados de la matriz dinámica  $M_i$  en las ecuaciones de espacio de estados (7) del sistema.

10 Antes de poder añadir los medios de compensación, sin embargo, el modelo de generador debe ser ampliado para incluir los puntos de medición en los que las corrientes y tensiones reales utilizadas en la compensación están disponibles, como se ilustra en la fig. 6. Para esta extensión del modelo de generador deben ser tomadas en consideración dos cosas.

15 En primer lugar, los devanados del generador pueden estar conectados, ya sea en configuración de estrella o en configuración de triángulo. La elección de la configuración afecta a las tensiones en un factor de  $\sqrt{3}$ . Por lo tanto, un factor de escala 17 marcado "YΔ" en la fig. 6 tiene el valor 1 si el generador está conectado en configuración de estrella, y tiene el valor  $\sqrt{3}$  si el generador está conectado en configuración de triángulo.

20 En segundo lugar, como se ha mencionado anteriormente, las ecuaciones del generador se basan en un marco de referencia fijo de tensión del estator. Por lo tanto, como las corrientes del rotor y las tensiones del rotor se medirán realmente en el lado del rotor del generador, un factor de escala 18 marcado como "cociente" que representa el factor de transformación de tensiones de estator a rotor debe ser implementado en el modelo de generador ampliado como se muestra también en la fig. 6.

25 Una vez implementado el modelo de generador ampliado, los medios de compensación que proporcionan una señal de salida de control que se añade a la referencia de tensión del rotor, de acuerdo con una realización de la invención, se pueden añadir al modelo, como se ilustra en la fig. 7. Ahora, las ecuaciones de espacio de estados resultantes para el sistema compensado se ven de la siguiente manera (se señala que es la matriz G que representa los medios de compensación totales 19 y no la matriz de compensación interna  $G_x 20$  que se utiliza en las ecuaciones):

$$S \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds\_sf} \\ \dot{i}_{qs\_sf} \\ \dot{i}_{dr\_sf} \\ \dot{i}_{qr\_sf} \end{bmatrix} = M_i \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + (-M_u) \cdot S_c \cdot \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{drref} \\ u_{qrref} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{dr-f} \\ u_{qr-f} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$30 \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = S_c \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix}$$

lo que es igual a

$$S \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds\_sf} \\ \dot{i}_{qs\_sf} \\ \dot{i}_{dr\_sf} \\ \dot{i}_{qr\_sf} \end{bmatrix} = M_i \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + (-M_u) \cdot S_c \cdot \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{drref} \\ u_{qrref} \end{bmatrix} - G \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (10)$$



$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = S_c \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix}$$

donde

$$S_c = \begin{bmatrix} Y\Delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y\Delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\text{cociente} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\text{cociente} \end{bmatrix} \quad (11)$$

5 Ahora, (10) se puede reducir a

$$S \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} = M_i \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + [B_l B_r] \cdot \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{drref} \\ u_{qrref} \end{bmatrix} - G \cdot S_c \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} \quad (12)$$

usando

$$[B_l B_r] = -M_u \cdot S_c \Rightarrow$$

$$B_r = \frac{1}{\text{Cociente} \cdot (L_s \cdot L_r - L_{sr}^2)} \begin{bmatrix} L_{sr} & 0 \\ 0 & L_{sr} \\ -L_s & 0 \\ 0 & -L_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

10 o en una forma reescrita

$$S \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} = (M_i - B_r \cdot G \cdot S_c) \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + (-M_u) \cdot S_c \cdot \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{drref} \\ u_{qrref} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = S_c \cdot \begin{bmatrix} i_{ds\_sf} \\ i_{qs\_sf} \\ i_{dr\_sf} \\ i_{qr\_sf} \end{bmatrix} + 0_{(4 \times 4)} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} \quad (14)$$

La matriz de medios de compensación G 19 puede ser elegida de un numero de maneras dependiendo del efecto requerido por los medios de compensación.

En un modo de realización de la invención, la matriz G 19 se elige de manera que al mismo tiempo elimina toda la apariencia de la velocidad eléctrica del rotor en los elementos de la matriz dinámica resultante del sistema compensado y desacopla efectivamente las corrientes en los componentes d y q. Para este propósito, G 19 está configurada para ser:

$$5 \quad G = \text{Cociente} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_r \cdot L_{sr}}{Y\Delta} & 0 & -\text{Cociente} \cdot \left( (\omega - \omega_r) \cdot L_r - \frac{\omega \cdot L_{sr}^2}{L_s} \right) \\ -\frac{\omega_r \cdot L_{sr}}{Y\Delta} & 0 & \text{Cociente} \cdot \left( (\omega - \omega_r) \cdot L_r - \frac{\omega \cdot L_{sr}^2}{L_s} \right) & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Con esta elección de G 19, conseguimos el siguiente producto de matrices  $B_r \cdot G \cdot S_c$ :

$$B_r \cdot G \cdot S_c = \frac{\begin{bmatrix} 0 & \omega \cdot L_{sr}^2 & 0 & -(\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_{sr} + \frac{\omega \cdot L_{sr}^3}{L_s} \\ -\omega \cdot L_{sr}^2 & 0 & (\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_{sr} + \frac{\omega \cdot L_{sr}^3}{L_s} & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot L_s \cdot L_{sr} & 0 & (\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_r - \omega \cdot L_{sr}^2 \\ \omega_r \cdot L_s \cdot L_{sr} & 0 & -(\omega - \omega_r) \cdot L_s \cdot L_r + \omega \cdot L_{sr}^2 & 0 \end{bmatrix}}{(L_s \cdot L_r - L_{sr}^2)} \quad (16)$$

en la que, cuando se resta de  $M_i$  obtenemos la siguiente matriz dinámica del sistema:

$$M_i - B_r \cdot G \cdot S_c = \frac{\begin{bmatrix} -L_r \cdot R_s & \omega \cdot (L_s \cdot L_r - L_{sr}^2) & L_{sr} \cdot R_r & \omega \cdot \left( L_r \cdot L_{sr} - \frac{L_{sr}^3}{L_s} \right) \\ -\omega \cdot (L_s \cdot L_r - L_{sr}^2) & -L_r \cdot R_s & -\omega \cdot \left( L_r \cdot L_{sr} - \frac{L_{sr}^3}{L_s} \right) & L_{sr} \cdot R_r \\ L_{sr} \cdot R_s & 0 & -L_s \cdot R_r & 0 \\ 0 & L_{sr} \cdot R_s & 0 & -L_s \cdot R_r \end{bmatrix}}{(L_s \cdot L_r - L_{sr}^2)} \quad (17)$$

10 Por lo tanto, usando una matriz de medios de compensación G 19 que depende de la velocidad eléctrica del rotor  $\omega_r$ , es posible lograr una matriz dinámica resultante  $A = M_i - B_r \cdot G \cdot S_c$  que es independiente de  $\omega_r$ .

Esta independencia de  $\omega_r$  significa que los polos y ceros de las ecuaciones del sistema ya no se mueven cuando la velocidad del rotor cambia y que se puede hacer un esfuerzo dedicado para amortiguar posibles oscilaciones e inestabilidades que surgen de estos polos y ceros, ya que sus posiciones ahora son bien conocidas.

15 La figura 8 muestra las posiciones 21 de los polos X y ceros O para el sistema con la definición arriba mencionada de la matriz de los medios de compensación G 19. El punto de la izquierda 21 cerca de  $\{-25, 0\}$  consiste en un cero O y dos polos X, mientras que cada uno de los dos puntos conjugados complejos 21 cerca del límite de estabilidad 22 consisten en un cero O y un polo X.

20 Los polos y ceros arriba mencionados cerca del límite de estabilidad pueden ser fácilmente la causa de oscilaciones. Por lo tanto, la presente invención también comprende medios de amortiguación dedicados a la amortiguación de las oscilaciones de este tipo.

En un aspecto de la invención, los medios de amortiguación comprenden un filtro de avance 23 colocado en el bucle de los medios de compensación del sistema, como se muestra en la fig. 9.

25 El filtro de avance 23, cuyo diagrama de Bode es mostrado en la fig. 10, tiene la siguiente función de transferencia, en la que LF es el Factor de Avance del filtro:

$$\text{Avance} = \frac{s + \omega / LF}{s + LF \cdot \omega} \quad (18)$$

Si LF se ajusta al valor 2, la función de transferencia anterior da un avance de fase de aproximadamente  $35^\circ$  a la frecuencia de la red. La ganancia de alta frecuencia es 1, y la ganancia de DC es  $1/LF^2$ . La idea general es que el filtro de avance 23 no debe tener ninguna influencia en las altas frecuencias, y que el bucle de control del rotor es lo suficientemente rápido para compensar la menor ganancia a frecuencias bajas.

- 5 El efecto del filtro de avance 23 es ilustrado en las figs. 11a y 11b, que muestran las respuestas transitorias de las tensiones de rotor del eje q 26 y del eje d 27 para un impulso de 100 A en sistemas con y sin un filtro de avance de compensación 23, respectivamente.

En la práctica, el filtro de avance a menudo consiste en dos filtros independientes que trabajan en los componentes d y q respectivamente.

## 10 Lista de números de referencia

En los dibujos los números de referencia y símbolos se refieren a:

1. Turbina eólica o sistema de turbinas eólicas
2. Torre de turbina eólica
3. Góndola de turbina eólica
- 15 4. Árbol de baja velocidad
5. Pala de rotor de turbina eólica
6. Tren de accionamiento
7. Engranajes
8. Sistema de frenado
- 20 9. Generador
10. Convertidor de AC-AC
11. Estator
12. Rotor
13. Anillos colectores
- 25 14. Transformador de red
15. Red
16. Controlador de corriente del rotor
17. Factor de escala para configuración en estrella/triángulo
18. Factor de transformación entre tensiones del rotor y el estator
- 30 19. Matriz de medios de compensación
20. Matriz de compensación interna
21. Sistema de ecuaciones de polos y ceros
22. Límite de estabilidad
23. Filtro de compensación de avance
- 35 24. Gráfico de la magnitud de la función de transferencia del filtro de compensación de avance
25. Gráfico de la fase de la función de transferencia del filtro de compensación de avance
26. Respuesta transitoria de la tensión del rotor: componente q
27. Respuesta transitoria de la tensión del rotor: componente d

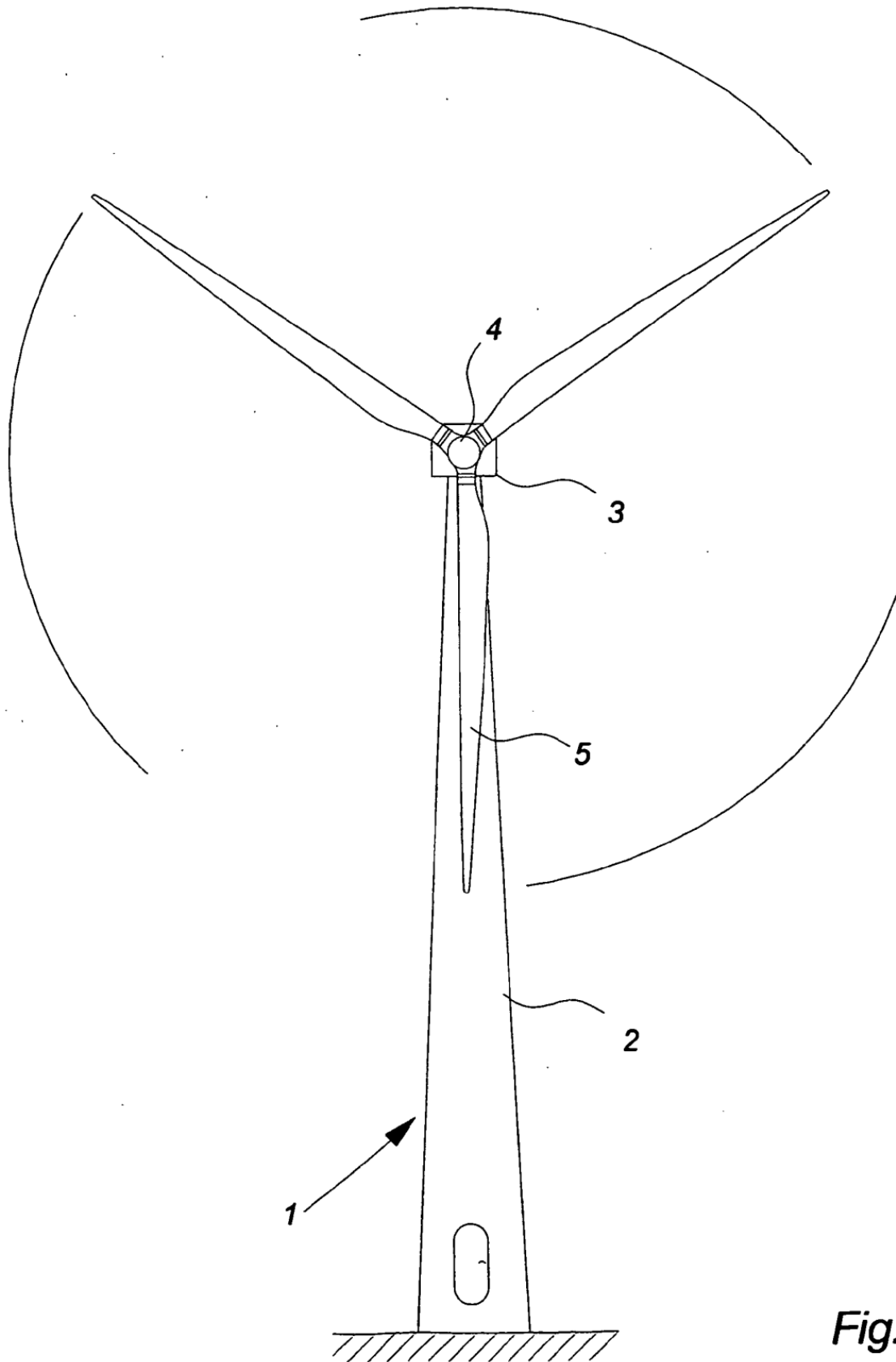
|    |   |
|----|---|
|    | $u_s$ Tensión de estator  |
|    | $i_s$ Corriente del estator   |
|    | $R_s$ Resistencia de estator  |
| 5  | $L_{sl}$ Inductancia de fuga de estator   |
|    | $u_r$ Tensión de rotor  |
|    | $i_r$ Corriente del rotor   |
|    | $R_r$ Resistencia de rotor  |
|    | $L_{rl}$ Inductancia de fuga de rotor   |
| 10 | $L_{sr}$ Inductancia de magnetización   |
|    | a, b, c Componentes en un marco de referencia trifásico equilibrado                                   |
|    | $\alpha, \beta$ Componentes en un marco estacionario ortogonal bifásico equilibrado                   |
|    | d, q Componentes en un marco rotatorio ortogonal bifásico equilibrado                                 |
| 15 | $\gamma$ Ángulo de rotación entre sistemas estacionarios y rotatorios                                 |
|    | $\omega$ Velocidad de rotación de un sistema rotatorio comparado con un sistema estacionario          |
|    | $u_{qs}$ Tensión de estator - componente q  |
|    | $u_{ds}$ Tensión de estator - componente d  |
| 20 | $u_{qr}$ Tensión de rotor - componente q  |
|    | $u_{dr}$ Tensión de rotor - componente d  |
|    | $i_{qs}$ Corriente de estator - componente q  |
|    | $i_{ds}$ Corriente de estator - componente d  |
|    | $i_{qr}$ Corriente de rotor - componente q  |
| 25 | $i_{dr}$ Corriente de rotor - componente d  |
|    | $u_{qs\_sf}$ Tensión de estator - componente q en un marco de referencia de tensión de estator fija   |
|    | $u_{ds\_sf}$ Tensión de estator - componente d en un marco de referencia de tensión de estator fija   |
|    | $u_{qr\_sf}$ Tensión de rotor - componente q en un marco de referencia de tensión de estator fija     |
|    | $u_{dr\_sf}$ Tensión de rotor - componente d en un marco de referencia de tensión de estator fija     |
| 30 | $i_{qs\_sf}$ Corriente de estator - componente q en un marco de referencia de tensión de estator fija |
|    | $i_{ds\_sf}$ Corriente de estator - componente d en un marco de referencia de tensión de estator fija |
|    | $i_{qr\_sf}$ Corriente de rotor - componente q en un marco de referencia de tensión de estator fija   |
|    | $i_{dr\_sf}$ Corriente de rotor - componente d en un marco de referencia de tensión de estator fija   |
|    | $i_{qref}$ Corriente de referencia del rotor - componente q   |
| 35 | $i_{drref}$ Corriente de referencia del rotor - componente d  |

- $i_{qr\text{error}}$  Corriente de error del rotor - componente q
- $i_{dr\text{error}}$  Corriente de error del rotor - componente d
- $u_{qr\text{ref}}$  Tensión de salida del controlador de corriente del rotor - componente q
- $u_{dr\text{ref}}$  Tensión de salida del controlador de corriente del rotor - componente d
- 5
  - $u_{qr\_f}$  Tensión de compensación del rotor - componente q
  - $u_{dr\_f}$  Tensión de compensación del rotor - componente d
  - $u_{qr\_f\_sf}$  Tensión de compensación del rotor - componente q en un marco de referencia de tensión de estator fija
  - $u_{dr\_f\_sf}$  Tensión de compensación del rotor - componente d en un marco de referencia de tensión de estator fija
- 10
  - X posición del polo de función de transferencia
  - O posición del cero de función de transferencia

## REIVINDICACIONES

1. Una turbina eólica de velocidad de rotación variable (1) que comprende un rotor de turbina eólica que comprende una o más palas (5), un generador de inducción doblemente alimentado (9) acoplado al rotor de la turbina eólica,
- 5 un controlador de corriente del rotor (16) dispuesto para controlar las corrientes ( $i_r$ ,  $i_{qr}$ ,  $i_{dr}$ ) de un rotor (12) del generador (9), medios de compensación (19) que tienen medios de cálculo, y medios para proporcionar entrada a los medios de compensación, siendo la entrada representativa de al menos la velocidad angular instantánea ( $\omega$ ) del rotor del generador,
- 10 caracterizada porque los medios de cálculo están dispuestos para calcular una salida de control de compensación instantánea ( $u_{qr-f}$ ,  $u_{dr-f}$ ) en dependencia de dicha velocidad angular instantánea del rotor del generador y alimentar la salida de control de compensación al rotor del generador, estando dispuestos los medios de cálculo para calcular dicha salida de control de compensación durante el funcionamiento de la turbina eólica para compensar, al menos parcialmente, dependencias de la velocidad angular del rotor de las
- 15 ubicaciones de polos de una función de transferencia del generador, haciendo así que una función de transferencia del generador resultante sea sustancialmente independiente de las variaciones en la velocidad angular del rotor durante el funcionamiento de la turbina eólica.
2. Una turbina eólica según la reivindicación 1, en la que la salida de control de compensación es añadida a una salida ( $u_{qrref}$ ,  $u_{drref}$ ) desde el controlador de corriente del rotor.
- 20 3. Una turbina eólica según la reivindicación 1 o 2, en la que los medios para proporcionar una entrada a los medios de compensación proporcionan además una entrada que representa magnitudes eléctricas, tales como corrientes y tensiones.
4. Una turbina eólica según la reivindicación 3, en la que dicha entrada incluye una corriente de referencia del rotor ( $i_{qrref}$ ,  $i_{drref}$ ).
- 25 5. Una turbina eólica según la reivindicación 3 o 4, en la que dicha entrada incluye corrientes de estator ( $i_s$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}$ ).
6. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 3-5, en la que dicha entrada incluye corrientes de rotor.
7. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 3-6, en la que la función de transferencia de los
- 30 medios de compensación está diseñada además para calcular la salida de control de forma que las corrientes del rotor sean efectivamente desacopladas en dos componentes mutuamente ortogonales ( $i_{qr}$ ,  $i_{dr}$ ) que pueden ser controladas sustancial e independientemente por el controlador de corrientes del rotor.
8. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en la que los medios de compensación comprenden medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones de la salida de control.
- 35 9. Una turbina eólica según la reivindicación 8, en la que los medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones comprenden uno o mas filtros de avance (23).
10. Una turbina eólica según la reivindicación 8 o 9, en la que los medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones están diseñados para proporcionar amortiguación a una frecuencia que se desvía menos de un
- 40 5% de la frecuencia de la red.
11. Una turbina eólica según cualquiera de las reivindicaciones 8-10, en la que los medios para proporcionar amortiguación de las oscilaciones son sintonizables a una o mas frecuencias bien definidas.
12. Un procedimiento para el funcionamiento de una turbina eólica de velocidad de rotación variable que tiene un generador de inducción doblemente alimentado acoplado a un rotor de la turbina eólica, que comprende las etapas de:
- 45 proporcionar entrada a los medios de compensación, siendo la entrada representativa de al menos la velocidad angular instantánea del rotor del generador,

- 5 disponer los medios de cálculo de los medios de compensación para calcular una salida de control de compensación instantánea en dependencia de dicha velocidad angular instantánea del rotor del generador durante el funcionamiento de la turbina eólica para compensar al menos en parte dependencias de la velocidad angular del rotor de las ubicaciones de los polos de una función de transferencia del generador, haciendo así que una función de transferencia del generador resultante sea sustancialmente independiente de las variaciones en la velocidad angular del rotor durante el funcionamiento de la turbina eólica, y
- alimentar la salida de control de compensación al rotor del generador.
- 10 13. Un procedimiento según la reivindicación 12, que comprende además la etapa de disponer los medios de calculo para calcular la salida de control de forma que las corrientes del rotor sean efectivamente desacopladas en dos componentes mutuamente ortogonales que pueden ser controlados de manera sustancialmente independiente por el controlador de corrientes del rotor.
14. Un procedimiento según la reivindicación 12 o 13, que comprende además la etapa de disponer los medios de compensación para proporcionar amortiguación de oscilaciones de la salida de control.
- 15 15. Un procedimiento según la reivindicación 14, en el que la amortiguación proporcionada de las oscilaciones es sintonizable a una o más frecuencias bien definidas.



**Fig. 1**



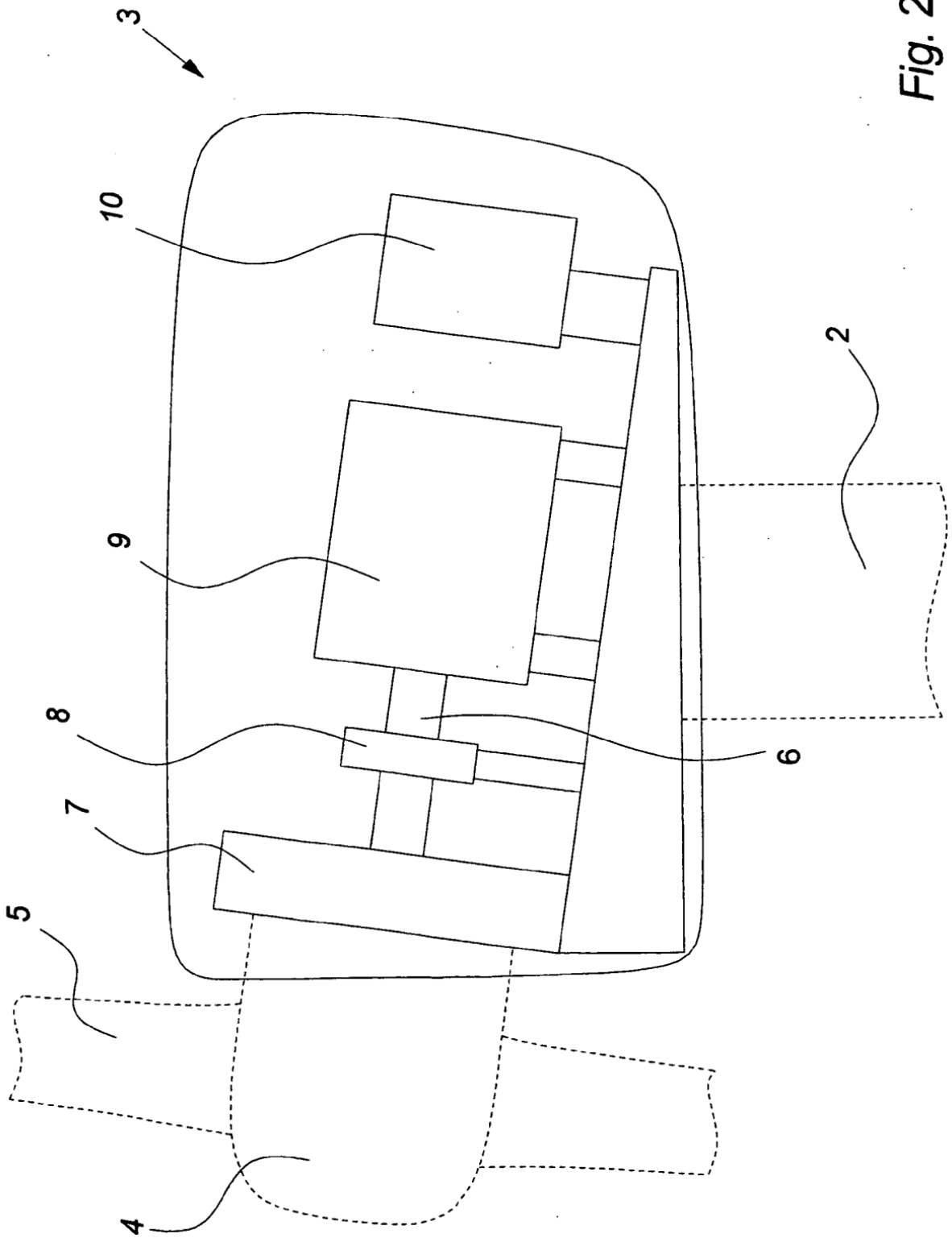


Fig. 2

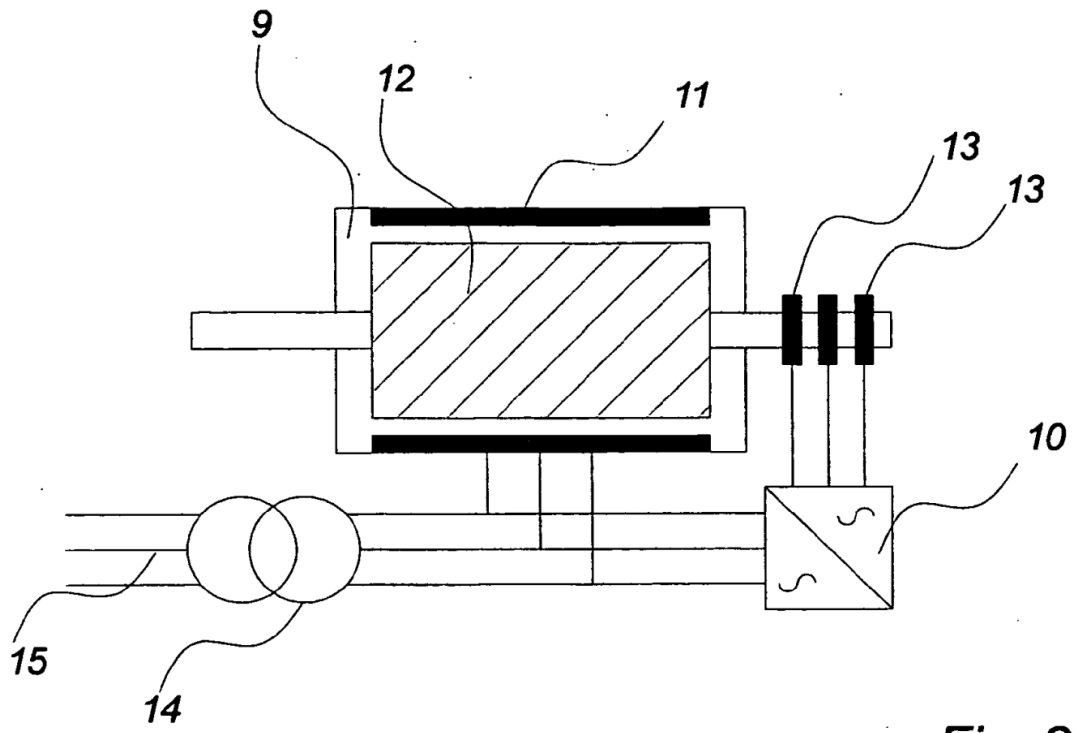


Fig. 3

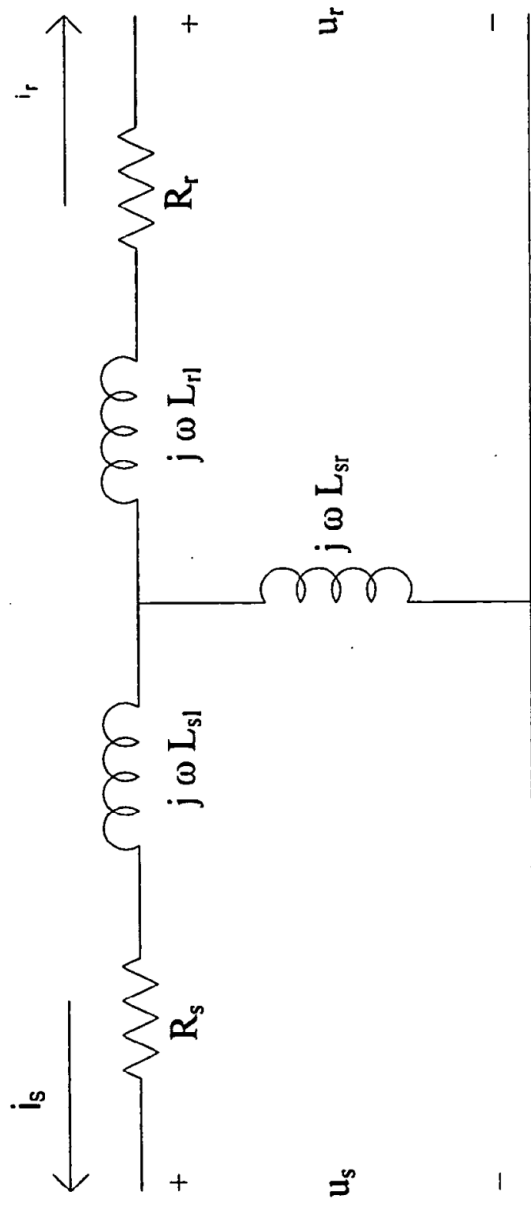
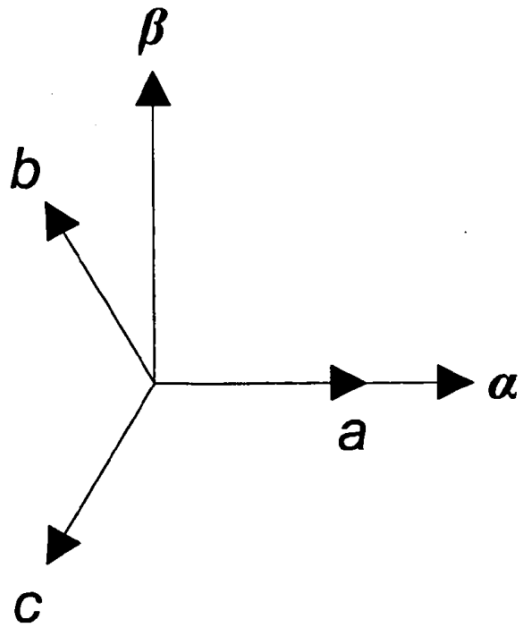
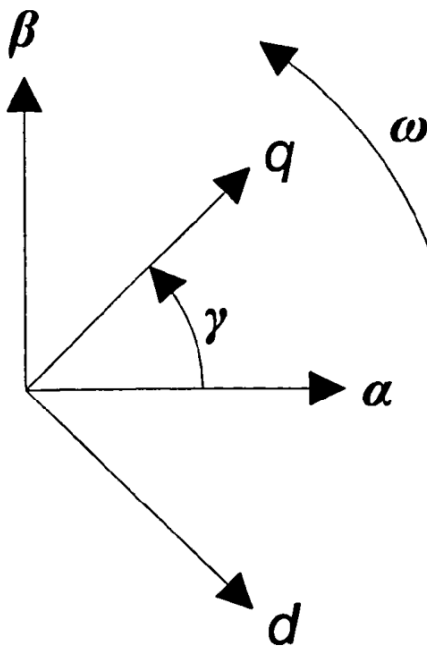


Fig. 4



*Fig. 5a*



*Fig. 5b*

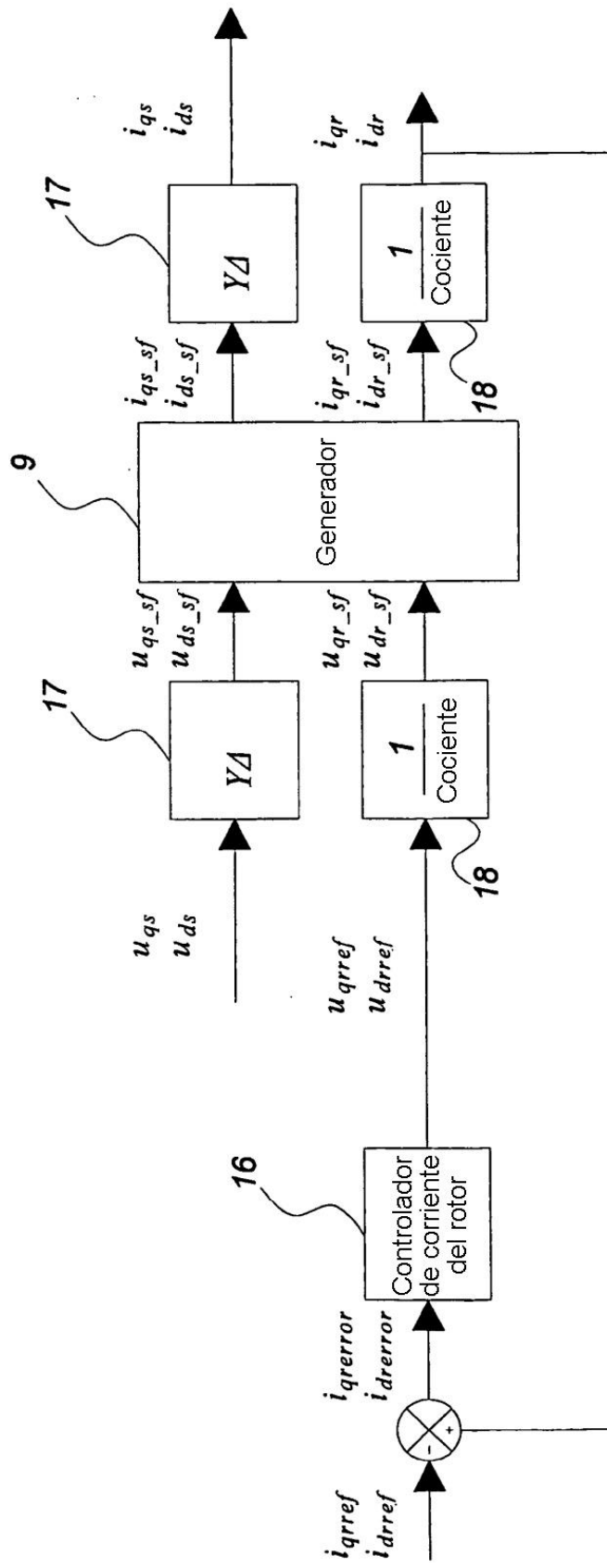


Fig. 6

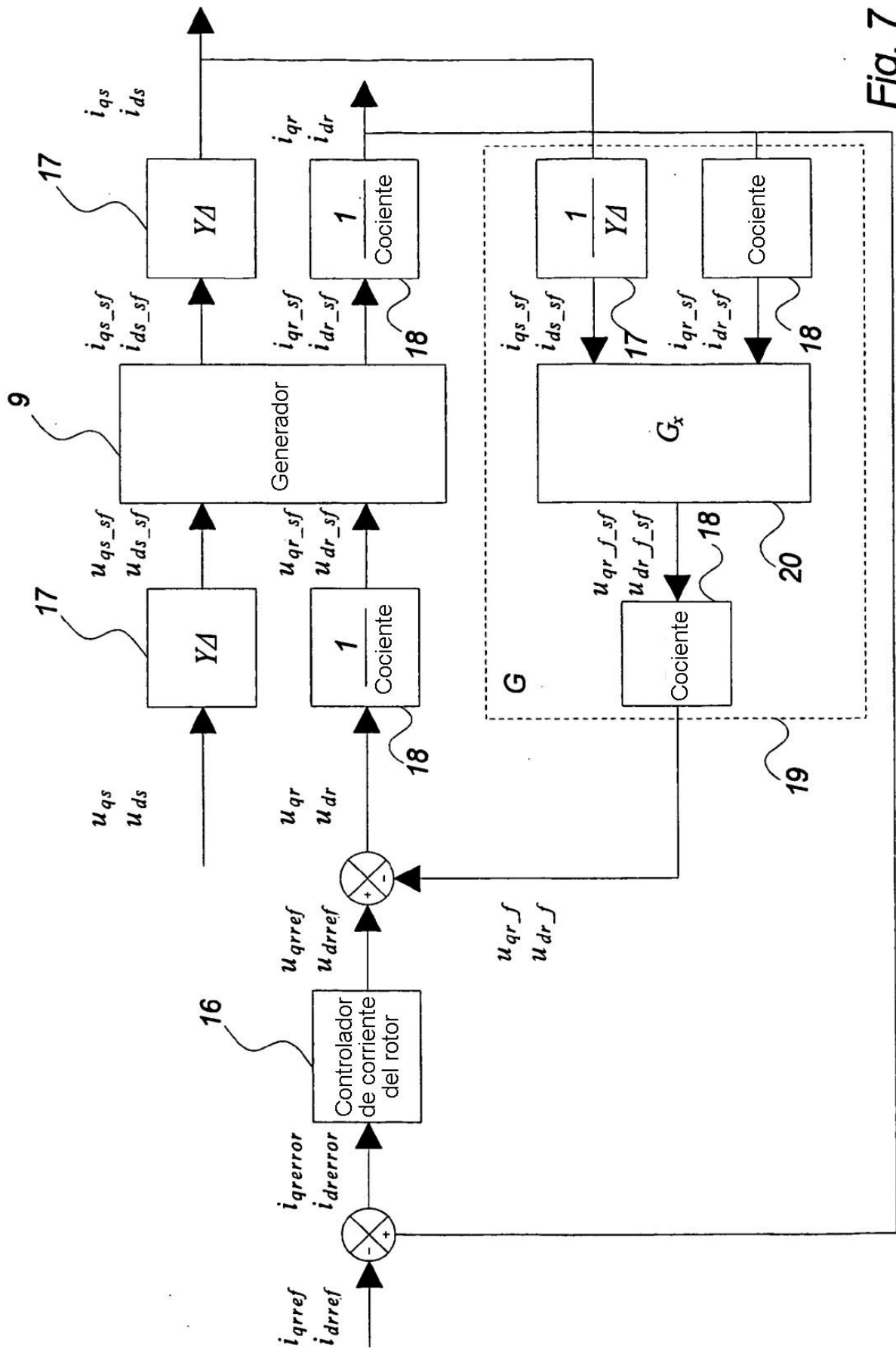
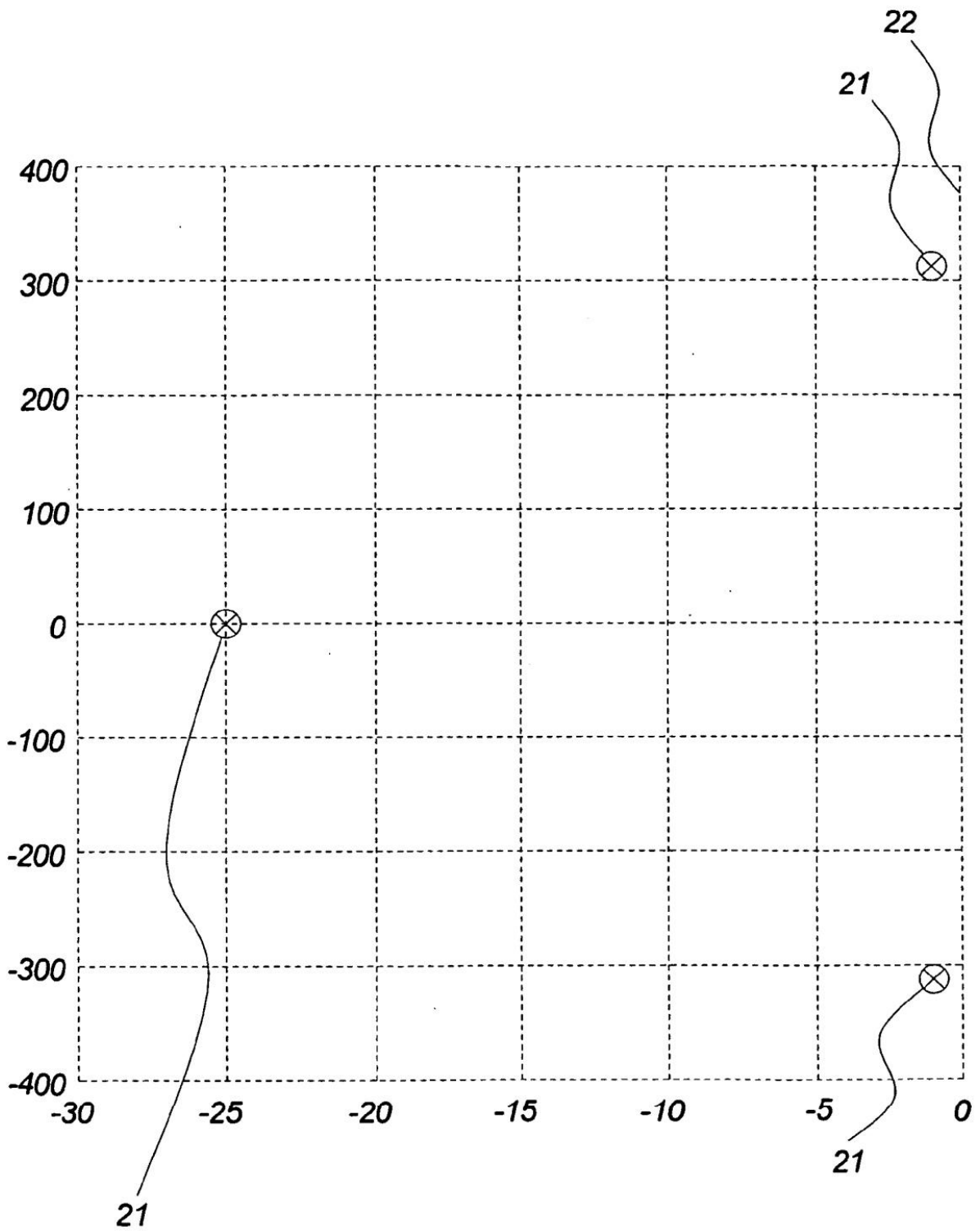


Fig. 7



**Fig. 8**

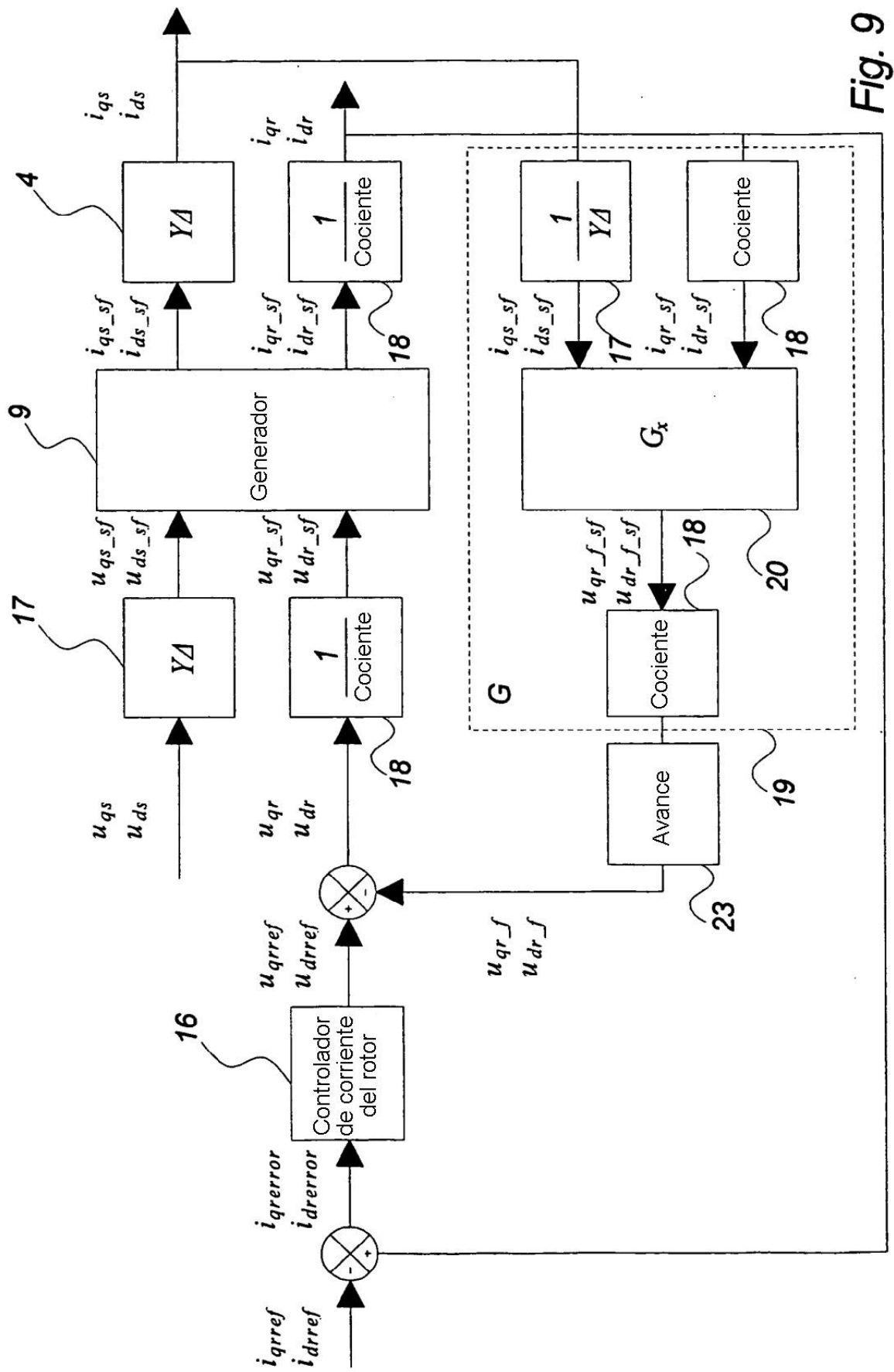
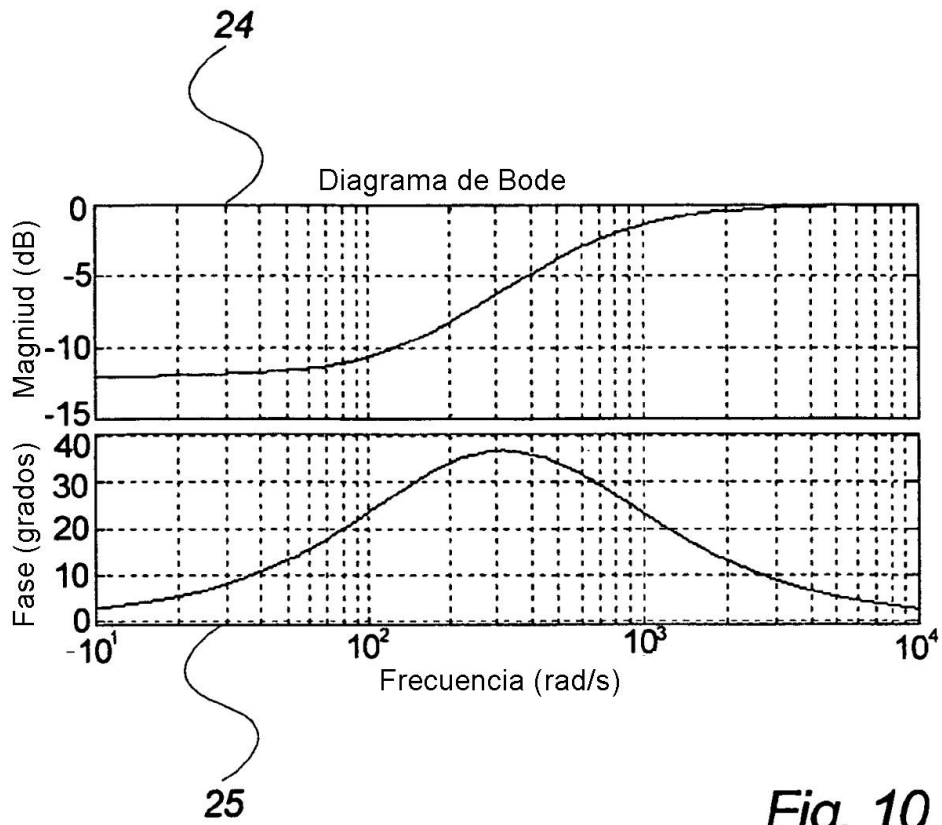
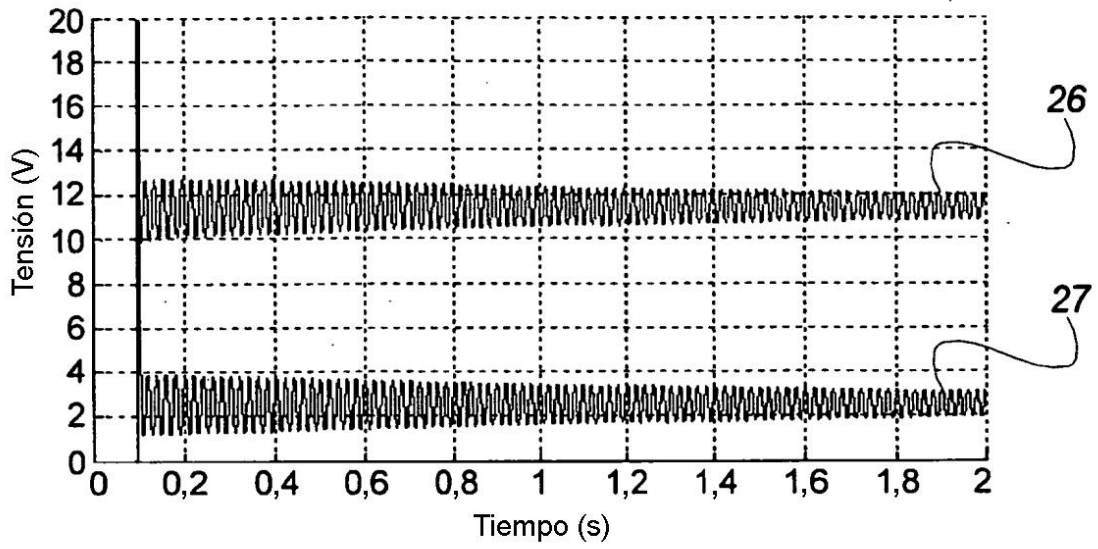


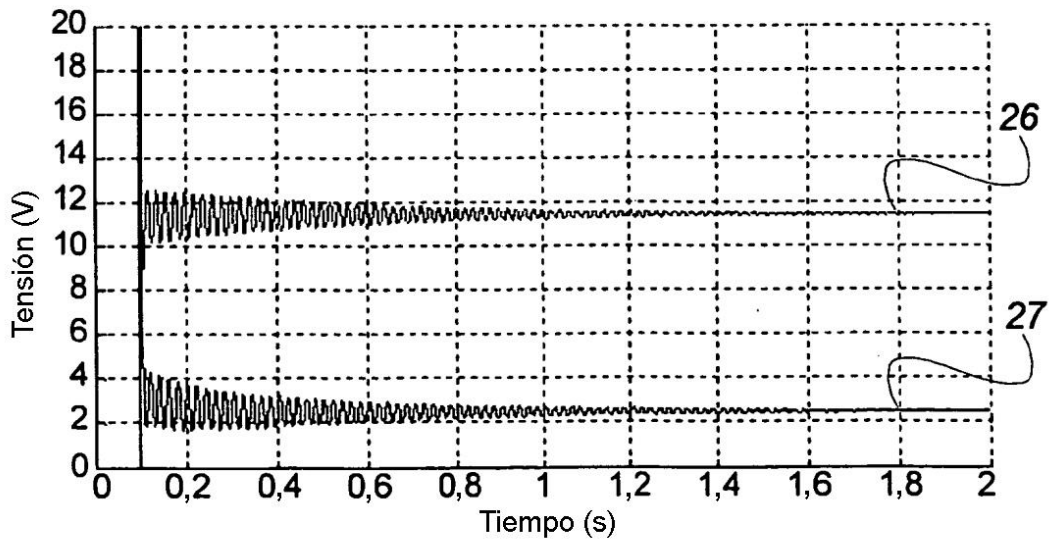
Fig. 9







*Fig. 11a*



*Fig. 11b*