

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 438 994**

51 Int. Cl.:

H02P 3/22 (2006.01)

H02P 9/10 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.02.2007 E 07804753 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.10.2013 EP 1997221**

54 Título: **Aerogenerador de velocidad variable que tiene una máquina excitatriz y un convertidor de energía no conectado a la red**

30 Prioridad:

17.03.2006 US 783029 P

30.06.2006 US 477593

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

21.01.2014

73 Titular/es:

**INGETEA POWER TECHNOLOGY, S.A. (100.0%)
Parque Tecnológico de Bizkaia, Edificio 106, 2a
planta
48170 Zamudio (Bizkaia), ES**

72 Inventor/es:

**RIVAS, GREGORIO;
GARMENDIA, IKER;
ELORRIAGA, JOSU;
MAYOR, JESÚS;
PÉREZ BARBACHANO, JAVIER;
SOLE, DAVID y
ACEDO, JORGE**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 438 994 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

Aerogenerador de velocidad variable que tiene una máquina excitatriz y un convertidor de energía no conectado a la red

Antecedentes de la invención5 **Campo de la invención**

La presente invención está relacionada con el campo de los aerogeneradores de velocidad variable, y, más particularmente, con un aerogenerador de velocidad variable que comprende un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, *doubly fed induction generator*), una máquina excitatriz, un convertidor estático intermedio no conectado a la red, control de potencia y regulación de ángulo de ataque (*pitch*).

10 Descripción de la técnica anterior

En los últimos años, la generación de energía eólica ha aumentado considerablemente por todo el mundo. Se prevé ampliamente que este crecimiento continúe en las próximas décadas, incluso cuando la industria y la tecnología hayan pasado a la madurez en este campo. A medida que los parques eólicos crecen en tamaño y la base total de capacidad eólica instalada sigue en aumento, la importancia de mejorar la calidad de la potencia de salida se convierte en un desafío de gran importancia para los desarrolladores eólicos y los clientes de las instalaciones por igual.

El transporte de energía eléctrica es un proceso en el suministro de electricidad a los consumidores. A un sistema de transporte de energía a menudo se le hace referencia como "red". Las empresas de transporte deben cumplir el reto de conseguir la capacidad máxima fiable de cada línea de transporte. Sin embargo, debido a consideraciones sobre estabilidad del sistema, la capacidad real puede ser menor que el límite físico de la línea. De este modo, para mejorar la estabilidad del sistema se necesitan buenas fuentes limpias de energía eléctrica.

En la mayoría de las aplicaciones, los aerogeneradores producen energía eléctrica e introducen corriente en la red eléctrica. Esto puede causar desviaciones de la tensión de la red local, tal como un cambio del nivel de tensión en estado estacionario, variaciones dinámicas de tensión, oscilaciones, una inyección de corrientes con formas de onda no sinusoidales (es decir armónicos), y similares.

Estos efectos pueden ser poco deseables para los equipos de los usuarios finales y otros generadores o los componentes conectados a la red, tales como transformadores. A medida que aumenta la capacidad de potencia, surge la evidente necesidad de mejorar las características de la calidad de la potencia de salida de la turbina. El impacto de la calidad de la potencia de un aerogenerador depende de la tecnología implicada. A pesar de este hecho, los fabricantes de aerogeneradores no consideran la calidad de la potencia como una característica principal del diseño.

Originalmente, los primeros aerogeneradores se diseñaron para trabajar con una velocidad de rotación fija. Según este modelo, el generador de un aerogenerador está directamente conectado a la red y funciona a una velocidad determinada, lo que permite variaciones de velocidad muy pequeñas. En el caso de un generador asíncrono, sólo se permite el intervalo de deslizamiento del generador. El deslizamiento es la diferencia en la velocidad de rotación del rotor comparada con el campo magnético rotatorio del estátor. El deslizamiento del generador varía ligeramente con la cantidad de potencia generada, y por lo tanto no es totalmente constante. Por otra parte, estos aerogeneradores necesitan estrategias de limitación de corriente de arranque y elementos de compensación de energía reactiva durante el funcionamiento normal. La turbulencia del viento produce una variación no deseable del par que se transmite directamente a la cadena de impulsión del aerogenerador y, por tanto, a la potencia activa introducida en la red eléctrica.

Un tipo de aerogenerador que mantiene la velocidad de rotación del generador proporcional a la velocidad del viento, es un aerogenerador de velocidad variable. Con el fin de obtener la máxima eficiencia del aerogenerador, la velocidad de rotación del generador se adapta a las fluctuaciones de velocidad del viento. Este tipo de aerogenerador incluye convertidores electrónicos de potencia que están conectados a la red. Debido a este tipo de interfaz, las emisiones de armónicos de los convertidores electrónicos de potencia de la turbina se introducen en la red.

Actualmente se han generalizado los aerogeneradores de tipo de velocidad variable que utilizan convertidores electrónicos de potencia. Unos ejemplos de este aerogenerador de velocidad variable se describe en la patente de EE.UU. nº 5.083.039, patente de EE.UU. nº 5.225.712 o solicitud publicada de EE.UU. 2005/0012339. Estas turbinas, sobre la base de un sistema de convertidor total, incluyen un generador, un convertidor en el lado del generador, un Bus de enlace de CC y un convertidor activo conectado a la red. El convertidor del lado del generador transfiere la energía de frecuencia variable del generador al Bus de enlace de CC, y posteriormente el convertidor activo del lado de la red la transformada a una frecuencia fija. Algunas desventajas son comunes a todos los sistemas del convertidor total. La conmutación activa de los semiconductores del convertidor del lado de la red inyecta armónicos no deseables de alta frecuencia en la red. Para evitar los problemas ocasionados por estos

armónicos, se deben instalar varios filtros. Por otra parte, debido a los diferentes valores de impedancia en la red y a los armónicos ya existentes, se necesita diferente afinación de los filtros según las características de la ubicación de los parques eólicos.

Otro aerogenerador de velocidad variable se describe en la patente de EE.UU. nº 6.137.187. Como se muestra en la Figura 1, esta configuración de aerogenerador incluye un generador de inducción doblemente alimentado (1), un convertidor de potencia (4), que comprende un convertidor activo en el lado del rotor (5), un Bus de CC (8), y un convertidor activo en el lado de la red (7). En esta configuración, sólo una pequeña parte de la energía total se transfiere a través de los convertidores (5, 7) a la red (9). La energía la puede entregar a la red (9) directamente el estátor (3), mientras que el rotor (2) puede absorber o suministrar energía a la red (9) a través del convertidor de potencia (4) dependiendo de si el generador de inducción doblemente alimentado está en funcionamiento subsincrónico o supersincrónico. El funcionamiento con velocidad variable del rotor tiene la ventaja de que muchas de las variaciones más rápidas de la potencia no se transmiten a la red, sino que son suavizadas por la acción del volante de inercia del rotor. Sin embargo, el uso de convertidores electrónicos de potencia (4) conectados a la red (9) provoca una distorsión armónica de la tensión de la red.

Otros documentos también describen aerogeneradores de velocidad variable. Por ejemplo, la patente de EE.UU. nº 6.933.625 describe un sistema de velocidad variable que incluye un generador de inducción doblemente alimentado, un rectificador pasivo del lado de la red con control de potencia escalonada y control de ángulo de ataque dependiente. En este caso, hay un convertidor activo en el lado del rotor, un rectificador pasivo en el lado de la red y un elemento conmutable disipador de energía conectado en el Bus de enlace de CC. Durante el funcionamiento supersincrónico la energía extraída del rotor se disipa en el elemento conmutable disipador de energía, reduciendo la eficiencia del aerogenerador; durante el funcionamiento del aerogenerador en el modo subsincrónico, la energía es rectificadora por el rectificador pasivo del lado de la red que provoca armónicos no deseables de baja frecuencia en la red. De este modo, se necesitan filtros complejos de atenuación. La patente de EE.UU. nº 6.566.764 y la patente de EE.UU. nº 6.856.038 describen unos aerogeneradores de velocidad variable que tienen un convertidor matricial. Ambos casos incluyen convertidores electrónicos de potencia conectados a la red, que pueden ocasionar tensiones armónicas no deseadas.

Todas las patentes de EE.UU. anteriormente mencionadas y otras soluciones existentes en aerogeneradores de velocidad variable que incluyen electrónica de potencia tienen convertidores conectados a la red. Dependiendo de la tecnología utilizada en los convertidores, hay diferentes intervalos de armónicos introducidos en la red que deben ser atenuados utilizando filtros, y ser afinados para la ubicación de aplicación final, haciendo que los sistemas sean más caros y menos fiables.

En vista de estos problemas en el estado en la técnica anterior, es necesario proporcionar una mejor solución de potencia, que pueda aplicarse a los aerogeneradores de velocidad variable.

Otro problema no deseado, especialmente en el caso de redes débiles, es el consumo de potencia reactiva durante la sincronización del generador. Por ejemplo, en la patente de EE.UU. nº 6.600.240 se describe un método de sincronización. Este método inicia la conexión del estátor del generador a la red mientras que el convertidor de potencia está desactivado y el rotor ha alcanzado una velocidad predefinida. En este momento, toda la corriente de magnetización es suministrada por la red, lo que provoca un consumo de potencia reactiva. Este consumo de potencia reactiva a veces no es permitido por alguna de las nuevas regulaciones de cumplimiento de red. Esta patente también describe un proceso de desconexión. El proceso empieza reduciendo la corriente de rotor e inhabilitando el convertidor respecto al rotor. En este momento, la corriente de magnetización reactiva es suministrada por la red. Para desconectar el generador, el contactor se abre con la corriente reactiva, disminuyendo la vida operativa del contactor. Por consiguiente, existe la necesidad de proporcionar un método para la sincronización, la conexión y la desconexión a la red del generador de inducción doblemente alimentado, que evite el consumo de potencia reactiva y aumente la vida útil de los dispositivos que se conectan.

Otro aspecto que determina la calidad de la energía eléctrica inyectada a la red es el control del generador. Un tipo de control del convertidor del lado del generador se conoce como "control orientado al campo" (FOC, *field orientated control*). El método de FOC se basa en el modelo eléctrico y los parámetros de la máquina. Debido a la dispersión de los parámetros de la máquina, el par no puede calcularse con precisión y se necesitan circuitos adicionales de ajuste en línea. Además, el método de FOC que se utiliza introduce retrasos en la identificación de la posición de flujo cuando se produce un fallo en la red, lo que hace más difícil cumplir con los nuevos requisitos de cumplimiento de la red.

En los aerogeneradores de velocidad variable de la técnica anterior con configuración DFIG, aunque la potencia del estátor permanece constante, la potencia del rotor también se introduce en la red a través del convertidor de potencia. Debido a las fluctuaciones de la potencia del rotor, la potencia total introducida en la red también tiene fluctuaciones, que afectan a la calidad de la energía eléctrica de salida del aerogenerador.

Los aerogeneradores de velocidad variable, que sólo utilizan un generador de inducción doblemente alimentado, no pueden utilizar frenado eléctrico. Tal como se ha descrito anteriormente, en este tipo de configuración, la energía es entregada a la red directamente por el estátor, y una pequeña parte de la energía total se transmite desde el rotor a

la red a través de los convertidores. Cuando se produce una parada accidental del aerogenerador, por ejemplo durante un fallo persistente en la red, la potencia del generador disminuye considerablemente. Para detener el aerogenerador solo se puede aplicar frenado rápido no eléctrico, tal como ángulo de ataque de las palas. Este modo de funcionamiento produce una gran resistencia mecánica en los componentes del aerogenerador, que puede ocasionar daños prematuros. De este modo, existe la necesidad de frenado adicional para evitar esta tensión mecánica.

El uso de transmisión de enlace de CC de alta tensión (HVDC, *high voltage DC*) en los parques eólicos se describe en la patente nº WO01/25628, que incluye un generador sincrónico como el dispositivo principal de generación. Debido a la utilización de máquinas sincrónicas, la frecuencia de salida varía con el viento, por lo que especialmente en condiciones de poco viento, el contenido residual de la tensión de CC de salida pasa a nivel alto. Por otra parte, el rectificador y el transformador de salida deben estar sobredimensionados porque deben ser capaces de funcionar a baja frecuencia. Detalles adicionales, como una especial construcción del circuito del rotor con baja inductancia, son obligatorios para la regulación precisa de la potencia de salida.

BAUER P ET AL: el documento "Evaluation of electrical systems for offshore windfarms", INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENC, 2000, PISCATAWAY, N.J., EE.UU.S, IEEE, vol. 3, 8 de octubre de 2000 (2000-10-08), páginas 1416-1423, XP010521303, ISBN: 0- 7803-6401-5 describe un inventario de los sistemas eléctricos en los aerogeneradores. La primera parte trata de tipos de generadores e incluye reluctancia variable, alimentación sin escobillas, superposición de caja de engranajes y opciones hipocicloides. La segunda parte se centra en el transporte de la energía eléctrica a la costa. Se mencionan diseños innovadores y se presenta una evaluación económica preliminar. Se eligen criterios de evaluación para clasificar estos sistemas.

PATIN N ET AL: el documento "Analysis and control of a cascaded doubly-fed induction generator", INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 2005. IECON 2005. 32ª CONFERENCIA ANUAL DE IEEE RALEIGH, NC, EE.UU. 6-10 NOV. de 2005, PISCATAWAY, N.J., EE.UU., IEEE, 6 de noviembre de 2005 (2005-11 -06), páginas 2481-2486, XP010876268, ISBN: 0-7803 9252-3 describe un generador de inducción doblemente alimentado en cascada (CDFIG). Esta estructura robusta sin escobillas es impulsada por un convertidor de baja potencia en comparación con la potencia suministrada a la red. Sin embargo, debido a su inherente complejidad, se necesita una metodología de diseño de control eficiente. El documento intenta establecer una rigurosa metodología de diseño basada en la inversión del modelo dinámico del sistema. Utiliza una representación original del sistema llamado circuito equivalente dinámico. El método se describe como que se ha aplicado con éxito en dos casos: un CDFIG conectado a una red eléctrica y un CDFIG conectado a una red aislada en presencia de una cantidad significativa de carga no lineal.

Compendio de la invención

Según un aspecto de un ejemplo de realización de la presente invención, se proporciona un aerogenerador de velocidad variable según lo establecido en la reivindicación acompañante 1 y un método según lo establecido en la reivindicación acompañante 11. En las reivindicaciones dependientes se dan más detalles. Según este aspecto, la electrónica de potencia no se conecta a la red. De este modo, únicamente se entrega energía a la red a través del estátor del generador de inducción doblemente alimentado, evitando la distorsión armónica no deseada, y logrando una mejor calidad de la energía a introducir en la red eléctrica. Además, puede evitarse el uso de filtros complejos y su afinación según diferentes ubicaciones, lo que hace que el sistema sea más económico y fiable.

Debido a la topología de la invención, únicamente se entrega energía a la red a través del estátor del generador de inducción doblemente alimentado. De este modo, se evitan las fluctuaciones de la potencia del rotor y se mejora la calidad de la potencia de salida del aerogenerador.

En una realización de la presente invención el aerogenerador de velocidad variable utiliza Orientación de Flujo de Red (GFO, *Grid Flux Orientation*) para controlar con precisión la energía inyectada a la red. Una ventaja de este sistema de control es que no depende de los parámetros de la máquina, que pueden variar de manera significativa, y los modelos teóricos de máquina, evitando el uso de circuitos de ajuste adicionales y logrando una mejor calidad de la energía introducida en la red eléctrica.

Breve descripción de los dibujos

La invención y su modo de funcionamiento se entenderán más plenamente a partir de la siguiente descripción detallada cuando se tome con los dibujos incorporados, en los que:

FIG. 1: Ilustra un sistema convencional de aerogenerador de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado y convertidores de potencia conectados a la red.

FIG. 2: Ilustra una implementación de un diagrama de circuito para un aerogenerador de velocidad variable que tiene una máquina excitatriz y un convertidor de potencia no conectado a la red, según un ejemplo de realización.

FIG. 3: Ilustra un diagrama de bloques de un control de potencia y un control de ángulo de ataque para un aerogenerador de velocidad variable.

FIG. 4: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del método de Control de Seguimiento de Potencia Óptima (OPTC, *Optimum Power Tracking Control*).

FIG. 5: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del GFO y del contralor del generador de inducción doblemente alimentado.

5 FIG. 6: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del Controlador de máquina excitatriz.

Figura 7: Ilustra un diagrama de flujo de una realización de la secuencia de sincronización, conexión y desconexión.

Figura 8: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del sistema de control de ángulo de ataque.

Figura 9: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del modo de regulación de tensión utilizado durante la sincronización.

10 Figura 10: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del aerogenerador de HVDC con rectificador y generador de alta tensión.

Figura 11: Ilustra un diagrama de bloques de una realización del aerogenerador de HVDC con rectificadores, transformador y generador de baja tensión.

Descripción detallada

15 A continuación se describe un aerogenerador de velocidad variable según los distintos ejemplos de realizaciones. Se hará referencia a varios dibujos sólo como ilustración para una mejor comprensión de la descripción. Por otra parte, a lo largo de la descripción se usarán los mismos números de referencia que hacen referencia a piezas iguales o similares.

Visión general

20 Generalmente, el generador del aerogenerador de velocidad variable según diversos ejemplos de realizaciones de la presente invención canaliza la energía eléctrica generada por el rotor en el funcionamiento supersincrónico del generador de inducción doblemente alimentado, de máquina excitatriz. La máquina excitatriz convierte luego la energía eléctrica de nuevo en energía mecánica de rotación, que luego se puede utilizar para aumentar aún más la energía eléctrica generada por el estátor que se entrega a la red. La energía eléctrica sólo es entregada a la red por el estátor del DFIG que evita la entrega de energía a la red a través de convertidores de potencia. De este modo, se mejora la calidad de la energía eléctrica suministrada a la red.

25 Además, durante el funcionamiento subsincrónico, cuando el rotor, en lugar de generar energía eléctrica, requiere una fuente de energía eléctrica, una parte de la energía de rotación generada por el viento es utilizada por la máquina excitatriz para generar la energía eléctrica que necesita el rotor.

30 El sistema de generador de aerogenerador de velocidad variable se muestra en líneas generales en la Figura 2. En esta realización, el sistema de velocidad variable comprende una o más palas (201) de rotor, un buje de rotor que se conecta a una cadena de impulsión. La cadena de impulsión comprende principalmente un árbol (202) de turbina, una caja de engranajes (203) y un generador de inducción doblemente alimentado (205). El estátor del generador de inducción doblemente alimentado (210) puede conectarse a la red utilizando uno o más contactores (215). El sistema también comprende una máquina excitatriz (212), tal como una máquina asincrónica, una máquina de CC, una máquina sincrónica (p. ej. un imán permanente), o una máquina eléctrica invertible que funciona como un motor o como un generador, que está mecánicamente acoplada a la cadena de impulsión y dos convertidores electrónicos activos de potencia (222, 225) unidos por un Bus de enlace de CC (224) (es decir, un convertidor de acoplamiento paralelo, *back to back converter*) con uno entre el lado de CA conectado al circuito del rotor del generador de inducción doblemente alimentado y el otro lado de CA conectado a la máquina excitatriz (212). El convertidor activo de potencia (225) que regula la máquina excitatriz no está conectado a la red, de tal manera que el convertidor activo de potencia está aislado de la red. Como alternativa, en lugar de un convertidor de acoplamiento paralelo se puede conectar un cicloconvertidor, un convertidor matricial o cualquier otro tipo de convertidor bidireccional. El sistema también podría incluir un circuito de freno eléctrico (231), tal como un recortador de CC, conectado al Bus de CC. La unidad de control de convertidor (CCU) (200) lleva a cabo la regulación de potencia del generador de inducción doblemente alimentado y de la máquina excitatriz. El sistema comprende unos filtros, tal como un filtro dV/dt (220) que se conecta al circuito del rotor del generador de inducción doblemente alimentado con el fin de protegerlo contra las variaciones bruscas de tensión producidas por los conmutadores activos del convertidor electrónico de potencia. Por otra parte, un filtro dV/dt (227) se conecta entre el convertidor electrónico de potencia y la máquina excitatriz. En una realización, un módulo de protección (219) contra los fallos en la red está conectado al rotor del generador de inducción doblemente alimentado.

El sistema de generador de aerogenerador de velocidad variable descrito en esta realización puede trabajar por debajo de la velocidad sincrónica (es decir subsincrónico) y por encima de la velocidad sincrónica (es decir supersincrónico). Durante el funcionamiento subsincrónico, la energía fluye desde la máquina excitatriz (212) al rotor

(211) del generador de inducción doblemente alimentado (205), de modo que la máquina excitatriz (212) actúa como un generador. Por otro lado, durante el funcionamiento supersincrónico, la energía fluye desde el rotor (211) del generador de inducción doblemente alimentado (205) a la máquina excitatriz (212), por lo tanto la máquina excitatriz actúa como un motor. El equilibrio de potencia durante todo el intervalo de velocidades es de tal manera que la energía generada/consumida en la máquina excitatriz (212) es consumida/generada en el rotor (211) de la máquina de inducción doblemente alimentada, excepto por las pérdidas en los diferentes elementos.

Debido a la topología del sistema de generador de aerogenerador de velocidad variable, únicamente se entrega energía a la red a través del estátor (210) del generador de inducción doblemente alimentado (205). No hay convertidor electrónico de potencia conectado a la red. En consecuencia, se evita la distorsión armónica no deseada y se consigue una mejor calidad de la energía a introducir en la red eléctrica. Además, también se evita el uso de filtros complejos y sus demandas de afinación según diferentes ubicaciones, lo que hace que el sistema sea más económico y fiable.

Esta topología también permite el uso de un freno eléctrico en un generador de inducción doblemente alimentado. En el caso de una parada de emergencia del aerogenerador debida, por ejemplo, de un apagón de la red, el estátor se desconecta y la potencia producida por el generador no se puede introducir en la red. Sin embargo, la máquina excitatriz (212) puede utilizarse como generador, y por tanto la energía puede ser transferida desde la máquina excitatriz (212) al Bus de corriente continua (224). Por lo tanto, parte de la energía eléctrica se drena en el reostato del recortador. Finalmente, para detener el aerogenerador se aplica un freno mecánico o aerodinámico, tal como el control del ángulo de ataque de las palas. Esta realización de la presente invención permite que el generador aplique freno eléctrico en una configuración de DFIG, ayudando al aerogenerador a detenerse y evitando una gran resistencia mecánica en los componentes del aerogenerador, que puede causar daños prematuros.

El sistema de control de aerogenerador de velocidad variable, tal como se muestra en la Figura 3, comprende un controlador general (302), unos controladores de potencia y un regulador de ángulo de ataque. El punto de consigna de potencia es calculado por el controlador de seguimiento de potencia óptima (OPTC) (303) a partir de la velocidad medida del viento. Este punto de consigna se envía al Controlador General (302) y por tanto al Controlador (300) de DFIG. La energía entregada a la red por el generador de inducción doblemente alimentado (205) es controlada por el controlador (300) de DFIG que hace una regulación eficaz de la potencia activa total y la potencia reactiva total a través del convertidor electrónico activo de potencia (222). El control electrónico de potencia del generador de inducción doblemente alimentado (205) se basa en la Orientación de Flujo de Red (GFO). La máquina excitatriz (212) es regulada por un convertidor activo electrónico de potencia (225) y controlada por el controlador (301) de excitador. La potencia transferida a/desde la máquina excitatriz (212) es controlada por el convertidor electrónico activo de potencia, utilizando como variable principal de regulación el nivel de tensión del Bus de CC, medido con el sensor de tensión del Bus de CC (223).

El sistema de control de aerogenerador de velocidad variable también comprende un sistema de control de ángulo de ataque, que se basa en la limitación de la potencia demandada para el excitador. El controlador de avance basado en excitador (EBPC, *Exciter Based Pitch Controller*) (304) regula el ángulo de ataque de las palas con el fin de limitar la aerodinámica. El EBPC (304) también proporciona un punto de consigna del ángulo de ataque para el OPTC (303) desde la desviación de potencia del excitador y por la medición de la velocidad y la posición del motor de ángulo de ataque (305). Además, EBPC (304) comprende un Sistema de antidesgaste de colector y de lubricación (CAWLS, *Collector Anti-Wearing & Lubrication System*), con el fin de proteger el colector de la máquina de CC utilizado para el movimiento del ángulo de ataque y para mejorar la lubricación de los rodamientos de las palas.

La topología de la presente invención también es adecuada para la transmisión de enlace de CC de alta tensión (HVDC) en sistemas de generación de velocidad variable. Como se muestra en la Figura 10 y en la Figura 11, la salida de CC puede ser producida utilizando un generador de alta tensión con un rectificador (1001), como se muestra en la Figura 10, o con un generador de baja tensión y un transformador adicional (1101) con uno o más secundarios, como se muestra en la Figura 11, en donde cada secundario es rectificado y todas esos rectificadores están conectados en serie o en paralelo. Se necesitan dispositivos de conexión (1002) y dispositivos de protección (1003) adicionales.

Debido a la topología de la presente invención, la frecuencia de salida de la tensión de CA puede ser fija, lo que permite un menor dimensionamiento de los rectificadores y transformadores requeridos y reducir la fluctuación de la tensión de salida de CC en condiciones de poco viento, lo que mejora la potencia de salida.

Por otra parte, una vez que el aerogenerador empieza a rotar, todos los sistemas auxiliares pueden ser alimentados por la máquina excitatriz (212), independientemente del funcionamiento del generador principal, lo que reduce el tamaño del suministro ininterrumpible de energía o de la HVDC al convertidor de CA.

Hay que observar que, aunque se describen aplicaciones de red, para un experto en la técnica será evidente que la presente invención también puede utilizarse para otras aplicaciones, tales como sistemas autónomos de potencia o cualquier sistema de generación energética de velocidad variable. Por ejemplo, esos otros sistemas de generación

energética de velocidad variable pueden incluir sistemas de energía basados en energía de las olas y de las mareas, energía geotérmica, aplicaciones de energía solar, energía hidroeléctrica, motores de combustión interna, etc.

Controlador de seguimiento de potencia óptima (OPTC)

5 El controlador de seguimiento de potencia óptima (OPTC) (303) ajusta la referencia de potencia para el circuito de control de potencia, realizado por el controlador (300) de DFIG, con el fin de controlar la potencia del generador. Esta referencia se basa en medir la velocidad del viento como principal variable de regulación.

10 Según esta realización, dentro de un intervalo de velocidad de funcionalmente puede llevarse a cabo un sistema de velocidad variable en donde un seguimiento del coeficiente de potencia óptima (C_p). Este intervalo está determinado por un límite inferior de velocidad (ω_0) y un límite superior de velocidad (ω_1) y su correspondiente límite inferior de potencia y límite superior de potencia (P_0 y P_1 respectivamente).

La Figura 4 ilustra un diagrama de bloques de una realización del Controlador de seguimiento de potencia óptima (OPTC). El aporte principal al OPTC es la velocidad del viento (u), que se mide por medio de uno o más anemómetros. En una realización, esta medición se filtra (401) para evitar que las frecuencias indeseadas se amplifiquen a través del sistema de control y de modo que se maneje una señal lisa.

15 OPTC calcula un valor de potencia correspondiente para cada velocidad del viento particular (402). Esta relación se determina a partir de las características generales del aerogenerador, principalmente la cabeza del rotor, y sus puntos corresponden con la máxima eficacia aerodinámica. De este modo, C_p se maximiza para lograr la máxima potencia de salida. El valor de potencia obtenido es el aporte para un limitador de intervalo de potencia (403). Esta implementación comprende el circuito principal.

20 Se aplica una corrección auxiliar (405) del circuito principal al valor obtenido para mejorar la capacidad de respuesta del seguimiento optimizado de C_p . La velocidad óptima del generador de inducción doblemente alimentado se calcula (406) a partir de una señal de velocidad del viento medida y filtrada. La velocidad óptima del rotor (en el árbol de baja velocidad) es el resultado de dividir el producto de la relación óptima de velocidad en la punta (λ) y la velocidad del viento (u) por el radio del rotor en el plano (R). La velocidad de rotación del generador de inducción doblemente alimentado se calcula multiplicando este valor por la relación de la caja de engranajes. El valor de velocidad obtenido es el aporte para un limitador de intervalo de velocidad (407). La salida de este bloque se compara (408) con una velocidad corregida de ángulo de ataque (PCS, *pitch corrected speed*), calculada en el bloque de velocidad adaptada de ángulo de ataque (PASB, *Pitch Adapted Speed Block*) (410).

30 En el PASB se introduce la referencia de ángulo de ataque, el ángulo mínimo de ataque y la velocidad de rotación medida. Se aplica una ganancia (413) a la diferencia entre el punto de consigna del ángulo de ataque filtrado (β_{ref}) y el ángulo de ataque mínimo (β_{min}). Para el acoplamiento, el término se pone inicialmente a cero, siendo $\beta_{ref} = \beta_{min}$. La velocidad de rotación medida (ω) se añade para calcular dicha velocidad corregida.

Después de esa corrección por parte del PASB (408), se aplica una ganancia (409) al error obtenido que proporciona un ΔP que debe añadirse al punto de consigna de potencia calculado previamente.

35 Una vez corregido el punto de consigna de potencia obtenido (404), el valor se aporta a un limitador de intervalo de potencia (415) para asegurarse de que esta referencia de potencia está entre los umbrales P_0 y P_1 . La referencia obtenida es el punto de consigna de potencia (SP_P).

40 A este punto de consigna de potencia se aplica finalmente una vigilancia de velocidad de rotación (417). En caso de que PCS sea inferior a ω_0 (419) se aplica una ganancia o un controlador diferente (420) a esa diferencia de velocidad que proporciona una $-\Delta P$. Por otro lado, si PCS es mayor que ω_1 (422), se aplica una ganancia (423) al error calculado que proporciona una ΔP , proporcional a la diferencia de velocidad en el aporte.

45 Por lo tanto, la corrección detallada anteriormente se aplica al punto de consigna de potencia SP_P, que, además, se aporta al limitador de intervalo de potencia (424) con el fin de asegurar que el punto de consigna calculado no supere la potencia nominal. Por tanto, la salida de OPTC es la referencia de potencia efectiva SP_Pef a transmitir al Controlador General (302) y, por tanto, al Controlador (300) de DFIG con el fin de controlar el generador de inducción doblemente alimentado.

50 Debido al controlador de seguimiento de potencia óptima, se mejora la calidad de la potencia de salida cuando las velocidades del generador son iguales o superiores a la velocidad del generador a la que se produce la potencia nominal. En los aerogeneradores de velocidad variable de la técnica anterior con una configuración de DFIG, aunque la potencia del estator permanece constante, la potencia del rotor también se introduce en la red a través del convertidor de potencia.

Debido a las fluctuaciones de la potencia del rotor, la potencia total introducida en la red también tiene fluctuaciones, que afectan a la calidad de la energía eléctrica de salida del aerogenerador. Dentro de la presente invención, al utilizar una máquina excitatriz y un convertidor de potencia no conectado a la red, únicamente se entrega potencia a

la red a través del estátor del generador de inducción doblemente alimentado, evitando las corrientes con fluctuaciones y mejorando la calidad de la potencia de salida del aerogenerador.

Controlador de Generador de inducción doblemente alimentado

5 El control de potencia activa y potencia reactiva del estátor del DFIG lo hace el controlador (300) del generador de inducción doblemente alimentado. El controlador ofrece buen control y prestaciones de regulación de la potencia total entregada a la red. Este control se basa, como se explica con detalle más adelante, en diferentes circuitos de regulación, totalmente independientes de los parámetros eléctricos de la máquina mediante el uso de Orientación de Flujo de Red (GFO). Al medir con gran precisión las diferentes magnitudes a regular, se controla perfectamente la potencia total entregada a la red por el estátor (210) del generador de inducción doblemente alimentado 205, logrando una energía de alta calidad.

10 El Controlador (300) del generador de inducción doblemente alimentado, ilustrado en la Figura 5, se basa en el control de la Orientación de Flujo de Red (GFO) y cuatro circuitos de regulación: Dos circuitos de corriente (I_{rq}, circuito de corriente de rotor (509), e I_{rd}, circuito de corriente de rotor (510)) y dos circuitos de potencia (P_s, circuito de potencia activa de estátor (505), y Q_s, circuito de potencia reactiva de estátor (506)).

15 En este ejemplo de realización de la presente invención, el controlador va a regular la potencia activa y la potencia reactiva del estátor del DFIG mediante la regulación de las corrientes de rotor (Av_{Ird} y Av_{Irq}) y, en consecuencia, la potencia total entregada a la red. El controlador de potencia funciona con magnitudes de corriente y de tensión referidas a un sistema de rotación de dos ejes (d, q), de modo que las diversas mediciones de corriente y tensión llevadas a cabo por el sistema se transforman (514, 517) al sistema de rotación referido (d, q).

20 En una realización, al control Av_{Ird} (corriente de rotor referida como eje 'd'), el nivel de magnetización del generador de inducción doblemente alimentado (205) se fija, de modo que se establece el sentido de flujo de la potencia reactiva en la máquina. Por otra parte, el generador de inducción doblemente alimentado (205) puede trabajar como un sistema inductivo, que consume potencia reactiva, o puede trabajar como un sistema capacitivo, que genera potencia reactiva. En esta realización, el control de Av_{Ird} se lleva a cabo de manera totalmente independiente en el control de Av_{Irq} (corriente de rotor referida al eje 'q'). En otra realización, al controlar Av_{Irq}, se controla perfectamente la potencia activa generada por el generador de inducción doblemente alimentado y entregada a la red.

25 Por consiguiente, el circuito de potencia activa de estátor (507) del DFIG regula la potencia del estátor (Av_{Ps}), al recibir un punto de consigna de potencia de estátor (Sp_{Pef}) desde OPTC (303) y, por tanto, (Sp_{Ps}) desde el Controlador General (302). Este circuito puede basarse en un controlador PI o un controlador diferente con una estructura más compleja. El cálculo de la potencia activa del estátor del DFIG se describe con detalle más adelante. La salida del controlador PI (507) es el punto de consigna de corriente del rotor (Sp_{Irq}). El circuito de corriente de rotor I_{rq} (511) regula la corriente Av_{Irq} con el susodicho punto de consigna. Este circuito de corriente I_{rq} puede basarse en un controlador PI o un controlador diferente con una estructura más compleja. La salida del regulador es el punto de consigna de tensión de rotor Ur_q (Sp_{Urq}).

30 Por otra parte, el circuito de potencia reactiva de estátor (508) del DFIG regula la potencia reactiva del estátor (Av_{Qs}), que recibe un punto de consigna (Sp_{Qs}) de potencia reactiva de estátor desde el Controlador General (302). Este Sp_{Qs} puede basarse en un valor fijo, configuración SCADA o similares. Este circuito de potencia reactiva puede basarse en un controlador PI o un controlador diferente con una estructura más compleja. El cálculo de la potencia reactiva del estátor se describe con detalle más adelante. La salida del controlador PI (508) es el punto de consigna de corriente del rotor I_{rd} (Sp_{Ird}). El circuito de corriente de rotor I_{rd} (512) regula la corriente Av_{Ird} con el susodicho punto de consigna. Este circuito de corriente I_{rd} puede basarse en un controlador PI o un controlador diferente con una estructura más compleja. La salida del regulador es el punto de consigna de tensión de rotor Ur_d (Sp_{Urd}). En una realización, este método permite magnetizar el generador de inducción doblemente alimentado desde el rotor, evitando el consumo de potencia reactiva de la red. Por otra parte, al controlar el nivel de magnetización del generador de inducción doblemente alimentado, y medir las tensiones del estátor y de la red, el sistema se sincroniza continuamente con la red, observando en cada momento la amplitud, la frecuencia y el ángulo de las tensiones del estátor generadas por el generador de inducción doblemente alimentado (205). Los sistemas de conexión y desconexión se explicarán más adelante con más detalle.

35 40 45 50 En una realización, las corrientes del rotor AV_{Irq} y Av_{Ird} se calculan refiriendo las tres mediciones de corriente del rotor (I_{r_L1}, I_{r_L2}, I_{r_L3}) (121), a un sistema de rotación de dos ejes con un ángulo de rotación (μ-ε) donde μ es el ángulo de la red, calculado a partir de la medición de las tres tensiones de la red (V_{g_L1}, V_{g_L2}, V_{g_L3}) (217), y ε es el ángulo del rotor medido con el sensor de posición y de velocidad (214).

Av_{Ps} y Av_{Qs} se calculan utilizando I_d, I_q, V_d, V_q:

55
$$Av_{Qs} = \frac{3}{2} (Vs_q \times Is_q - Vs_d \times Is_d)$$

$$Av_Ps = \frac{3}{2}(Vsd \times Isd + Vsq \times Isq)$$

Ec. 2

donde Vsd, Vsq, Isd, Isq se obtienen mediante la medición de las tres tensiones del estátor (V_L1, V_L2, V_L3) (216) y las tres corrientes del estátor (I_L1, I_L2, I_L3) (118), y refiriendo estas tensiones y corrientes a un sistema de rotación de dos ejes, utilizando el ángulo de rotación μ .

5 Ambas salidas del regulador de corriente, Sp_Urd y Sp_Urq, se transforman en un sistema fijo, utilizando el ángulo de rotación (μ - ϵ), obteniendo las tres referencias de tensión a imponer en el rotor (211) del generador de inducción doblemente alimentado (205). El bloque 414 muestra la transformación de las tensiones del rotor, desde un sistema de rotación de dos ejes a un sistema fijo trifásico. En una realización, estas tensiones del rotor pueden utilizarse como referencia para un módulo para generar la activación de los conmutadores activos del convertidor electrónico de potencia (222). El bloque 415 muestra el módulo en el que se pueden implementar diferentes técnicas de PWM.

10 Según esta realización, un sistema de control electrónico de potencia basado en dos circuitos de potencia y dos circuitos de corriente, independiente de los parámetros eléctricos de la máquina, evita los efectos de la dispersión de los parámetros eléctricos o los errores teóricos de modelado en la regulación de potencia. Los errores causados por los parámetros eléctricos cambian debido a las oscilaciones de la temperatura o a efectos de saturación debidos a la no linealidad y se evitan mediante este método. De este modo, se obtiene una energía de muy buena calidad, que cumple y mejora los requisitos de las diferentes normativas. Para hacer la regulación solo se necesitan distintas mediciones (I_L1, I_L2, I_L3, V_L1, V_L2, V_L3, I_r_L1, I_r_L2, I_r_L3, ϵ , ω). En una realización, la regulación de la potencia reactiva se podría hacer independiente de la regulación de la potencia activa.

Controlador de excitador

20 En un ejemplo de realización, el sistema de velocidad variable comprende un generador de inducción doblemente alimentado (205) en donde el rotor (211) está conectado a un convertidor electrónico de potencia (222). Este convertidor electrónico de potencia se acopla a través de un sistema de Bus de CC (224) a un segundo convertidor electrónico de potencia (225). En una realización, este convertidor de frecuencia (convertidor de potencia) (225) está conectado mediante el contactor (228) a la máquina excitatriz (212). La máquina excitatriz, tal como una máquina asincrónica, una máquina de CC o una máquina sincrónica (p. ej. un imán permanente) o una máquina eléctrica invertible, se acopla mecánicamente a la cadena de impulsión.

30 Dependiendo de la velocidad del rotor, la potencia demandada por la máquina excitatriz puede ser positiva o negativa, según el sentido del flujo de energía del rotor. Durante el funcionamiento subsincrónico, es decir por debajo de la velocidad sincrónica, la energía fluye desde la máquina excitatriz (212) al rotor (211) del generador de inducción doblemente alimentado (205), de modo que la máquina excitatriz (212) actúa como un generador. Durante el funcionamiento supersincrónico, es decir por encima de la velocidad sincrónica, la energía fluye desde el rotor (211) del generador de inducción doblemente alimentado (205) a la máquina excitatriz (212), por lo tanto la máquina excitatriz (212) actúa como un motor. El equilibrio de potencia durante todo el intervalo de velocidades es de tal manera que la potencia generada/consumida en la máquina excitatriz es consumida/generada en el rotor de la máquina de inducción doblemente alimentada, excepto por las pérdidas en los diferentes elementos.

35 En esta realización de la presente invención, la máquina excitatriz (212) es regulada por el convertidor electrónico de potencia (225) y controlada por el controlador de excitador (301). El sistema de control de la máquina excitatriz (212) se describe a continuación haciendo referencia a la máquina excitatriz como un imán permanente. Para un experto en la técnica debe ser evidente que como máquina excitatriz (212) pueden utilizarse otro tipo de máquinas, de modo que el controlador de excitador puede modificarse en consecuencia.

40 La potencia transferida a/desde la máquina excitatriz (212) es controlada por el convertidor electrónico de potencia (225), utilizando como variable principal de regulación la tensión del Bus de CC, Av_Ubus. La Figura 6 describe una realización de la regulación de la máquina excitatriz. La Unidad de Control de Convertidor (200) fija una tensión de punto de consigan del Bus de CC Sp_Ubus (605) que puede ser variable o estática. Al medir la tensión del Bus de CC, el punto de consigna de tensión del Bus de CC es regulado por un controlador PI (607) o un controlador diferente con una estructura más compleja. Este controlador establece la potencia activa a transferir entre la máquina excitatriz de imán permanente (212) y el Bus de enlace de CC (224) con el fin de mantener la tensión del Bus de CC en el valor fijado por la Unidad de Control del convertidor (CCU). Esta potencia activa es determinada por la Sp_Ieq. En una realización esta Sp_Ieq se calcula a partir de dos términos:

50 $Sp_Ieq =$ salida del regulador de tensión de Bus (607) + Desacoplamiento y conmutación de la salida de conmutación (608)

Ec. 3

donde el primer término responde a posibles oscilaciones del Bus y el segundo término, Iz, es un término de alimentación de avance que representa la corriente estimada que circula a través del bus. Con este tipo de estructura es posible lograr una alta respuesta dinámica de potencia de la máquina de imán permanente. En una

realización, el término de estimación de corriente de Bus no existe, de modo que el regulador de tensión del Bus (607) se hace cargo de generar el Sp_IEq efectivo exigido para la máquina excitatriz de imán permanente.

En esta realización, el Sp_IEq es regulado por un controlador PI (613) o un controlador diferente con una estructura compleja, utilizando el Av_IEq que representa la corriente activa de la máquina excitatriz referida a un sistema de rotación de dos ejes. En una realización, puede utilizarse una máquina de imán permanente, por lo que es necesario un módulo de debilitamiento de campo para poder reducir el flujo de la máquina y tener una mejor regulación de potencia a alta velocidad. En una máquina de imán permanente la tensión de estátor depende de la velocidad del rotor y del flujo magnético de la máquina. En consecuencia, por encima de una velocidad del rotor es necesario reducir la tensión de estátor mediante la reducción del flujo en la máquina.

En una realización se implementa un sistema de debilitamiento de campo, que establece un punto de consigna de corriente reactiva, Sp_IEd (618) que va a ser demandada por la máquina excitatriz de imán permanente (212). De esta manera, independientemente de la velocidad del rotor, la tensión generada por el imán permanente es controlada y colocada en la capacidad de regulación de intervalo de banda del convertidor electrónico de potencia (225). El Sp_IEd (618) es regulado por un controlador PI (614) o un controlador diferente con una estructura compleja, utilizando el Av_IEd que representa la corriente reactiva de la máquina excitatriz referida a un sistema de rotación de dos ejes.

En una realización, la Sp_IEd fija el nivel de magnetización de la máquina, y su nivel de tensión. La Sp_IEq fija la potencia activa inyectada o demandada por la máquina de imán permanente.

En una realización, pueden medirse dos o tres corrientes de fase de máquina excitatriz ($IExc_L1$, $IExc_L2$, $IExc_L3$) con el fin de calcular Av_IEd y Av_IEq . Las tres corrientes se transforman inicialmente (601) a un sistema estático de dos ejes de modo que se obtienen IE_sx y IE_sy . En segundo lugar, estas dos corrientes se refieren (603) a un sistema de dos ejes que rota con el flujo total de la máquina de imán permanente, obteniendo Av_IEd y Av_IEq . Esta transformación de corriente se hace utilizando el ángulo μExc , obtenido de las tres o dos tensiones de fase de la máquina excitatriz que pueden medirse o estimarse ($VExc_L1$, $VExc_L2$, $VExc_L3$). Los bloques 602 y 604 muestran cómo se obtienen valores absolutos de tensión y flujo de la máquina de imán permanente.

En una realización se requiere un módulo de cálculo (615) de Tensión Efectiva porque la tensión que va a generar el convertidor electrónico de potencia (225) debe basarse en la interacción del flujo en la máquina de imán permanente debido al efecto de la circulación de corriente. Por tanto, los puntos de consigna de tensión Sp_UErd y Sp_UERq se calculan (615) a partir de las dos salidas de reguladores de corriente PI (613, 614) y de Av_IEd , Av_IEq y $|VE|$.

Los dos puntos de consigna de tensión, Sp_UERq y Sp_UErd , se transforman (616) a un sistema estático de tres ejes, utilizando el ángulo de giro μExc . De este modo, se obtienen las referencias de tensión Sp_UE_Rx y Sp_UE_Ry y que se imponen en el estátor de la máquina excitatriz de imán permanente (212). En una realización, estos puntos de consigna de tensión pueden utilizarse como referencias para un módulo para generar la activación de los conmutadores activos del convertidor electrónico de potencia (225). El bloque 617 muestra el módulo en el que se pueden implementar diferentes técnicas de PWM. En una realización, se puede instalar un filtro dV/dt o cualquier otro tipo de filtro (227) entre el convertidor electrónico de potencia (225) y la máquina excitatriz (212),

En una realización, la máquina excitatriz (212) puede utilizarse para suministrar energía a los diferentes elementos del aerogenerador, usando esta máquina como un Suministro de Potencia Auxiliar. Las perturbaciones o fallos en la red no afectan al convertidor electrónico de potencia (225). En consecuencia, la regulación de potencia del excitador no se ve afectada.

Freno eléctrico dinámico

Según otra realización, se proporciona un Freno Eléctrico Dinámico (DEB, *Dynamic Electric Brake*) que permite al aerogenerador aplicar un freno eléctrico para detener el generador. Por lo tanto, se puede evitar la resistencia mecánica en los componentes del aerogenerador, que pueden ocasionar daños prematuros.

El aerogenerador de velocidad variable de la presente invención comprende un generador de inducción doblemente alimentado (205) en el que el rotor (211) está conectado a un convertidor electrónico de potencia (222). Este convertidor electrónico de potencia (222) se acopla a través de un sistema de Bus de CC (224) a un segundo convertidor electrónico de potencia (225). Este convertidor de frecuencia (convertidor electrónico de potencia (225)) está conectado a la máquina excitatriz (212). La máquina excitatriz, tal como una máquina asincrónica, una máquina de CC, una máquina sincrónica (p. ej. un imán permanente) o una máquina eléctrica invertible, se acopla mecánicamente a la cadena de impulsión. El sistema también comprende un circuito de freno eléctrico (231), tal como un recortador de CC, conectado al Bus de CC.

En las topologías de la técnica anterior, si la potencia del estátor del DFIG disminuye bruscamente debido a un fallo en la red o una desconexión de la red, la máquina tiende a acelerarse. En caso de un aerogenerador que funciona a potencia nominal, la máquina puede sufrir un exceso de velocidad. Usualmente, no es posible usar freno eléctrico en ese momento, porque la potencia del estátor del DFIG y, por otra parte, la potencia del rotor del DFIG pueden ser

demasiado bajas. Sin embargo, debido a la topología de la presente invención, la potencia de la máquina excitatriz se puede utilizar para impulsar un freno eléctrico. En este caso, la máquina excitatriz se usará como generador y, por tanto, la potencia puede ser transferida desde la máquina excitatriz al Bus de corriente continua. De este modo, una parte de la potencia eléctrica se drena en el reostato del recortador conectado al Bus de CC evitando un exceso de velocidad del generador. De esa manera, el frenado del aerogenerador no depende solamente del freno mecánico. En una realización, puede utilizarse un freno eléctrico junto con un freno mecánico, lo que permite que el aerogenerador frene progresivamente, minimizando la resistencia mecánica, las cargas por par máximo y las aceleraciones no deseadas. Por ejemplo, el freno eléctrico puede aplicarse hasta que el freno mecánico o aerodinámico sean capaces de tomar el control de la turbina.

Por lo tanto, debido a la máquina excitatriz (212), siempre hay disponible potencia de frenado. Dependiendo de la potencia del excitador, la potencia del convertidor de excitador y el valor del reostato del recortador, la potencia de frenado podría alcanzar, en una realización, el 30% de la potencia nominal del generador.

De este modo, también hay disponible continuamente una máxima potencia de frenado (P_{b_MAX}):

$$P_{b_MAX} = (V_{bus_CC})^2 / R_{freno} \quad \text{Ec. 4}$$

en donde V_{bus_CC} es el valor real de la tensión del Bus de CC ($A_{V_U_{bus}}$)

La potencia de frenado puede controlarse de tal manera que cuando el aerogenerador está trabajando a baja velocidad sólo se necesita una pequeña parte de la potencia de frenado. Sin embargo, si el generador del aerogenerador está por encima de la velocidad nominal, puede ser necesario utilizar toda la potencia de frenado disponible. De este modo, se calcula un punto de consigna de la potencia de frenado (SP_P_b) que depende principalmente de las mediciones de la velocidad del viento y de la velocidad del generador.

Con el fin de controlar con precisión la potencia de frenado necesaria, se calcula un factor de modulación (f_{MOD}). Este factor de modulación se aplica a la máxima potencia de frenado disponible en cada momento (P_{b_MAX}) para obtener el SP_P_b .

$$SP_P_b = P_{b_MAX} \cdot f_{MOD} \quad \text{Ec. 5}$$

$$f_{MOD} = SP_P_b \cdot (R_{freno} / (A_{V_U_{bus}})^2) \quad \text{Ec. 6}$$

El factor de modulación permite un control preciso de la potencia de frenado. Es posible aplicar un frenado eléctrico progresivo. Por ejemplo, en una parada de emergencia del aerogenerador, al principio se necesita toda la potencia de frenado. Una vez se activa el freno mecánico, tal como ángulo de ataque de las palas, es posible disminuir progresivamente el freno eléctrico.

El freno eléctrico dinámico, en este ejemplo de realización, está compuesto de un reóstato (resistencia, juego de resistencias o cualquier elemento disipador) activado por un interruptor controlable electrónicamente (p. ej. un IGBT). También pueden utilizarse diodos antiparalelos. DEB no se limita estrictamente a la realización que se ha descrito. De este modo el recortador de frenado puede comprender elementos distintos de los indicados anteriormente.

Secuencia de conexión (habilitación)

Según otra realización se proporciona una secuencia de conexión. Esta realización comprende un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) (205) acoplado a la máquina excitatriz (212) sin un convertidor electrónico de potencia conectado a la red y una secuencia de conexión que permite la conexión del generador de inducción doblemente alimentado a la red sin consumo de energía reactiva y sin picos de corriente de conexión a través del contactor (215), de este modo se aumenta la vida útil del contactor (215). La Figura 7 muestra la secuencia de conexión. Para un experto en la técnica será evidente que las técnicas descritas en esta memoria también pueden aplicarse si se utiliza un disyuntor principal de circuito o cualquier otro interruptor, en lugar del contactor, para acoplar el generador a la red.

En modo de funcionamiento normal, la turbina se orienta continuamente hacia el viento con el uso de los motores de orientación (*yaw*). Cuando la velocidad medida media del viento es superior a un umbral (en una realización 2,5 metros por segundo), si se cumplen todas las demás condiciones, el motor de ángulo de ataque mueve las palas a una posición que permite que el rotor principal comience a rotar.

En una realización, se deben cumplir las condiciones iniciales antes de iniciar la secuencia de conexión (701). Estas condiciones implican la velocidad del rotor, el estado del contactor (228) del rotor y cualquier otra condición previa para iniciar la secuencia. En una realización; una vez cumplidas estas condiciones la velocidad del rotor debe ir hasta N1 (en una realización, con un DFIG de velocidad sincrónica de 1800 rpm/60 Hz, el valor de N1 puede ser 1170 rpm). Una vez que se alcanza la velocidad del rotor, el convertidor electrónico de potencia (225) del lado del excitador se activa con el fin de regular el nivel de tensión del Bus de CC, correspondiente al estado 702.

En una realización, una vez que el Bus de CC ha alcanzado el nivel VBUS1, la velocidad del rotor debe ir hasta $N2 \geq N1$ (en una realización, con un DFIG de velocidad sincrónica de 1800 rpm/ 60Hz, el valor de $N2$ puede ser 1260 rpm, y el nivel de VBUS1, con IGBT de 1700 V, podría ser 1050 V). El convertidor electrónico de potencia (222) del lado del DFIG luego se enciende (703), con el fin que la tensión a través del contactor (215) se acerque a 0. Esto se logra al magnetizar el generador de inducción doblemente alimentado (205) a través del rotor (211) con el convertidor electrónico de potencia (222), de una manera que el valor de tensión, la secuencia, la frecuencia y otras variables son iguales en ambos lados del contactor (215). Cuando se cumplen las condiciones de amplitud de tensión, frecuencia de tensión, ángulo/retraso de tensión y algunas otras condiciones, el contactor (215) se cierra (704) y la corriente del estátor es cercana a 0. El generador de inducción doblemente alimentado (205) no consume energía de la red y se evitan las posibles perturbaciones en la red.

Una vez que se ha cumplido esta secuencia, el control de potencia se activa (705). Para permitir una conexión estable a la red, el punto de consigna de potencia del OPTC, y el de punto de consigna de potencia reactiva del controlador principal se elevan progresivamente durante los primeros momentos.

Durante toda la secuencia de conexión, se monitoriza el estado de todos los elementos implicados de tal manera que si se detecta un error la secuencia se reanuda y se genera una alarma. Dependiendo del tipo de alarma, la secuencia puede iniciarse en un momento posterior predeterminado, o si el error es importante, se activa un modo de emergencia en el aerogenerador que requiere la intervención humana para salir de ese modo.

El sistema de control usado durante el estado 703 para la sincronización se describe en la figura 9. Se realiza la regulación de tensión del estátor. La tensión de estátor y la tensión de red son los aportes al regulador (903 y 904) de tensión de estátor, y la salida de este regulador es parte de un punto de consigna de corriente del rotor en el eje d. Un término de corriente proporcional a la corriente de magnetización del generador se añade a la salida del regulador de tensión como un elemento de alimentación de avance (*feed-forward*). La alimentación de avance de corriente se calcula según la tensión de red medida, la frecuencia de red medida y una constante K que depende de los parámetros eléctricos del generador. Con la adición de este término de alimentación de avance dentro del bloque 905, el proceso de sincronización se acelera. La suma de ambos términos, que es la salida del bloque 905, es el punto de consigna de corriente de rotor en el eje "d". Durante todo el proceso de sincronización, el punto de consigna de la corriente de rotor en el eje "q" es igual a 0. Los dos puntos de consigna (en el eje "d" y el eje "q") son los aportes a un bloque de regulación de corriente (906), en donde se controlan con reguladores PI. El ángulo utilizado para la conversión de un sistema de dos ejes ("d" y "q") en un sistema trifásico en el bloque 906, se calcula sobre la base del ángulo de red y el ángulo mecánico en el bloque 907.

Secuencia de desconexión (Inhabilitación)

Según otra realización de la presente invención se proporciona una secuencia de desconexión. Esta realización comprende un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) (205) acoplado a la máquina excitatriz (212) sin convertidor electrónico de potencia conectado a la red y una secuencia de desconexión que permite la desconexión del generador de inducción doblemente alimentado (205) de la red sin ninguna perturbación relacionada con un exceso de corriente o de tensión en los distintos elementos del sistema. Debido a la apertura del contactor (215) con una corriente cercana 0, se aumenta la vida útil de este contactor y se reducen las operaciones de mantenimiento. También permite un valor nominal más bajo del contactor para la misma aplicación, en comparación con otras secuencias de desconexión.

En condiciones normales de funcionamiento de un aerogenerador, esta secuencia se alcanza usualmente debido a la ausencia de condiciones ventosas, pero también se puede alcanzar en caso de viento excesivo, petición humana local, solicitud de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA, *Supervisory Control and Data Acquisition*) a distancia, un fallo en algún subsistema del aerogenerador o por cualquier otro motivo.

En una realización, la potencia del estátor y la corriente del estátor deben reducirse con una pendiente con el fin de que no haya corriente en el estátor del generador (710). El tiempo de rampa descendente está optimizado según el motivo de la solicitud de secuencia de desconexión. Con el fin de evitar una innecesaria tensión mecánica en un aerogenerador, el tiempo de rampa descendente es el máximo que permita un funcionamiento seguro del aerogenerador. Es evidente que los requisitos de tiempo de rampa descendente no son los mismos para cada situación.

Una vez que se ha cumplido el estado (710) el contactor principal (215) se abre, llegando al estado (711). Como los Puntos de Consigna de Potencia Activa y Reactiva son 0 antes de abrir el contactor (215), el controlador DFIG (300) está inyectando la corriente de magnetización para que el estátor del DFIG esté conectado a la red pero sin corriente, de modo que la apertura del contactor se hace con corriente cercana a 0, extendiendo la vida útil del contactor (115).

Cuando se cumple el estado (711) el convertidor electrónico de potencia (222) del rotor se desactiva, correspondiente al estado (712). Cuando el convertidor electrónico de potencia del rotor está inhabilitado, la energía almacenada en los circuitos inductivos del generador de inducción doblemente alimentado se transfiere al enlace de CC.

Controlador de ángulo de ataque basado en excitador (EBPC)

En esta realización de la presente invención, el aerogenerador de velocidad variable comprende un Controlador de ángulo de ataque basado en excitador (EBPC). La Figura 8 describe un ejemplo de realización de un sistema de control de ángulo de ataque de ese tipo, que se basa en la limitación de la potencia demandada para el excitador.

5 La magnitud principal del sistema de control de ángulo de ataque es la potencia del excitador. Se establece un valor de potencia nominal del excitador (801). Un regulador limitador de potencia (804) de excitador fija, a partir de esta referencia, un punto de consigna de posición de pala (Sp_P) que depende del valor real de potencia del excitador (802). En una realización, cuando la potencia de salida del aerogenerador se mantiene por debajo de la potencia nominal, el Sp_p tendrá valores bajos (por ejemplo, entre 0° y 2°) y, una vez que se alcanza, la potencia nominal el Sp_p aumentará con el fin de limitar la potencia del excitador.

10 En una realización, la salida de posición de ángulo de ataque de las palas de 804 es regulada por un controlador de posición PI (806) o por un controlador diferente con una implementación más compleja. El error que se aporta al controlador de posición PI es:

$$\text{Error}_\beta = Sp_\beta - Av_\beta \quad \text{Ec. 7}$$

15 Av_β es el valor real de posición de pala que es medido por el sensor de posición y de velocidad (214). La salida del regulador de posición es el punto de consigna de la velocidad de ángulo de ataque (Sp_n). Las palas se moverán a esa velocidad para llegar a la posición solicitada.

20 En una realización, la salida de velocidad de ángulo de ataque de 806 es regulada por un controlador de velocidad PI (808) o por un controlador diferente con una implementación más compleja. El error que se aporta al controlador de velocidad PI es:

$$\text{Error}_n = Sp_n - Av_n \quad \text{Ec. 8}$$

Av_n es el valor real de la velocidad de la pala que es medida por un sensor de velocidad (214). La salida del regulador de velocidad es el punto de consigna de corriente que se puede demandar para el motor de CC (305) con el fin de llegar a la velocidad solicitada (Sp_n).

25 En una realización, la salida de 808 es regulada por un controlador de corriente PI (810) o por un controlador diferente con una implementación más compleja. El error que se aporta al controlador de corriente PI es:

$$\text{Error}_I = Sp_I - Av_I \quad \text{Ec. 9}$$

30 La Av_I es el valor real de la corriente del motor de CC que se mide con un sensor de corriente (812). La salida del controlador de corriente es la tensión de referencia que se impone en el motor de CC. En una realización, estas tensiones de referencia pueden crearse a través de diferentes técnicas PWM, disparando los conmutadores activos del convertidor electrónico de potencia (811).

35 En una realización, en caso de una emergencia, el impulso del motor de ángulo de ataque se cambia de EBPC al suministro de energía de emergencia (EPS, *Emergency Power Supply*). Por lo tanto el motor impulsado está directamente alimentado por el EPS (816), a través del relé de emergencia (717) hasta que se alcanza la posición de bandera (*feathered*) (cerca de 90°). Los cambios de posición de pala (818) determinan el final del suministro de corriente desde el EPS.

En una realización, la impulsión para mover la pala es un motor de CC. Para los expertos en la técnica será evidente que también se puede utilizar un motor de inducción de CA o un motor sincrónico de CA.

40 En una realización, el impulso para mover la pala podría ser hidráulico, neumático u otro tipo de dispositivo de accionamiento de ángulo de ataque controlado por una servoválvula que integra las funciones (807, 808, 809, 810, 811).

Sistema de antidesgaste de colector y de lubricación (CAWLS)

En otra realización de la presente invención el aerogenerador de velocidad variable comprende un sistema de control de ángulo de ataque basado en la limitación de la potencia demandada para la máquina excitatriz.

45 En el caso de que se utilicen motores de CC como impulsores para el movimiento del ángulo de ataque, se aplica un sistema de antidesgaste de colector y de lubricación (CAWLS) para evitar mayores efectos perjudiciales por el hecho de mantener un ángulo de ataque fijo durante un largo período de tiempo. Por ejemplo, se puede evitar el desgaste prematuro del colector y de las escobillas del motor de CC debido al paso de corriente a través de la misma posición. Por otra parte, la lubricación de los rodamientos de las palas se mejora notablemente.

50 De este modo, el CAWLS se implementa para evitar un desgaste prematuro del colector y las escobillas del motor de CC utilizado como impulsor del ángulo de ataque y para mejorar la lubricación de los rodamientos de las palas.

5 En una realización, este sistema se basa en la introducción de un punto de consigna adicional no significativo de la posición o la velocidad, de tal manera que el ángulo de ataque se mueve continuamente alrededor de la posición deseada. La variación del ángulo de ataque se ordena según una onda sinusoidal de referencia en donde la amplitud y la frecuencia se determinan a partir de diferentes parámetros. Especialmente, la frecuencia debe determinarse teniendo en cuenta consideraciones de fatiga y las frecuencias naturales del aerogenerador. En una realización, ese tipo de referencia de onda sinusoidal se diseña, por ejemplo, con un período de un minuto y una amplitud de $0,2^\circ$. Para los expertos en la técnica será evidente que se puede aplicar cualquier otra forma, período o amplitud de onda. La implementación de CAWLS no afecta en absoluto a la producción de energía del aerogenerador, pero evita el desgaste de los colectores y las escobillas y mejora su refrigeración y engrase. CAWLS también mejora la lubricación de los rodamientos de las palas.

10 Por otra parte, este sistema puede utilizarse en cualquier tipo de impulsor de ángulo de ataque para mejorar la lubricación de los rodamientos de las palas, aumentando la vida útil de estos componentes.

15 De este modo, se describe un aerogenerador de velocidad variable con un generador de inducción doblemente alimentado, una máquina excitatriz y un convertidor intermedio de potencia, que no está conectado a la red. La invención también describe un control de potencia y una regulación de ángulo de ataque.

20 La generación de energía eólica ha aumentado considerablemente por todo el mundo. Se prevé ampliamente que el crecimiento continúe en las décadas venideras, incluso cuando la industria y la tecnología hayan pasado a la madurez en este campo. A medida que los parques eólicos crecen en tamaño y la base total de capacidad eólica instalada sigue en aumento, la importancia de mejorar la calidad de la salida de potencia es un desafío de gran importancia.

25 En los ejemplos de realizaciones descritos anteriormente de la presente invención se introducen muchas novedades. En el sistema de potencia se incluye una máquina excitatriz en donde el convertidor de potencia está aislado de (no conectado a) la red. Por lo tanto, la invención proporciona una solución a los problemas más comunes ocasionados por los aerogeneradores de velocidad variable conectados a la red, tales como distorsión armónica, oscilaciones y existencia de fluctuaciones en la potencia entregada. Por tanto, se mejora notablemente la calidad de la potencia de salida. Dentro de estas realizaciones la potencia de salida se controla con precisión y, además, se mantiene constante por encima de la velocidad nominal evitando fluctuaciones de potencia dependientes de las variaciones de velocidad del viento. De hecho, los ejemplos de realizaciones proporcionan un método fácil de conexión y desconexión que evita el consumo de potencia reactiva de la red. Por otra parte, la generación de potencia según las realizaciones de la presente invención es menos sensible a las perturbaciones en la red, tal como fallos en la red, y proporciona mejores prestaciones en redes autónomas y débiles. De este modo, el sistema ilustrado por los ejemplos de realizaciones es especialmente atractivo para las demandas de los parques eólicos emergentes al permitir que los parques eólicos crezcan en tamaño y capacidad eólica instalada, cumpliendo las diferentes normas y mejorando la calidad de la potencia de salida.

35 Además, los ejemplos de realizaciones pueden incluir algunos otros beneficios, tales como: el uso de la máquina excitatriz como suministro de energía auxiliar en caso de ser una máquina de imán permanente, la posibilidad de generar energía a media tensión con un convertidor de baja tensión sin necesidad de transformador de potencia, la simplificación de los componentes eléctricos, y la prevención del desgaste de los colectores de un motor de CC cuando se utiliza un motor de ese tipo para el ángulo de ataque de las palas y la mejora de la lubricación de los apoyos de las palas.

40 También son posibles otras realizaciones del sistema de aerogenerador mostrado en la Figura 2. La máquina excitatriz (212), por ejemplo, podría conectarse o colocarse en cualquier lugar dentro de la cadena de impulsión del aerogenerador. También son factibles otras realizaciones que incluyen dos o más máquinas excitatrices.

45 A partir de la descripción anterior, será evidente que la presente invención descrita en esta memoria proporciona un aerogenerador novedoso y ventajoso de velocidad variable.

La invención se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un aerogenerador de velocidad variable que comprende:
un rotor que incluye por lo menos una pala;
- 5 una cadena de impulsión acoplada al rotor, la cadena de impulsión incluye por lo menos un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), dicho DFIG tiene por lo menos un estátor que se puede conectar a una red de energía eléctrica,
por lo menos una máquina excitatriz acoplada a cadena de impulsión; y
- 10 por lo menos un dispositivo de conversión de potencia aislado de la red eléctrica y acoplado eléctricamente a un rotor del generador de inducción doblemente alimentado y a la máquina excitatriz para transferir potencia eléctrica entre el rotor y la máquina excitatriz,
por lo que la potencia eléctrica sólo se entrega a la red a través del estátor del DFIG.
2. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, que comprende además un sistema de control de potencia para controlar la salida de potencia de aerogenerador entregada a la red.
- 15 3. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, que comprende además un controlador de ángulo de ataque para limitar la potencia demandada al excitador.
4. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde el generador es un generador de inducción de anillo sin deslizamiento.
5. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde el excitador es uno entre una máquina eléctrica invertible, máquina sincrónica, máquina asincrónica y una máquina de CC.
- 20 6. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde el sistema de conversión de potencia comprende dos convertidores electrónicos de potencia activa unidos a un Bus de enlace de CC con un lado de CA de un convertidor de potencia activa conectado al circuito del rotor del generador de inducción doblemente alimentado y el lado de CA del otro convertidor de potencia activa conectado a la máquina excitatriz.
- 25 7. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde el sistema de conversión de potencia es uno entre un convertidor de potencia bidireccional aislado de la red, un cicloconvertidor aislado de la red y un convertidor de matriz aislado de la red.
8. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde el control del generador de inducción doblemente alimentado se basa en la Orientación de Flujo de Red (GFO) o el control de la máquina excitatriz se basa en la regulación de tensión del Bus de CC.
- 30 9. El sistema de aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 1, en donde la máquina excitatriz consume la potencia que se genera en un rotor del DFIG en modo supersincrónico y genera potencia para el rotor del DFIG en modo subsincrónico.
10. El aerogenerador de velocidad variable de la reivindicación 9, que comprende además:
- 35 unos medios de control de potencia para controlar la salida de potencia del aerogenerador entregada a la red, o unos medios de control de ángulo de ataque para realizar la regulación del ángulo de ataque.
11. Un método para un aerogenerador de velocidad variable que comprende:
convertir energía eólica en potencia mecánica mediante la impulsión de un rotor;
convertir potencia mecánica en potencia eléctrica mediante el uso de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) en una cadena de impulsión,
- 40 suministrar potencia eléctrica a la red eléctrica desde un estátor del DFIG;
utilizar una máquina excitatriz acoplada a una cadena de impulsión y un sistema de conversión de potencia aislado de la red eléctrica para recibir la energía generada por un rotor del generador de inducción doblemente alimentado o para proporcionar la potencia requerida por el rotor del generador de inducción doblemente alimentado,
- 45 por lo que la potencia eléctrica sólo se entrega a la red a través del estátor del DFIG.

12. El método de la reivindicación 11, que comprende además controlar el suministro de potencia del estátor sobre la base de la Orientación de Flujo de Red (GFO) o controlar la potencia de la máquina excitatriz sobre la base de la regulación de tensión del Bus de CC.
- 5 13. El método de la reivindicación 11, en donde el rotor recibe potencia de la máquina excitatriz cuando el generador de inducción doblemente alimentado está funcionando en un modo subsincrónico.
14. El método de la reivindicación 11, en donde el rotor proporciona potencia a la máquina excitatriz cuando el generador de inducción doblemente alimentado está funcionando en un modo supersincrónico.

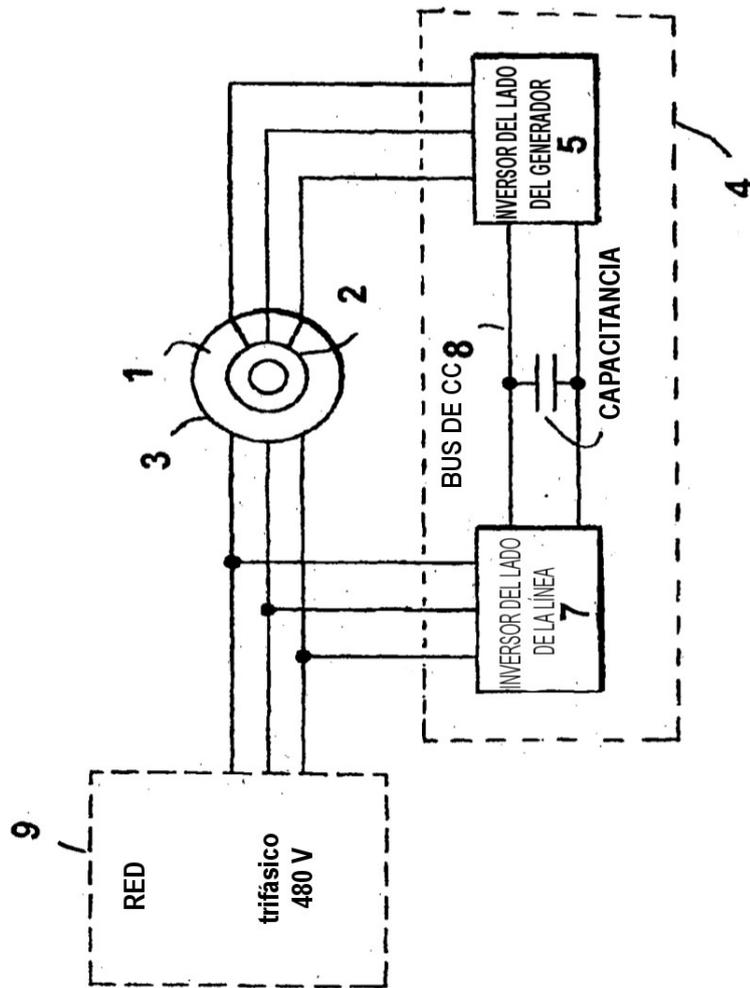


Figura 1

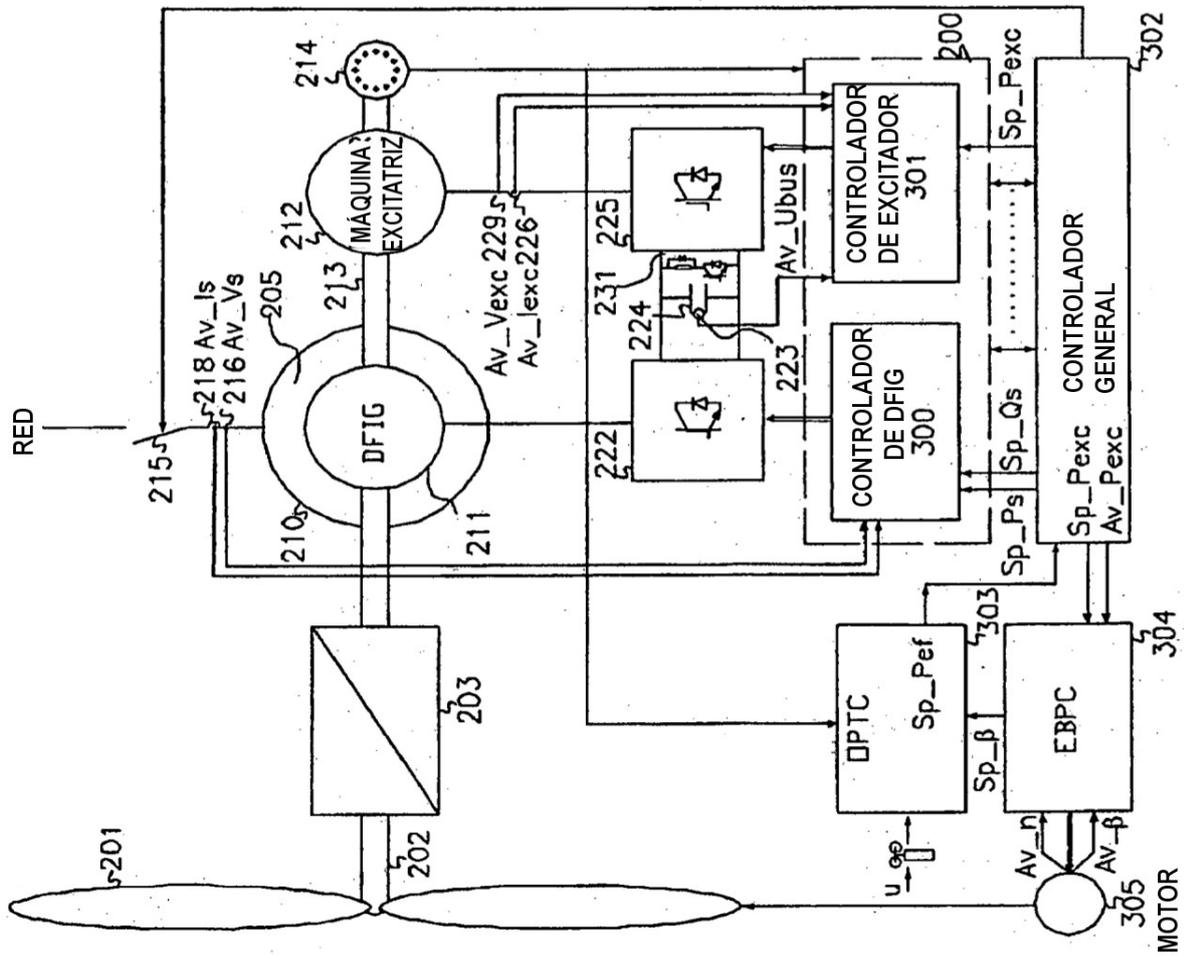


FIGURA 3

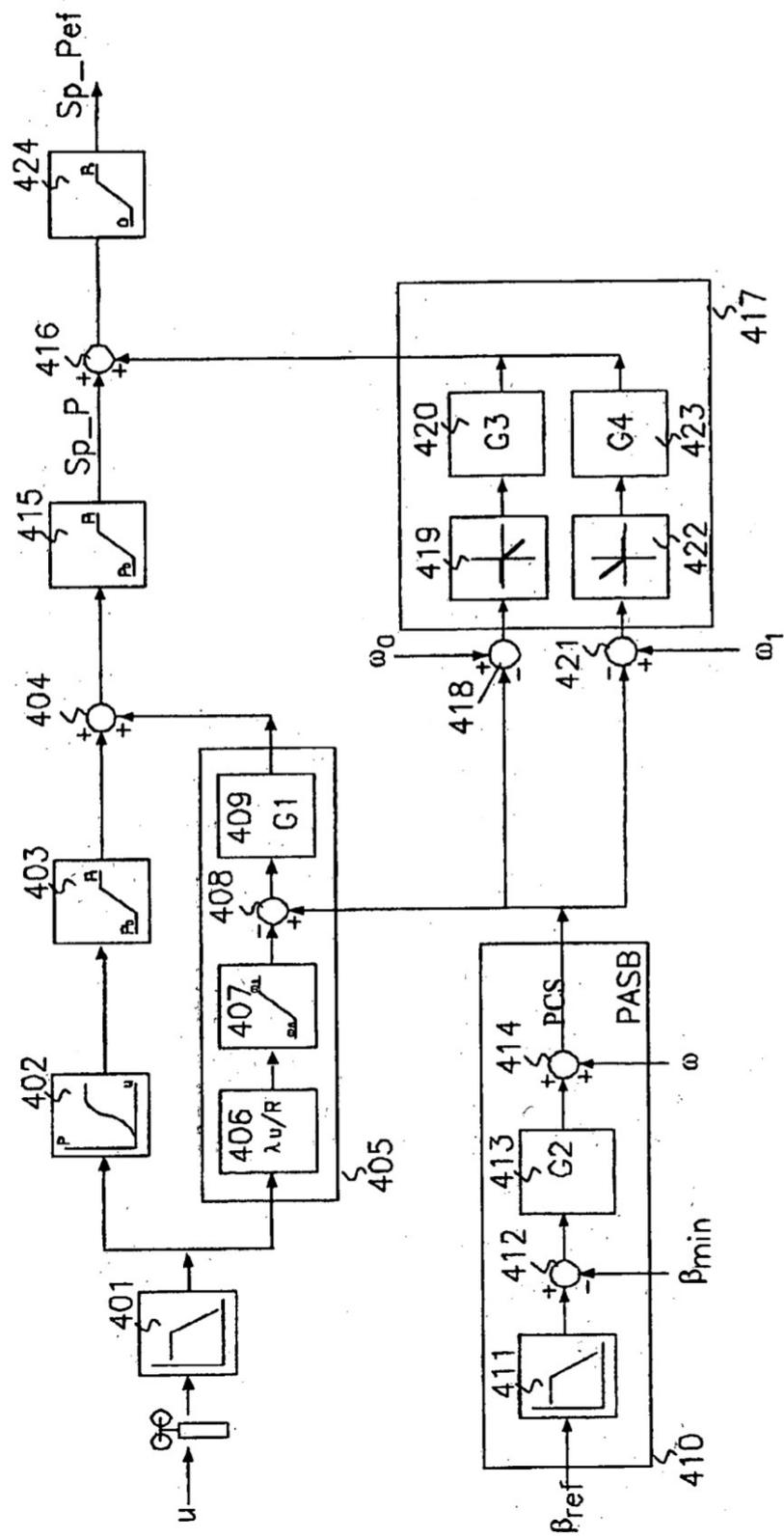


FIGURA 4

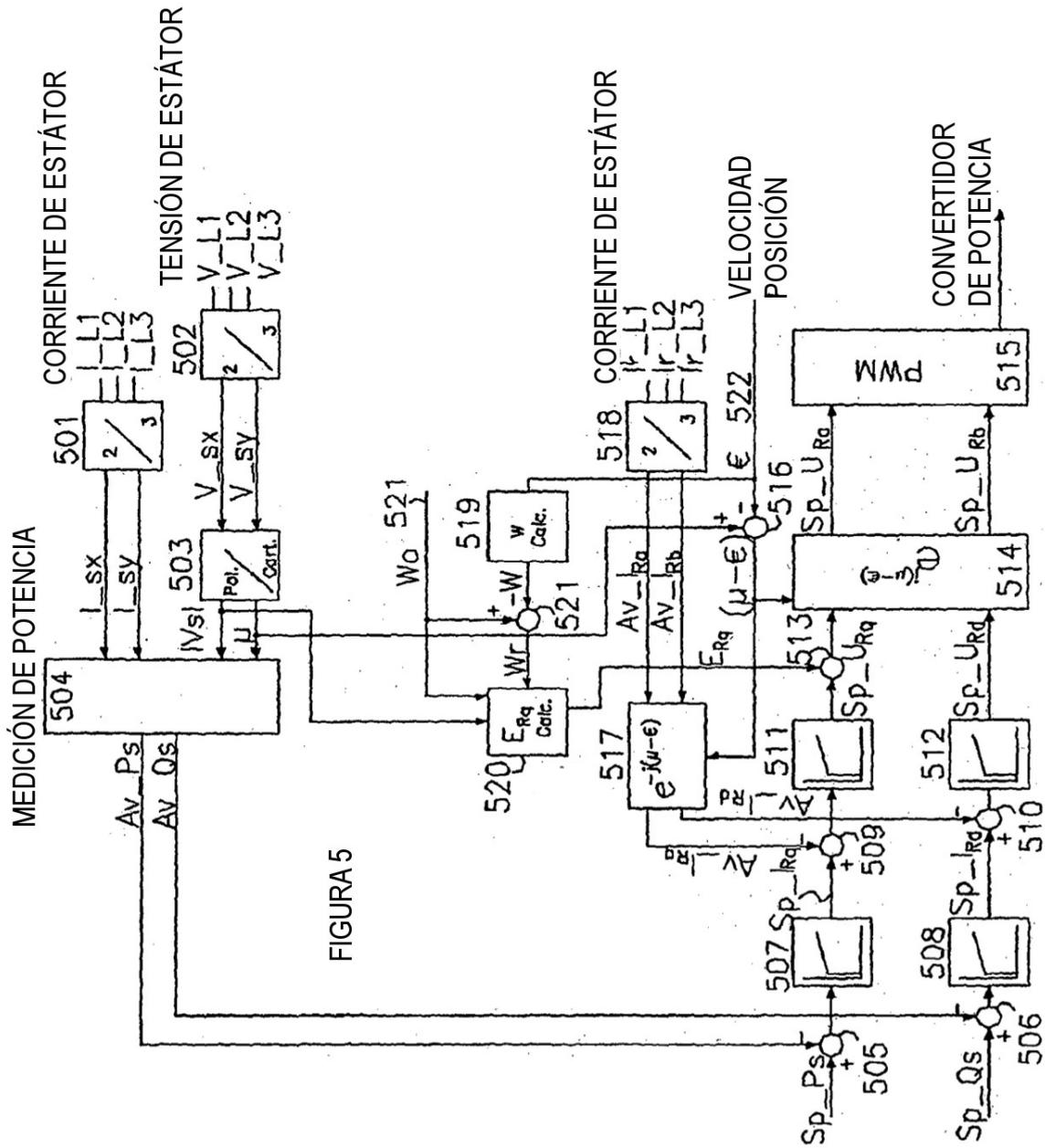


FIGURA 5

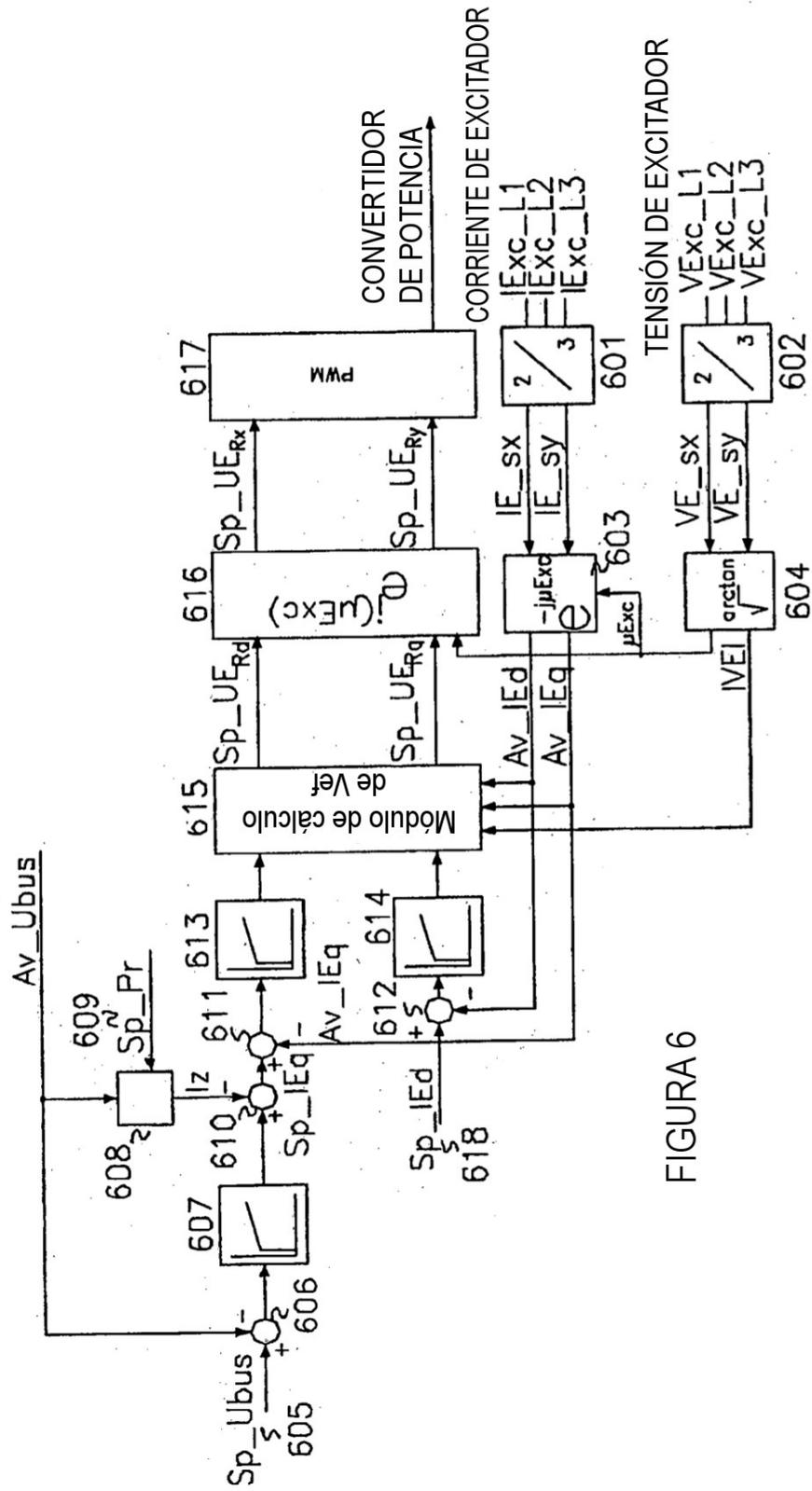


FIGURA 6

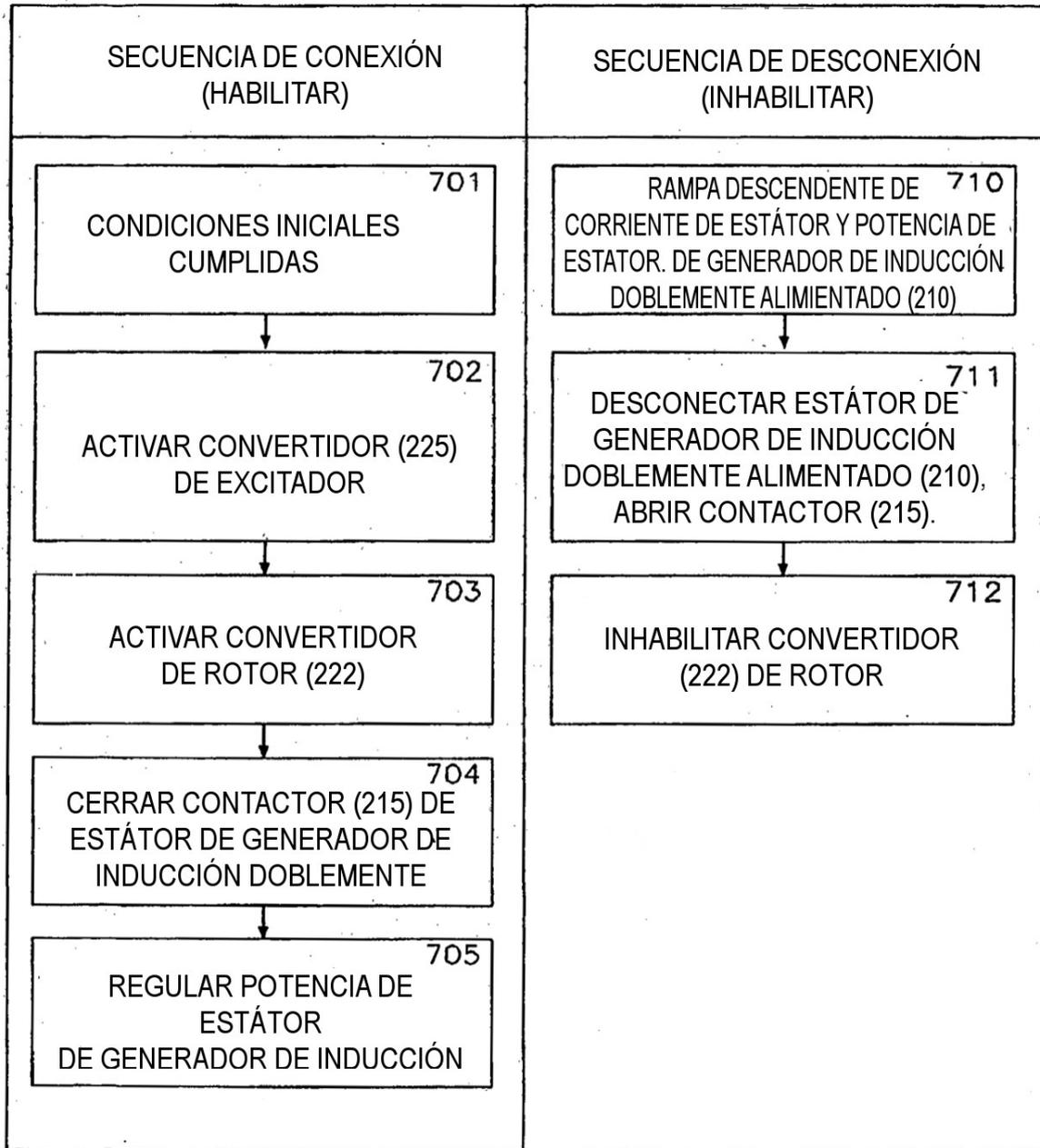


FIGURA 7

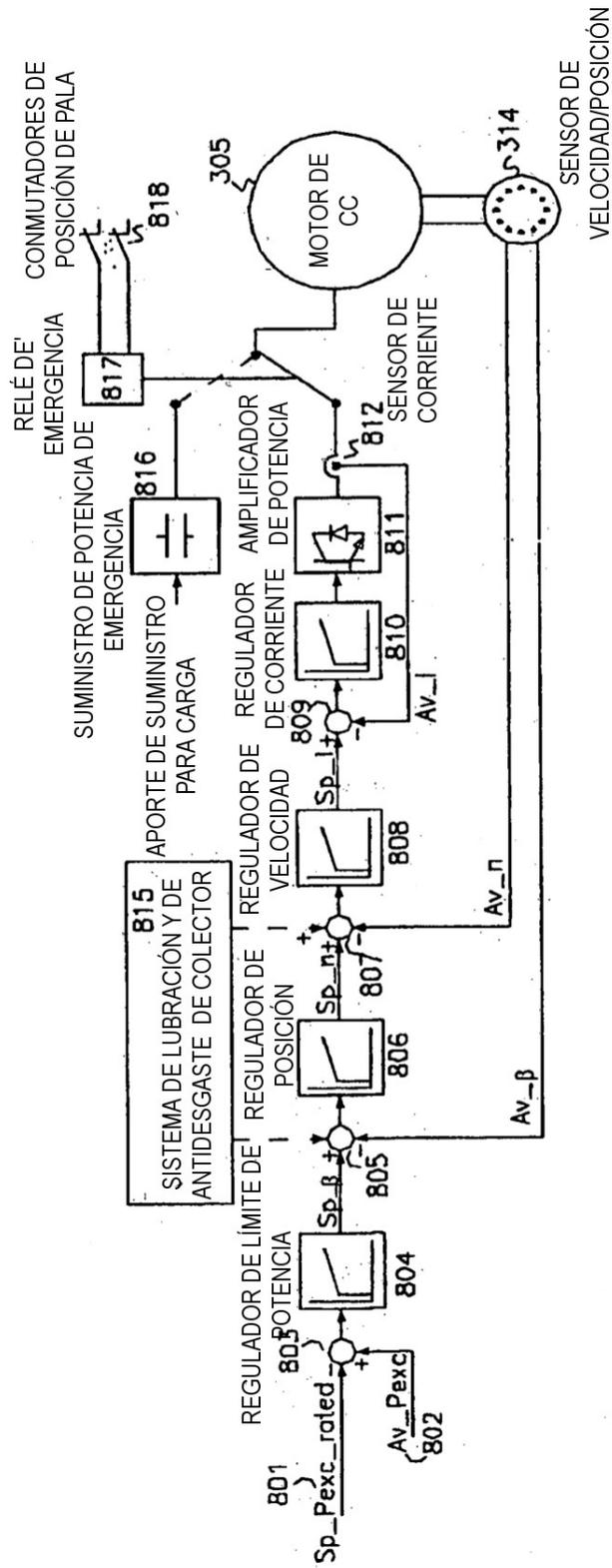


FIGURA 8

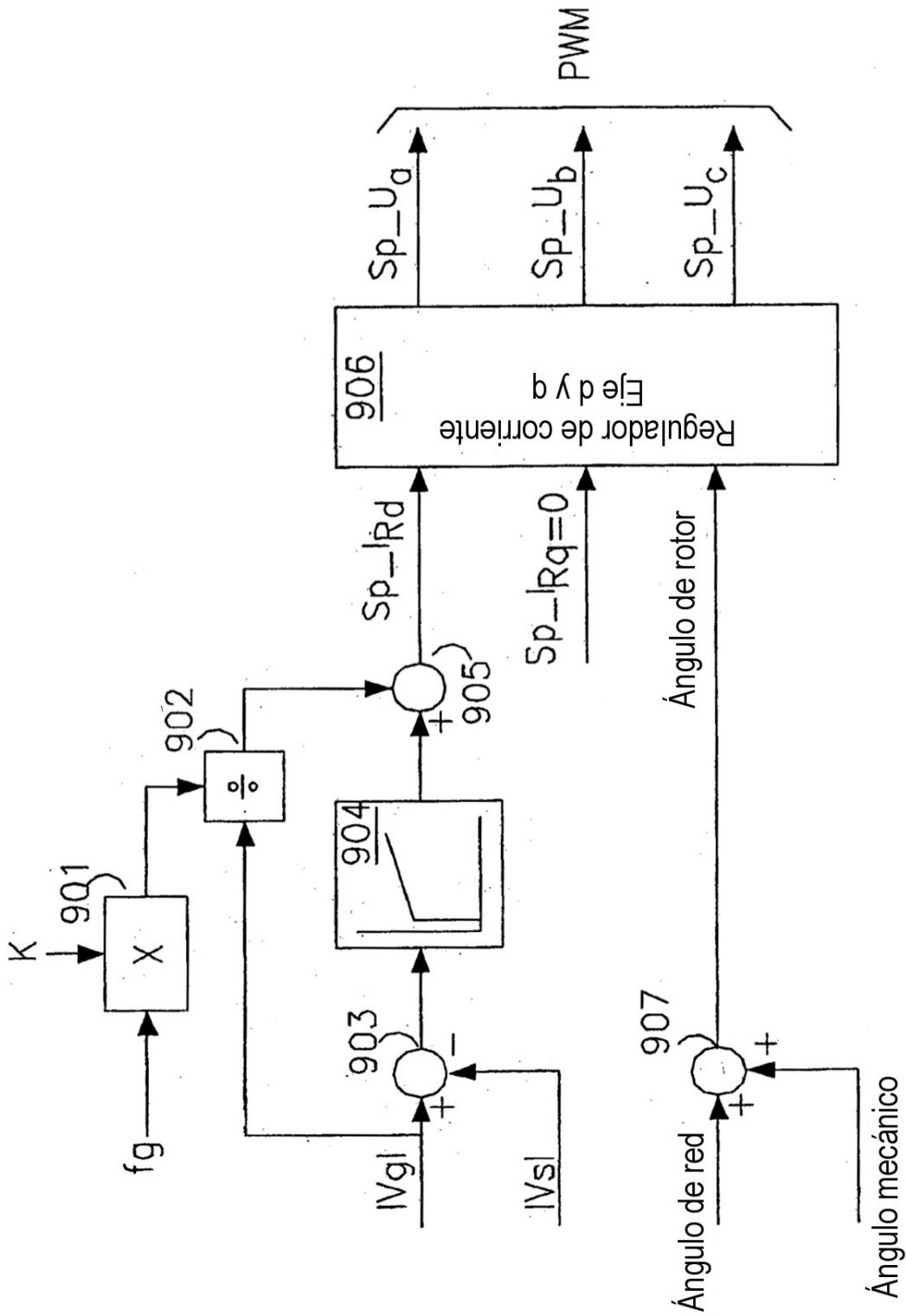


FIGURA 9

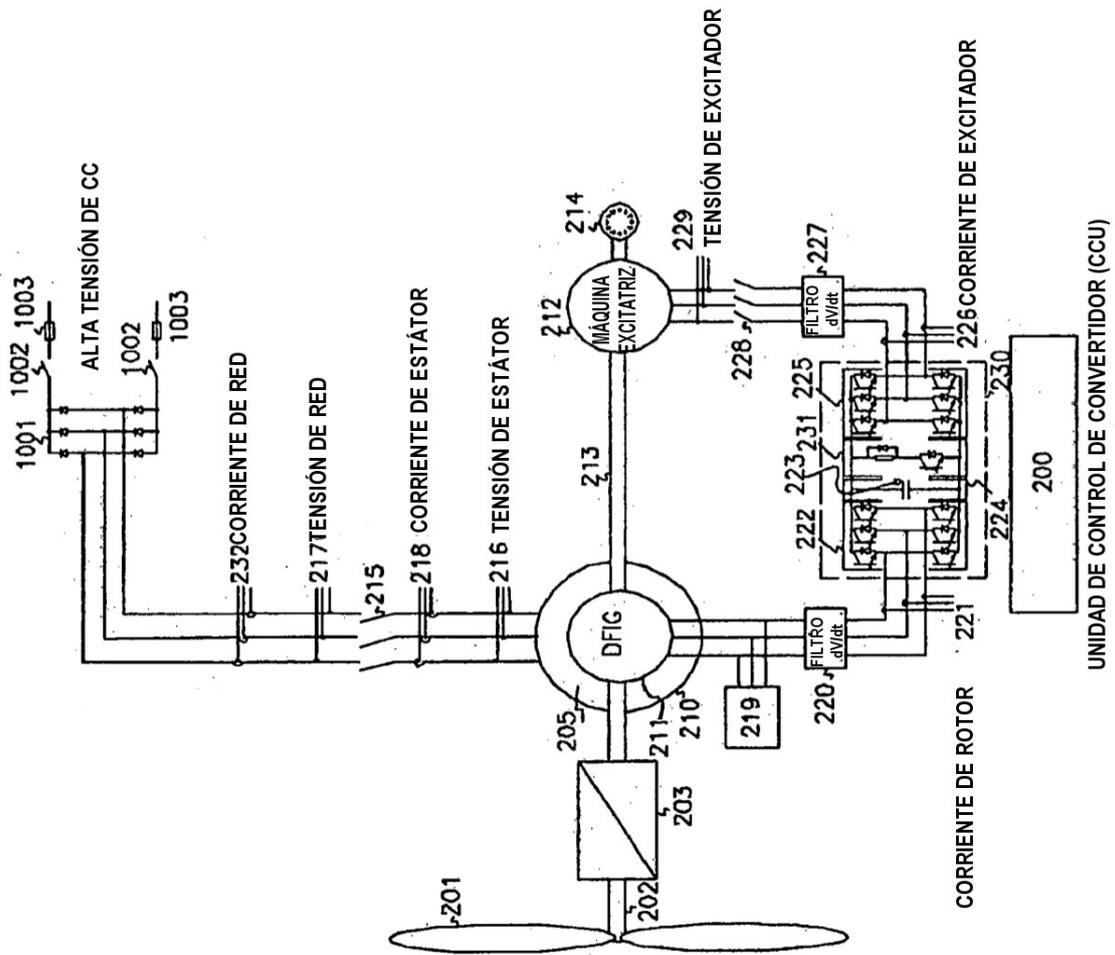


FIGURA 10

