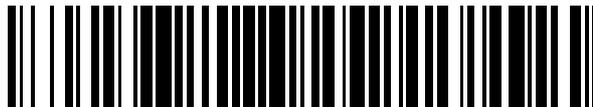


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 390 133**

51 Int. Cl.:

H02P 9/04 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06808520 .8**

96 Fecha de presentación: **13.11.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1946436**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.07.2008**

54 Título: **Convertidores de potencia**

30 Prioridad:
11.11.2005 GB 0523087
02.12.2005 GB 0524635

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
06.11.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
06.11.2012

73 Titular/es:
CONVERTEAM UK LTD (100.0%)
BOUGHTON ROAD RUGBY
WARWICKSHIRE CV21 1BU, GB

72 Inventor/es:
JONES, RODNEY;
BROGAN, PAUL, BRIAN;
GRØNDAHL, ERIK y
STIESDAL, HENRIK

74 Agente/Representante:
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 390 133 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

Convertidores de potencia

Campo técnico

5 La presente invención versa sobre convertidores de potencia y, en particular, sobre convertidores de potencia que pueden ser usados para conectar generadores que proporcionan una tensión variable con una frecuencia variable a una red eléctrica o red de suministro a una tensión y a una frecuencia nominales fijas. La presente invención también incluye características que permiten que los convertidores de potencia sigan conectados a la red de suministro y mantener el control durante un fallo en la red y en condiciones transitorias. Los convertidores de potencia son particularmente útiles para su uso, sin restricciones, con generadores que son accionados por turbinas eólicas.

Técnica antecedente

15 Es posible convertir la energía eólica en energía eléctrica usando una turbina eólica para impulsar el rotor de un generador, ya sea directamente o por medio de una caja de cambios. La frecuencia de ca que se desarrolla en los bornes del estátor del generador (la "tensión del estátor") es directamente proporcional a la velocidad de giro del rotor. La tensión en los bornes del generador también varía en función de la velocidad y, dependiendo del tipo particular de generador, del nivel de flujo. Para una captura óptima de la energía, la velocidad de giro del eje de salida de la turbina eólica variará según la velocidad del viento que impulsa las palas de la turbina. Para limitar la captura de energía con velocidades elevadas del viento, la velocidad de giro del eje de salida se controla alterando el ángulo de paso de las palas de la turbina. Puede lograrse hacer coincidir la tensión y la frecuencia variables del generador con la tensión y la frecuencia nominalmente constantes de la red eléctrica mediante el uso de un convertidor de potencia.

25 La patente estadounidense 5083039 describe una turbina eólica de velocidad variable en la que el eje de giro de la turbina eólica es usado para impulsar el rotor de un generador de inducción de ca. Se usa un convertidor de potencia para conectar la salida del generador a una red eléctrica. El convertidor de potencia incluye dispositivos semiconductores de conmutación de potencia activos que controlan las cantidades eléctricas de estátor en cada fase del generador. Se usa un dispositivo de mando de par para derivar una señal de demanda de par indicativa de un par deseado. Un controlador del generador opera bajo el control de la orientación de campo y es sensible a la señal de demanda de par para definir una corriente transversal deseada que representa el par en coordenadas de campo giratorio normales al campo de flujo del rotor. Los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia activos son controlados, entonces, por el controlador del generador usando un circuito de modulación de la anchura de los impulsos para producir cantidades eléctricas de estátor que corresponden a la corriente transversal deseada. Un controlador inversor regula la corriente de salida para suministrar energía de ca polifásica que tiene corrientes avanzada y retrasada con un ángulo especificado por una señal de control del factor de potencia. En esta disposición, una pérdida de tensión en la red durante una caída del suministro lleva a una pérdida de control de la tensión del enlace de cc. En consecuencia, también se pierde la capacidad de control de la corriente reactiva, que es esencial para las funciones de soporte de la tensión demandada por los códigos de la red.

40 La patente estadounidense 5225712 amplía el principio expuesto en lo que antecede, incluyendo el control de la potencia reactiva o el control del ángulo del factor de potencia como función de un conmutador de modo. De manera similar, el esquema del controlador de puente inversor de la patente estadounidense 5225712 es únicamente responsable de la regulación de la tensión del enlace de cc. Por lo tanto, ambos esquemas adolecen de la desventaja de que durante la situación en la que se pierde la tensión de la red, también se pierden el control de la tensión del enlace de cc y la capacidad de control de la corriente reactiva durante la caída de tensión.

Resumen de la invención

45 La presente invención se define por un convertidor de potencia y un procedimiento de operación de un convertidor de potencia con las características técnicas de las reivindicaciones independientes 1 y 39. Otras alternativas están definidas por las características de las reivindicaciones dependientes.

50 La presente invención se propone reducir, al menos, los problemas y las desventajas anteriores proporcionando un convertidor de potencia que puede ser usado para conectar un generador que proporciona tensión variable a una frecuencia variable con una red de suministro que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija, comprendiendo el convertidor de potencia:

un primer rectificador/inversor activo conectable eléctricamente al estátor del generador y que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
un segundo rectificador/inversor activo que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
55 un enlace de cc conectado entre el primer rectificador/inversor activo y el segundo rectificador/inversor activo;

un filtro conectado entre el segundo rectificador/inversor activo y la red de suministro, incluyendo el filtro bornes de red;

un primer controlador para el primer rectificador/inversor activo; y
un segundo controlador para el segundo rectificador/inversor activo;

5 en el que el primer controlador usa una señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para lograr el nivel deseado de tensión del enlace de cc que corresponda a la señal de demanda de tensión del enlace de cc; y

10 en el que el segundo controlador usa una señal de demanda de potencia indicativa del nivel de potencia que debe ser transmitida desde el enlace de cc a la red de suministro a través del segundo rectificador/inversor activo, y una señal de demanda de tensión indicativa de la tensión que debe lograrse en los bornes de red del filtro para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para lograr los niveles deseados de potencia y tensión que corresponden a las señales de demanda de potencia y tensión.

15 El convertidor de potencia puede ser usado para conectar el generador a la red de suministro durante las condiciones operativas normales, pero también incluye características que le permiten operar en situaciones en las que la tensión de la red de suministro varía debido a fallos de la red o situaciones transitorias en la red de suministro. Más en particular, el segundo controlador puede usar una medida de la tensión de la red de suministro para determinar límites a la potencia que puede ser exportada desde el segundo rectificador/inversor activo cuando
20 la tensión de la red de suministro se desvía de su condición nominal, y también puede usar una medida de la tensión de la red de suministro para determinar el nivel de corriente que debe proporcionarse desde el segundo rectificador/inversor activo para proporcionar un soporte de tensión a la red de suministro cuando la tensión de la red de suministro se desvía de su condición nominal.

25 El generador puede ser un generador lineal o giratorio de cualquier tipo adecuado. Los ejemplos incluirían un generador de inducción o un generador síncrono excitado por cualquier medio adecuado, tal como imanes permanentes o devanados superconductores o convencionales de campo. En el caso de un generador giratorio, el rotor puede estar conectado al eje de salida, o impulsado por él, de un turbina o máquina motriz, tal como una turbina eólica, una turbina mareomotriz, una hidroturbina, un motor de turbina de vapor, un motor diésel o un motor de turbina de gas, por ejemplo. Podría usarse un generador lineal en aplicaciones que se beneficien inherentemente
30 de un movimiento de vaivén, por ejemplo, generadores de oleaje.

Preferentemente, el primer controlador usa una señal de demanda de flujo indicativa de un nivel deseado del flujo que debe lograrse en el generador y convierte esta en una señal de demanda de corriente longitudinal para el primer
35 rectificador/inversor activo. El primer controlador puede entonces usar una la señal de demanda de corriente longitudinal para controlar la operación de los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente longitudinal deseada para el primer rectificador/inversor activo. En el presente documento, se usa la expresión “cantidades eléctricas de estátor” para referirse a cualquiera de la magnitud de tensión de las fases individuales, a la magnitud de la corriente de las fases individuales, a la fase y a la frecuencia, y a todas ellas, en un generador polifásico.

40 La operación de los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia en el primer rectificador/inversor activo puede ser controlada usando señales de control de accionamiento de puerta derivadas según una estrategia convencional de modulación de la anchura de los impulsos. Se apreciará inmediatamente que pueden considerarse diversos tipos de estrategias de modulación de la anchura de los impulsos. En un aspecto preferente de la presente invención con un inversor de la fuente de tensión de dos niveles, puede implementarse como sigue una estrategia
45 de modulación de la anchura de los impulsos de frecuencia fija. En un procesador digital, se multiplica el requisito de tensión de salida, determinada a partir de la combinación de señales de tensión longitudinal y transversal, por el valor de una forma de onda sinusoidal mejorada en múltiplos impares del tercer armónico por el valor del ángulo con el que la tensión de salida ha de ser aplicada para una fase dada en el rectificador/inversor activo. Se usa una forma de onda sinusoidal mejorada en múltiplos impares del tercer armónico para maximizar la tensión de salida que pueden lograrse en los bornes de ca del bloque rectificador/inversor activo para una tensión dada del enlace de cc.
50 La señal resultante es comparada con una forma de onda triangular que discurre con una frecuencia fija para determinar los momentos específicos de conmutación de los dispositivos semiconductores superior e inferior de conmutación de potencia en esa fase del rectificador/inversor activo. Para superar las conocidas demoras de conmutación y prevenir la conducción simultánea de los dispositivos semiconductores superior e inferior de conmutación de potencia, pueden interponerse periodos de supresión en los momentos específicos de conmutación
55 entre el dispositivo semiconductor superior de conmutación de potencia que se esté desconectando y el dispositivo semiconductor inferior de conmutación de potencia que se esté conectando. Se imponen correspondientes periodos de supresión entre el dispositivo semiconductor inferior de conmutación de potencia que se esté desconectando y el dispositivo semiconductor superior de conmutación de potencia que se esté conectando. Se repite el mismo procedimiento para cada fase del rectificador/inversor activo:

60 Preferentemente, el primer controlador convierte la señal de demanda de flujo en la señal de demanda de corriente longitudinal con referencia a una o más características del generador. Las características podrían

5 incluir los parámetros del circuito equivalente del generador y/o datos de la placa de identificación, tales como corriente, tensión, velocidad, potencia y frecuencia nominales y datos tales como la curva de magnetización. La curva de magnetización proporciona la relación entre el flujo del estátor para el generador y la corriente longitudinal necesaria para lograrlo. Típicamente, la curva de magnetización para un generador mostrará una relación lineal entre el flujo del estar y la corriente longitudinal hasta cierto nivel flujo. Sin embargo, más allá de este cierto nivel, pequeños incrementos en el flujo requerirán grandes incrementos en la corriente longitudinal. Esta región no lineal está asociada con la saturación del hierro usado para formar el circuito magnético del generador. La curva de magnetización puede derivarse del procedimiento de prueba para el generador durante su fabricación o por las pruebas de inyección de corriente llevadas a cabo durante la etapa de puesta en funcionamiento del generador. Puede disponerse que tales pruebas de inyección de corriente sean automáticas como parte de una rutina de puesta en marcha automática para la combinación del convertidor de potencia/generador.

15 Preferentemente, el primer controlador compara la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo. El primer controlador pueden entonces controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente transversal deseada para el primer rectificador/inversor activo.

20 El segundo controlador puede suministrar una señal de control que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro al primer controlador. Esto permite que el primer controlador compare la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc, y luego limite la señal de demanda de corriente del enlace de cc usando la señal de control procedente del segundo controlador para determinar una señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc. Entonces la señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc puede ser usada por el primer controlador para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo.

30 Alternativamente, el segundo controlador puede suministrar una señal de control que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro y/o la señal de demanda de potencia al primer controlador. Esto permite que un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador compare la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para proporcionar una señal de salida que se suma a la señal de control para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc. La señal de demanda de corriente cc puede ser usada entonces para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo.

35 Preferentemente, el segundo controlador convierte la señal de demanda de potencia, indicativa del nivel de potencia que ha de transferirse desde el enlace de cc a la red de suministro a través del segundo rectificador/inversor activo, en una señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo. El segundo controlador puede entonces controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente transversal deseada para el segundo rectificador/inversor activo. En el presente documento, se usa la expresión "cantidades eléctricas de filtro/red de suministro" para referirse a cualquiera de la magnitud de tensión de las fases individuales, a la magnitud de la corriente de las fases individuales, a la fase y a la frecuencia, y a todas ellas, en un rectificador/inversor activo polifásico. El término "polifásico" se refiere típicamente a trifásico, pero puede incluir otros números de fases. La operación de los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia en el segundo rectificador/inversor activo también puede ser controlada usando señales de control de accionamiento de puerta derivadas según una estrategia convencional de modulación de la anchura de los impulsos.

40 La señal de demanda de potencia puede ser convertida en la señal de demanda de corriente transversal dividiendo la señal de demanda de potencia por una señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro. Preferentemente, esta señal es el componente transversal de la tensión de ca que se deriva de la medición de la tensión trifásica en el lado de la red del filtro. Alternativamente, la señal de demanda de potencia puede ser convertida en la señal de demanda de corriente transversal dividiendo la señal de demanda de potencia por una versión filtrada de la señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro.

50 Preferentemente, el segundo controlador usa una señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc indicativa de una tensión deseada del enlace de cc y compara la señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal ilimitada de demanda de corriente transversal. La señal ilimitada de demanda de corriente transversal puede ser entonces limitada para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo. La señal ilimitada de demanda de corriente transversal puede ser limitada a un valor que es determinado por una señal limitante que, a su vez, se deriva preferentemente de la señal de demanda de potencia.

La señal ilimitada de demanda de corriente transversal puede sumarse a una señal de alimentación directa de corriente transversal que se deriva de las señales siguientes: una señal indicativa de la potencia del generador, una señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro y una señal de ganancia que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

5 La señal indicativa de la potencia del generador puede ser suministrada al segundo controlador desde el primer controlador. Alternativamente, la señal indicativa de la potencia del generador menos la salida de un controlador PI de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador puede ser suministrada al segundo controlador y es usada por el segundo controlador solo durante una situación de caída de tensión de la red de suministro.

10 El segundo controlador puede modificar la señal limitante que se deriva de la señal de demanda de potencia según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro. La señal limitante puede ser modificada por el segundo controlador en respuesta a las desviaciones en la red de suministro con respecto a las condiciones de tensión nominales, por ejemplo durante un fallo en la red de suministro o en condiciones transitorias. Esto dará como resultado cambios en la transferencia de potencia a la red de suministro para satisfacer requisitos de servicio de la red de suministro tales como el soporte de tensión y/o la frecuencia.

15 El enlace de cc puede incluir un condensador. En este caso, el convertidor de potencia puede incluir, además, un sensor de corriente para medir la corriente que fluye en el condensador y proporcionar una señal de salida. La señal de salida del sensor de corriente puede ser restada de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador para proporcionar una señal inferida que se suma a la salida de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc para el primer
20 rectificador/inversor activo. Alternativamente, la señal de salida del sensor de corriente puede ser restada de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador para proporcionar una señal que se filtra y se suma a la salida de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc para el primer rectificador/inversor activo.

25 Alternativamente, el convertidor de potencia puede incluir, además, un sensor de tensión para medir la tensión del enlace de cc y proporcionar una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc. También pueden proporcionarse medios para medir la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc. El valor integral de un controlador PI de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador puede ser modificado entonces en un factor predeterminado cuando la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc es mayor que un primer umbral y la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc es mayor que un segundo umbral.
30

Durante una situación de caída de tensión de la red de suministro, puede derivarse una señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo a partir de una versión limitada de la rapidez de respuesta de una señal que se deriva del límite de potencia nominal del segundo rectificador/inversor activo, que se modifica en función de las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

35 Preferentemente, el segundo controlador compara la señal de demanda de tensión, indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro, con una señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro para determinar una señal de demanda de corriente longitudinal para el segundo rectificador/inversor activo. El segundo controlador puede entonces controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de filtro/red de
40 suministro que logren la corriente longitudinal deseada para el segundo rectificador/inversor activo.

El segundo controlador puede modificar la señal de demanda de corriente longitudinal según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

45 El segundo controlador puede modificar una señal de error que surge de la diferencia entre la señal de demanda de tensión, indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro, y la señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro según una señal derivada de la señal de demanda de corriente longitudinal. El propósito de modificar la señal de error según una señal derivada de la señal de demanda de corriente longitudinal es que pueda realizarse una característica que puede contribuir a que se comparta la corriente entre múltiples generadores que estén conectados a una red particular de suministro.

50 Preferentemente, el convertidor de potencia comprende, además, un sensor de velocidad para derivar una señal de velocidad indicativa de la velocidad de la parte móvil del generador (es decir, el rotor en el caso de un generador giratorio y el trasladador en el caso del generador lineal). Sin embargo, en algunos casos el sensor de velocidad puede ser sustituido por un sistema observador de la velocidad que use señales internas hacia el primer rectificador/inversor activo para derivar una señal de velocidad. La señal de velocidad (derivada del sensor de velocidad o del sistema observador de la velocidad) puede ser usada entonces para derivar la señal de demanda de
55 potencia por referencia a una tabla de consulta of señal de demanda de potencia en función de la velocidad. La tabla de consulta puede combinarse con un controlador PI. Preferentemente, la señal de velocidad es modificada por una función de filtro. La señal de velocidad también puede ser modificada por una segunda función de filtro y multiplicada por una ganancia para proporcionar un término de atenuación que se suma a la señal de demanda de potencia

derivada con referencia a la tabla de consulta para dar una señal de demanda de potencia total. Las funciones de filtro pueden ser usadas independiente o conjuntamente para atenuar cualquier resonancia del eje o de la transmisión si son aplicables.

5 La presente invención también proporciona una disposición que comprende una pluralidad de convertidores de potencia, según se describe en lo que antecede, conectados entre sí en paralelo a una red de suministro que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija por medio de una conexión paralela. La señal de demanda de tensión, indicativa de la tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro de cada convertidor de potencia, se deriva preferentemente de una comparación de una señal superior de demanda de tensión y una señal superior de retroalimentación de tensión que se mide en el punto en el que la conexión paralela se conecta a la red de suministro.

10 Preferentemente, cada convertidor individual de potencia incluye un transformador elevador conectado eléctricamente entre el filtro asociado y la conexión paralela. La disposición puede incluir también un transformador elevador conectado eléctricamente entre la conexión paralela y la red de suministro. La señal superior de retroalimentación de tensión puede ser medida ya sea en el lado de la red de suministro o en el lado de la conexión paralela del transformador elevador conectado eléctricamente entre la conexión paralela y la red de suministro. La ventaja de medir la señal superior de retroalimentación de tensión en el lado de la red de suministro del transformador elevador es que la medición en el lado de la conexión paralela está sujeta a regulación entre los extremos del transformador elevador. Por lo tanto, se elimina este efecto de regulación si la medición se realiza en el lado de la red de suministro.

20 El convertidor de potencia es adecuado para su uso en una turbina eólica. Por lo tanto, la presente invención también proporciona una turbina eólica que comprende un generador que tiene un estátor y un rotor, un conjunto de turbina que incluye una pala de turbina o palas de turbina para hacer girar el rotor del generador, y un convertidor de potencia según se ha descrito en lo que antecede. El conjunto de turbina puede ser integral con el rotor del generador. Alternativamente, la pala o las palas de la turbina (tres palas podrían ser lo habitual) están montadas en un eje giratorio y el rotor del generador está acoplado al eje giratorio. El rotor del generador puede estar acoplado directamente al eje giratorio o indirectamente por medio de una caja de cambios.

25 Varias turbinas eólicas pueden estar conectadas entre sí formando una granja eólica. Por lo tanto, la presente invención proporciona, además, una granja eólica que comprende una red de suministro que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija, y una pluralidad de turbinas eólicas según se ha descrito en lo que antecede. Los respectivos convertidores de potencia de la pluralidad de turbinas eólicas están conectados entre sí en paralelo a la red de suministro por medio de una conexión paralela, y la señal de demanda de tensión, indicativa de la tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro de cada convertidor de potencia, se deriva de una comparación de una señal superior de demanda de tensión y una señal superior de retroalimentación de tensión que se mide en el punto en el que la conexión paralela se conecta a la red de suministro.

30 Preferentemente, cada turbina eólica incluye un transformador elevador conectado eléctricamente entre el filtro del convertidor de potencia asociado y la conexión paralela. La granja eólica puede comprender, además, un transformador elevador conectado eléctricamente entre la conexión paralela y la red de suministro. La señal superior de retroalimentación de tensión puede ser medida ya sea en el lado de la red de suministro o en el lado de la conexión paralela del transformador elevador conectado eléctricamente entre la conexión paralela y la red de suministro.

35 La presente invención proporciona, además, un procedimiento de operación de un convertidor de potencia que puede ser usado para conectar un generador que proporciona una tensión variable con una frecuencia variable a una red de suministro que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija, comprendiendo el convertidor de potencia:

- 45 un primer rectificador/inversor activo conectable eléctricamente al estátor del generador y que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
- un segundo rectificador/inversor activo que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
- 50 un enlace de cc conectado entre el primer rectificador/inversor activo y el segundo rectificador/inversor activo;
- un filtro conectado entre el segundo rectificador/inversor activo y la red de suministro, incluyendo el filtro bornes de red;
- un primer controlador para el primer rectificador/inversor activo; y
- 55 un segundo controlador para el segundo rectificador/inversor activo;
- comprendiendo el procedimiento las etapas de que:

el primer controlador use una señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para lograr el nivel deseado de tensión del enlace de cc que corresponda a la señal de demanda de tensión del enlace de cc; y

5 el segundo controlador use una señal de demanda de potencia indicativa del nivel de potencia que debe ser transferida desde el enlace de cc a la red de suministro a través del segundo rectificador/inversor activo, y una señal de demanda de tensión indicativa de la tensión que debe lograrse en los bornes de red del filtro para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para lograr los niveles deseados de potencia y tensión que corresponden a las señales de demanda de potencia y tensión.

El procedimiento puede incluir etapas adicionales, según se esboza a continuación.

10 El segundo controlador puede usar una medida de la tensión de la red de suministro para determinar límites a la potencia que puede ser exportada desde el segundo rectificador/inversor activo cuando la tensión de la red de suministro se desvíe de su condición nominal.

El segundo controlador también puede usar una medida de la tensión de la red de suministro para determinar el nivel de corriente que ha de proporcionarse desde el segundo rectificador/inversor activo para proporcionar soporte de tensión a la red de suministro cuando la tensión de la red de suministro se desvíe de su condición nominal.

15 El primer controlador puede usar una señal de demanda de flujo indicativa de un nivel deseado de flujo que ha de lograrse en el generador, convertir la señal de demanda de flujo en una señal de demanda de corriente longitudinal para el primer rectificador/inversor activo y controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente longitudinal deseada para el primer rectificador/inversor activo. La etapa de conversión de la señal de demanda de flujo en la señal de demanda de corriente longitudinal puede llevarse a cabo con referencia a una o más características del generador.

20 El primer controlador puede comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo y controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente transversal deseada para el primer rectificador/inversor activo.

25 El segundo controlador puede suministrar al primer controlador una señal de control que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro durante una situación de caída de tensión de la red de suministro. El primer controlador puede comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc y limitar la señal de demanda de corriente del enlace de cc usando la señal de control procedente del segundo controlador para determinar una señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc. El primer controlador puede entonces usar la señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo para que no se extraiga potencia alguna de la red de suministro durante la situación de caída de tensión de la red de suministro.

30 Alternativamente, el segundo controlador puede suministrar una señal de control que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro y/o la señal de demanda de potencia al primer controlador. Un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador puede entonces comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc, indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para proporcionar una señal de salida que se suma a la señal de control para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc. La señal de demanda de corriente del enlace de cc puede ser usada entonces para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el primer rectificador/inversor activo.

35 El segundo controlador puede convertir la señal de demanda de potencia, indicativa del nivel de potencia que ha de ser transferida desde el enlace de cc a la red de suministro a través del segundo rectificador/inversor activo, en una señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo y controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente transversal deseada para el segundo rectificador/inversor activo.

40 La anterior etapa de conversión de la señal de demanda de potencia en la señal de demanda de corriente transversal se puede llevar a cabo dividiendo la señal de demanda de potencia por una señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro. Alternativamente, la señal de demanda de potencia puede ser convertida en la señal de demanda de corriente transversal dividiendo la señal de demanda de potencia por una versión filtrada de la señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro.

45 El segundo controlador puede usar una señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, comparar la señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc para determinar una señal ilimitada de demanda de corriente

transversal y limitar la señal ilimitada de demanda de corriente transversal a un valor determinado por una señal limitante que se deriva de la señal de demanda de potencia para determinar la señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo durante el arranque y la condición operativa normal del convertidor de potencia.

- 5 El procedimiento puede comprender, además, la etapa de suma de la señal ilimitada de demanda de corriente transversal a una señal de alimentación directa de corriente transversal que se deriva de las señales siguientes: una señal indicativa de la potencia del generador una señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro y una señal de ganancia que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

- 10 La señal indicativa de la potencia del generador puede ser suministrada al segundo controlador desde el primer controlador. Alternativamente, la señal indicativa de la potencia del generador menos la salida de un controlador PI de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador puede ser suministrada al segundo controlador y es usada por el segundo controlador solo durante una situación de caída de tensión de la red de suministro.

- 15 El segundo controlador puede modificar la señal limitante que se deriva de la señal de demanda de potencia según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro en una situación de caída de tensión de la red de suministro. El uso de la palabra "caída" en esta descripción en relación con situaciones de caída de la red se refiere a una situación en la que la tensión de la red de suministro se reduce por debajo de su valor nominal como consecuencia de condiciones de fallo de la red, ya sean simétricas o asimétricas.

- 20 El enlace de cc puede incluir un condensador y el convertidor de potencia puede incluir además un sensor de corriente para medir la corriente que fluye en el condensador y proporcionar una señal de salida. En este caso, el procedimiento puede comprender además las etapas de restar la señal de salida del sensor de corriente de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador para proporcionar una señal inferida que se suma a la salida de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc para el primer rectificador/inversor activo. Alternativamente, el procedimiento puede comprender, además, las etapas de restar la señal de salida del sensor de corriente de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador para proporcionar una señal que se filtra y se suma a la salida de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc para el primer rectificador/inversor activo.

- 25 Alternativamente, el convertidor de potencia puede incluir, además, un sensor de tensión para medir la tensión del enlace de cc y proporcionar una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc y medios para medir la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc. En este caso, el procedimiento puede comprender, además, las etapas de modificación del valor integral de un controlador PI de un controlador de tensión del enlace de cc del primer controlador en un factor predeterminado cuando la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc es mayor que un primer umbral y la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc es mayor que un segundo umbral.

- 35 En una situación de caída de tensión de la red de suministro, una señal de demanda de corriente transversal para el segundo rectificador/inversor activo puede ser derivada de una versión limitada de la rapidez de respuesta de una señal derivada del límite de potencia nominal del segundo rectificador/inversor activo, que se modifica en función de las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

- 40 El segundo controlador puede comparar la señal de demanda de tensión, indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro, con una señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro para determinar una señal de demanda de corriente longitudinal para el segundo rectificador/inversor activo y controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente longitudinal deseada para el segundo rectificador/inversor activo.

- 45 El segundo controlador puede modificar la señal de demanda de corriente longitudinal según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.

- 50 El segundo controlador puede modificar una señal de error que surge de la diferencia entre la señal de demanda de tensión, indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro, y la señal de retroalimentación de tensión medida en los bornes de red del filtro según una señal derivada de la señal de demanda de corriente longitudinal.

Una señal de velocidad indicativa de la velocidad de la parte móvil del generador puede ser derivada y usada para derivar la señal de demanda de potencia. La señal de demanda de potencia puede ser modificada por una o más funciones de filtro, que también pueden ser usadas para proporcionar atenuación de cualquier resonancia del eje o de la transmisión.

- 55 La señal de demanda de potencia puede ser derivada de una tabla de consulta o una función matemática en la que la señal modificada de velocidad forma un puntero a la tabla de consulta o un valor para el que se calcula la función

matemática. La señal de demanda de potencia también puede sumarse con una señal derivada de una versión filtrada de la señal de velocidad.

La presente invención también proporciona un procedimiento de operación de una pluralidad de convertidores de potencia, según se describe en lo que antecede, conectados entre sí en paralelo a una red de suministro que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija por medio de una conexión paralela, comprendiendo el procedimiento la etapa de derivar la señal de demanda de tensión indicativa de la tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro de cada convertidor de potencia, de una comparación de una señal superior de demanda de tensión y una señal superior de retroalimentación de tensión que se mide en el punto en el que la conexión paralela se conecta a la red de suministro. El procedimiento también puede comprender la etapa de medir la señal superior de retroalimentación de tensión ya sea en el lado de la red de suministro o en el lado de la conexión paralela del transformador elevador conectado eléctricamente entre la conexión paralela y la red de suministro.

La presente invención también proporciona un procedimiento no reivindicado de operación de una turbina eólica que comprende un generador que proporciona tensión variable a frecuencia variable y que tiene un estátor y un rotor, un conjunto de turbina que incluye al menos una pala para hacer girar el rotor del generador y un convertidor de potencia que conecta el generador a una red de suministro que opera con una tensión nominal fija y una frecuencia nominal fija, comprendiendo el convertidor de potencia:

un primer rectificador/inversor activo conectable eléctricamente al estátor del generador y que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 un segundo rectificador/inversor activo que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 un enlace de cc conectado entre el primer rectificador/inversor activo y el segundo rectificador/inversor activo;
 un filtro conectado entre el segundo rectificador/inversor activo y la red de suministro, incluyendo el filtro bornes de red;
 un primer controlador para el primer rectificador/inversor activo; y
 un segundo controlador para el segundo rectificador/inversor activo;
 en el que, en respuesta a un cambio en la velocidad del viento, el procedimiento comprende las etapas de:

controlar el segundo rectificador/inversor activo para cambiar el nivel de potencia exportada desde el enlace de cc, de tal modo que la tensión del enlace de cc cambie desde un nivel deseado; y
 controlar el primer rectificador/inversor activo para importar suficiente corriente al enlace de cc a través del puente del generador desde el generador para restaurar la tensión del enlace de cc al nivel deseado.

Dibujos

La Figura 1 es un dibujo esquemático que muestra cómo se usa un convertidor de potencia según la presente invención para conectar una turbina eólica que impulsa un generador de velocidad variable y una red eléctrica de frecuencia fija;
 la Figura 2 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del enlace de cc control para el puente del generador (rectificador activo) de la Figura 1;
 la Figura 3 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del control de corriente para el puente del generador (rectificador activo) de la Figura 1;
 la Figura 4 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del control de potencia para el puente de red (inversor) de la Figura 1;
 la Figura 5 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del control de corriente del puente de red (inversor) de la Figura 1;
 la Figura 6 es un dibujo esquemático que muestra cómo pueden conectarse entre sí varios convertidores de potencia según la presente invención en paralelo a la red de suministro, formando una granja eólica;
 la Figura 7 es un dibujo esquemático que muestra un control total de la tensión de la granja eólica;
 la Figura 8 es un dibujo esquemático que muestra cómo se usa un primer convertidor alternativo de potencia según la presente invención para conectar una turbina eólica que impulsa un generador de velocidad variable y una red eléctrica de frecuencia fija;
 la Figura 9 es un dibujo esquemático que muestra más detalle de los controles de la tensión del enlace de cc y de la corriente subordinada para el puente del generador (rectificador activo) de la Figura 8;
 la Figura 10 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del control de la potencia, del control de la tensión de la red y de los controles de la corriente subordinada para el puente de red (inversor) de la Figura 8;
 la Figura 11 es un dibujo esquemático que muestra cómo se usa un segundo convertidor alternativo de potencia según la presente invención para conectar una turbina eólica que impulsa un generador de velocidad variable y una red eléctrica de frecuencia fija;
 la Figura 12 es un dibujo esquemático que muestra más detalle de una primera opción para el control del enlace de cc para el puente del generador (rectificador activo) de la Figura 11;

la Figura 13 es un dibujo esquemático que muestra más detalle del control de potencia para el puente de red (inversor) de la Figura 11; y

la Figura 14 es un dibujo esquemático que muestra más detalle de una segunda opción para el control del enlace de cc para el puente del generador (rectificador activo) de la Figura 11.

5 Topología del convertidor de potencia

La topología básica del convertidor de potencia se esbozará con referencia a la Figura 1.

Se usa el convertidor de potencia para conectar una turbina eólica 2 que impulsa un generador 4 de inducción de ca de velocidad variable y una red eléctrica de frecuencia nominal fija (marcada RED). Típicamente, la turbina eólica incluye tres palas de turbina (también son posibles una pala de turbina o dos palas de turbina o más de tres palas de turbina) montadas en un eje giratorio y cuyo ángulo de paso puede ser controlado por medio de un accionador del ángulo de paso para optimizar y/o limitar la captura de energía eólica en el generador 4. Se usa una caja 8 de cambios para conectar el eje giratorio al rotor del generador 4 de velocidad variable. En algunos casos, el eje giratorio puede ser conectado directamente con el rotor del generador 4 de velocidad variable. Esto significa que la velocidad de giro del rotor varía en función de la velocidad del viento y, por lo tanto, que la frecuencia de la tensión desarrollada en el estátor del generador 4 (la "frecuencia de estátor") puede variar en un amplio intervalo. Varias turbinas eólicas, según se represen por la totalidad de la Figura 1, pueden estar conectadas entre sí, definiendo una granja eólica.

Los bornes del generador 4 están conectados con los bornes de ca de un puente 10 de un generador trifásico, que en su operación normal opera como un rectificador activo para suministrar energía a un enlace 12 de cc. El puente 10 del generador tiene una topología convencional trifásica de dos niveles con una serie de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia plenamente controlados y regulados usando una estrategia de modulación de la anchura de los impulsos. Sin embargo, en la práctica, el puente 10 del generador puede tener cualquier topología adecuada, tal como una topología fijada de punto neutro de tres niveles o una topología multinivel (por ejemplo, la disposición Foch-Maynard). La derivación de las señales de órdenes de accionamiento de puerta que se usan para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia es descrita con más detalle en lo que sigue.

Se suministra la tensión de salida de cc del puente 10 del generador a los bornes de cc de un puente 14 de red que, en la operación normal, opera como inversor. El control principal para la tensión de salida de cc se logra controlando el puente 10 del generador. El puente 14 de red tiene una topología trifásica de dos niveles similar a la del puente 10 del generador, con una serie de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia plenamente controlados y regulados usando una estrategia de modulación de la anchura de los impulsos. Sin embargo, en la práctica, el puente 14 de red puede tener cualquier topología adecuada, tal como se ha expuesto en lo que antecede para el puente 10 del generador. Se controla el puente 14 de red para satisfacer dos objetivos principales: concretamente, potencia activa y tensión de red. En lo que sigue se proporciona una descripción detallada de cómo se logra este control. También se describe con mayor detalle en lo que sigue la derivación de las señales de órdenes de accionamiento de puerta que se usan para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia.

Tal como se describe en el presente documento, la rectificación activa (como modo fundamental de operación del puente 10 del generador) es la conversión de energía de los bornes de ca del puente del generador trifásico al enlace de cc, y la inversión (como modo fundamental de operación del puente 14 de red) es la conversión de energía del enlace de cc del puente de red trifásico a sus bornes de ca. Sin embargo, se apreciará de inmediato que puede haber ocasiones en las que podría resultar necesario o deseable operar el puente 10 del generador como un inversor y operar el puente 14 de red como un rectificador activo. Por ejemplo, durante el arranque, el puente 14 de red operará como un rectificador activo para suministrar energía desde la red de suministro al enlace 12 de cc. En situaciones en las que ocurre una caída en la tensión de la red, el puente 10 del generador puede operar ya sea en el modo de rectificador activo o en un modo de inversor, según se requiera para controlar la tensión del enlace 12 de cc. La acción de los controladores para el puente 10 del generador y el puente 14 de red (es decir, el controlador 18 del puente del generador y el controlador 46 del puente de red, descritos con más detalle en lo que sigue) se coordina en caso de una caída de tensión de la red, de modo que no se extraiga potencia de la red de suministro, sino que, sujeto a la parametrización y al nivel de la caída de la tensión, el convertidor de potencia siga pudiendo suministrar energía a la red de suministro.

También puede resultar ventajoso con fines de mantenimiento y cuando la turbina eólica esté operando con velocidades muy bajas operar el generador 4 en un modo motriz. En este caso, puede suministrarse energía desde la red de suministro al generador 4 a través del puente 14 de red, que opera como un rectificador activo, y del puente 10 del generador, que opera como un inversor.

La tensión de salida de ca del puente 14 de red es filtrada por inductores 16 (y otros filtros posibles) y suministrada a la red eléctrica de frecuencia nominal fija a través de un transformador elevador 6. Pueden incluirse mecanismos protectores de control (no mostrados) para proporcionar una conexión fiable a la red eléctrica y para aislar el sistema generador de la red eléctrica para diversos requisitos operativos y no operativos.

Topología de la granja eólica

Tal como se ha mencionado brevemente en lo que antecede, varias turbinas eólicas como la representada por la totalidad de la Figura 1 pueden estar conectadas entre sí, definiendo una granja eólica. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 6, en la que varios convertidores 1a a 1d de potencia están conectados a una red de suministro (marcada RED) de frecuencia nominal fija por medio de una conexión paralela 72. Cada convertidor 1a a 1d de potencia incluye un filtro 16a a 16d y un transformador elevador 6a a 6d. Y también se proporciona un transformador elevador 74 adicional de la granja eólica entre la conexión paralela 72 y la red de suministro. La Figura 6 muestra cómo puede medirse la señal de retroalimentación de tensión de la granja eólica, que se describe con más detalle en lo que sigue con referencia a la Figura 7, en el lado de la conexión paralela (marcada RETROALIMENTACIÓN A DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) o en el lado de la red de suministro (marcada RETROALIMENTACIÓN B DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) del transformador elevador 74 de la granja eólica. La ventaja de medir la señal superior de retroalimentación de tensión en el lado de la red de suministro del transformador elevador 74 de la granja eólica es que la medición en el lado de la conexión paralela está sujeta a regulación entre los extremos del transformador elevador. Por lo tanto, se elimina este efecto de regulación si la medición se realiza en el lado de la red de suministro. Alternativamente, la medición de la señal de retroalimentación de tensión de la granja eólica en el lado de la red de suministro puede ser calculada usando la medición de la señal de retroalimentación de tensión de la granja eólica en el lado de la conexión paralela, las características del transformador elevador 74 de la granja eólica y la amplitud y el ángulo de la corriente a través del transformador elevador de la granja eólica.

Control del puente del generador

Ahora se explicará el control del puente 10 del generador con referencia a las Figuras 1 a 3.

Un controlador 18 del puente del generador recibe una señal VDC_GEN* de demanda de tensión del enlace de cc y una señal VDC_FB de retroalimentación de tensión indicativa de la tensión del enlace de cc. Se resta VDC_FB de VDC_GEN* y la diferencia es suministrada a un controlador PI 20 con las entradas de la ganancia integral variable Ki y la ganancia proporcional Kp para proporcionar una señal IDC_GEN* de demanda de corriente del enlace de cc, que es la corriente efectiva que se requiere que fluya en el enlace 12 de cc para satisfacer las condiciones operativas imperantes. Esta señal IDC_GEN* de demanda de corriente del enlace de cc es limitada entonces durante condiciones de fallo de la red por una señal IDC_LIM suministrada desde el controlador 46 del puente de red (véase más abajo) para formar una señal IDC_GEN*_LIM. Para convertir la señal limitada IDC_GEN*_LIM de demanda de corriente del enlace de cc en una señal IQ_GEN* de demanda de corriente transversal relativa a la corriente de fase del generador, se multiplica primero la señal limitada IDC_GEN*_LIM de demanda de corriente del enlace de cc por la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión para proporcionar una señal POWER_GEN de potencia. La señal POWER_GEN de potencia se convierte entonces en el bloque 92 de la función calculadora IQ_GEN* en la señal IQ_GEN* de demanda de corriente transversal aplicando la fórmula siguiente:

$$IQ_GEN^* = \frac{\left(\frac{POWER_GEN}{\sqrt{3}} \right) - (VD_FF \times ID_GEN^*)}{VQ_FF},$$

en la que VD_FF es el componente de alimentación directa de la tensión directa dentro de un controlador 26 de corriente de la Figura 2, ID_GEN* es la corriente de demanda longitudinal suministrada desde un bloque 32 de función de característica de saturación y VQ_FF es el componente de alimentación directa de la tensión transversal dentro del controlador 26 de corriente.

La señal IQ_GEN* de demanda de corriente transversal es limitada por una función de limitación para permanecer dentro de la región de no ruptura de la característica del generador y los valores nominales de tensión y corriente de los puentes del generador y de red. Este límite es determinado por medio de un cálculo fuera de línea para crear una tabla de consulta integrada en el bloque funcional 22 con base en parámetros del circuito equivalente de la máquina, parámetros de régimen de accionamiento y el intervalo requerido de velocidad operativa. La resultante tabla de consulta es usada durante la operación del convertidor accediendo a ella con una señal N de retroalimentación de la velocidad del rotor (o una señal de la velocidad observada del rotor) y tomando la señal resultante como el valor límite para el bloque 24 de función límite de IQ_GEN*. El resultante señal limitada IQ_GEN*_LIM de demanda de corriente transversal es suministrada entonces a un controlador 26 de corriente (descrito con más detalle en lo que sigue). La señal limitada IQ_GEN*_LIM de demanda de corriente transversal es usada también para determinar la frecuencia WS de deslizamiento que ha de aplicarse al generador 4 para lograr el necesario flujo de potencia desde el generador al enlace 12 de cc. La frecuencia WS de deslizamiento se determina usando la función siguiente:

$$WS = \frac{IQ_GEN^*_LIM \times RR \times LM}{\Phi^* \times LR},$$

en la que RR es la resistencia del rotor, LM es la inductancia de magnetización, Φ^* es la señal de demanda de flujo del generador y LR es la inductancia de fuga del rotor.

Integrar la frecuencia WS de deslizamiento proporciona una salida θ_S , que es el ángulo de deslizamiento. Integrar la salida de un observador 28 de la velocidad proporciona θ_R , que es el ángulo observado del rotor. (La función 28 del observador puede ser sustituida por la medición directa de la posición del rotor mediante el uso de un cifrador incremental o un dispositivo similar). Puede entonces determinarse un ángulo θ_0 de flujo del rotor sumando el ángulo θ_S de deslizamiento y el ángulo θ_R del rotor. El ángulo θ_0 de flujo del rotor es el ángulo en el que ha de aplicarse la combinación de la tensión longitudinal VD y la tensión transversal VQ en los bornes del estator del generador 4 por medio de un generador 30 de modulación de la anchura de los impulsos. Esto se describe con más detalle en lo que sigue. Debería hacerse notar que para los generadores síncronos no se requiere la etapa de definición e integración de la frecuencia de deslizamiento.

La señal de demanda de flujo Φ^* del generador (que puede ser constante o variable, dependiendo de las características requeridas del sistema) es aplicada a un bloque 32 de función que contiene la característica de saturación de la inductancia de magnetización del generador. La característica de saturación se determina ya sea por medición directa cuando el generador es puesto en marcha o extrayendo datos de los resultados de ensayo en fábrica para el generador. La salida del bloque 32 de función de características de saturación es una señal de corriente de magnetización y se convierte en la señal ID_GEN* de demanda de corriente longitudinal aplicada al controlador 26 de corriente. Para los generadores síncronos, la señal de demanda de corriente longitudinal es determinada por los requisitos de tensión de los bornes del generador para cada condición de velocidad y carga. Ajustando la señal de demanda de corriente longitudinal a un generación síncrono, puede modificarse la excitación mediante la acción del puente 10 del generador para optimizar la tensión de los bornes y la eficacia total del generador para cada condición operativa.

El controlador 26 de corriente para el puente 10 del generador incluye dos reguladores, uno que opera en el eje de corriente longitudinal y uno que opera en el eje de corriente transversal. En total, el controlador 26 de corriente opera en una trama de referencia síncrona alineada con el ángulo de flujo del rotor. La Figura 3 muestra los reguladores totales de corriente longitudinal y transversal del puente 10 del generador.

Además de la señal limitada IQ_GEN*_LIM de demanda de corriente transversal y de la señal ID_GEN* de demanda de corriente longitudinal, también se suministra al controlador 26 de corriente una señal IQ_GEN de retroalimentación de corriente transversal y una señal ID_GEN de retroalimentación de corriente longitudinal, que se derivan de la medición de las corrientes IU, IV y IW de fase del generador. La conversión de los componentes trifásicos en una trama de referencia estacionaria en componentes longitudinales/transversales en una trama de referencia síncrona se logra usando un bloque combinado 34 de la transformada de Clarke/Park. La transformada usa el ángulo θ_0 del flujo del rotor para la conversión. Puede verse por la Figura 3 que el controlador 26 de corriente también recibe las señales adicionales siguientes: la señal de demanda de flujo Φ^* del generador (que puede ser constante o variable, dependiendo de las características requeridas del sistema) y la frecuencia W0 del estátor del generador. La frecuencia W0 del estátor se calcula a partir de la suma de la frecuencia de deslizamiento y de la frecuencia del rotor. La frecuencia del rotor se deriva de la velocidad observada del rotor y del número de polos del generador.

El controlador 26 de corriente opera comparando la señal ID_GEN* de demanda de corriente longitudinal con la señal ID_GEN de retroalimentación de corriente longitudinal, y la señal limitada IQ_GEN*_LIM de demanda de corriente transversal con la señal IQ_GEN de retroalimentación de corriente transversal y aplicando los errores resultantes a controladores PI independientes. Las salidas de los controladores PI se suman entonces con señales de acoplamiento cruzado derivadas del producto de las demandas de corriente y de los parámetros de máquina para producir una tensión total de salida para los ejes longitudinal y transversal, VD_GEN* y VQ_GEN*, respectivamente. Los términos del acoplamiento cruzado son mostrados en la Figura 3 y emulan las ecuaciones estándar de tensión para el generador 4 en el estado estacionario. Con referencia a los términos del acoplamiento cruzado, δ_{LS} es la inductancia de fuga del estátor del generador y RS es la resistencia del estátor del generador.

Las salidas finales de tensión del controlador 26 de corriente, VD_GEN* y VQ_GEN*, son convertidas de coordenadas cartesianas a polares usando un conversor 38 de coordenadas. La magnitud de la tensión total V_GEN* se calcula según la ecuación:

$$V_GEN^* = \sqrt{(VD_GEN^{*2} + VQ_GEN^{*2})}$$

y es suministrada al controlador 36 de señales de órdenes de accionamiento de puerta. El ángulo entre la magnitud de la tensión total V_GEN* y la tensión transversal VQ_GEN* es θ_GEN y se calcula a partir del arco tangente de VD_GEN*/VQ_GEN* como sigue:

$$\theta_GEN = \arctan\left(\frac{VD_GEN^*}{VQ_GEN^*}\right)$$

El ángulo θ_GEN entre la magnitud de la tensión total V_GEN^* y la tensión transversal VQ_GEN^* es sumado al ángulo θ_0 del flujo del rotor para determinar el ángulo en el que la tensión total ha de imprimirse en los bornes del estátor del generador 4.

5 Las señales individuales de órdenes de accionamiento de puerta superior (U) e inferior (L) para las tres fases U, V y W resultantes en las señales individuales UU, UL, VU, VL, WU y WL del puente 10 del generador se calculan en el generador 30 de modulación de la anchura de los impulsos (PWM) usando la magnitud de la tensión total V_GEN^* , la suma de los ángulos θ_GEN y θ_0 y la frecuencia de la modulación de la anchura de los impulsos. La señal VDC_FB de retroalimentación de tensión del enlace de cc también es tomada en cuenta en estos cálculos de PWM. La señal VDC_FB de retroalimentación de tensión del enlace de cc puede ser derivada de forma independiente cuando se usan controladores independientes para el puente 10 del generador y el puente 14 de red, respectivamente. Esto resulta particularmente necesario cuando el puente 10 del generador y el puente 14 de red están físicamente separados entre sí y existe una inductancia significativa entre la capacitancia del enlace de cc de cada puente. En situaciones en las que se proporciona una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc derivada independientemente para cada puente, se apreciará fácilmente que debería efectuarse la siguiente sustitución:

Para el puente 10 del generador: $VDC_FB = VDC_FB_GEN$

Para el puente 14 de red: $VDC_FB = VDC_FB_NET$

El controlador 26 de corriente también produce una señal de alimentación directa de potencia indicativa de la potencia $POWER_FF$ del generador, que se calcula como sigue:

$$POWER_FF = \sqrt{3}(VQ_GEN^* \times IQ_GEN + VD_GEN^* \times ID_GEN)$$

20 Esta se usa como una señal de retroalimentación para el controlador 46 del puente de red.

Control del puente de red

Ahora se explicará el control del puente 14 de red con referencia a las Figuras 1 y 4 a 7. El control se basa en un esquema de control de la tensión y es diferente del esquema de control del ángulo del factor de potencia y del esquema de control de la potencia reactiva usado en los convertidores convencionales de potencia descritos en lo que antecede.

El esquema de control de la tensión incluye dos niveles de control. Con referencia a la Figura 7, el primero se define a nivel de la granja eólica y es sensible a una señal de demanda de tensión de la granja eólica que, típicamente, es establecida por la empresa de servicios públicos que controla la granja eólica. Esta señal de demanda de tensión de la granja eólica es comparada con una señal de retroalimentación de tensión de la granja eólica y se aplica el error entre las dos señales a un controlador 40 proporcional e integral para definir una señal VTURB* de demanda de tensión de turbina que se transmite a todas las turbinas eólicas T1 a TN de la granja eólica. Entonces se aplica un segundo nivel de control a cada una de las turbinas eólicas individuales para regular su propia tensión de salida en respuesta a la señal VTURB* de demanda de tensión de turbina.

35 Con referencia a la Figura 4, en cada una de las turbinas eólicas de la granja eólica, la señal VTURB* de demanda de tensión de turbina es comparada en un nodo sumador 42 con una señal VQ_NET de retroalimentación subordinada de tensión transversal (véase más abajo) que se deriva de la medición de tensión trifásica en el lado de la red de los inductores 16. La diferencia entre las dos señales es suministrada a un controlador PI 44 para formar una señal ID_NET* de demanda de corriente reactiva que es suministrada por un bloque 66 de limitación a un controlador 58 de corriente descrito con más detalle en lo que sigue.

40 La señal ID_NET* de demanda de corriente reactiva también vuelve a suministrarse a través de un controlador 48 de ganancia proporcional al nodo sumador 42 para modificar adicionalmente la señal de diferencia de tensión. Esto sirve para proporcionar una característica de atenuación, de tal modo que, cuando múltiples turbinas eólicas estén conectadas entre sí en paralelo a un transformador de la granja eólica a través de diferentes impedancias de conexión, la compartición de corriente reactiva entre cada turbina eólica sea más equilibrada. La ganancia de atenuación puede regularse, dependiendo de las configuraciones de red del sitio, para dar un equilibrio adecuado de la corriente entre las turbinas eólicas y para respetar las limitaciones nominales. Se aplican límites a las señales de demanda de corriente longitudinal y transversal ID_NET* e IQ_NET*, respectivamente, tal como se describe en lo que sigue, para situaciones de caída de tensión de la red.

50 El esquema de control de la tensión está integrado en el controlador 46 del puente de red como sigue. El controlador 46 del puente de red tiene cinco señales de entrada principales y siete señales de retroalimentación principales y

usa estas para derivar señales de órdenes de accionamiento de puerta para controlar la operación de los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia en el puente 14 de red.

Las señales de entrada incluyen una señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente de red, una señal P* de demanda de exportación de potencia, la señal VTURB* de demanda de tensión de la turbina, un parámetro de RÉGIMEN DE ACCIONAMIENTO que define el régimen de corriente de accionamiento y la señal POWER_FF de alimentación directa de potencia suministrada desde el controlador 18 del puente del generador y que es indicativa de la potencia del generador. Las señales de retroalimentación incluyen mediciones de tensión trifásica VRY, VYB y VBR (es decir, las mediciones de tensión tomadas entre las denominadas líneas de salida roja (R), amarilla (Y) y azul (B) que suministran energía desde el puente 14 de red a la red), mediciones de corriente trifásica IR, IY e IB, y la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión indicativa de la tensión del enlace de cc. Las señales de retroalimentación son usadas para derivar las siguientes señales de retroalimentación subordinadas de tensión y corriente para el puente 14 de red en los ejes longitudinal y transversal: VD_NET, VQ_NET, ID_NET e IQ_NET. Además, se pasa una señal IDC_LIM de control desde el controlador 46 del puente de red hasta el controlador 18 del puente del generador para permitir una reducción rápida de la potencia y un control coordinado entre los controladores durante condiciones de fallo de la red eléctrica. Durante tales condiciones de fallo de la red eléctrica, la tensión del enlace de cc control se distribuye entre los puentes de red y del generador, de modo que no se extraiga ninguna potencia activa de la red de suministra y se logren el soporte requerido de tensión de la red de suministro y los requisitos de exportación de potencia.

El bloque 68 de función incorpora un sistema de bucle de sincronización de fase (PLL) para derivar la señal θ MAINS, que es una medida del ángulo de la tensión de la red.

La señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc solo es necesaria para satisfacer los requisitos de arranque, para mantener la conexión con la red durante condiciones sin viento y permitir un control rápido coordinado de la tensión del enlace de cc entre el controlador 18 del puente del generador y el controlador 46 del puente de red durante condiciones de fallo de la red eléctrica. En operación, la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión es restada de la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc y el resultado es aplicado a un controlador PI 50 para determinar la señal VDC_PI_IQ_NET*. En el bloque 71 de función se calcula una señal IQ_FF, indicativa de la corriente de red transversal requerida para exportar la potencia instantánea del generador, a partir de la señal POWER_FF de alimentación directa de potencia, de una señal que representa la tensión VQ_NET de la red y de una señal PFF_GAIN de ganancia que es una salida del bloque 66 de limitación. Esto se suma entonces a la señal VDC_PI_IQ_NET* para crear una señal ilimitada IQ_NET*. La señal resultante es limitada por una función de limitación (bloque 52 de la función de limitación) controlada por la menor de P^*/VQ_NET o por el límite derivado de los requisitos de la caída de tensión de la red.

Con referencia a la Figura 1, la señal N de retroalimentación de la velocidad del rotor se deriva de un sensor 54 de velocidad (o, alternativamente, de una señal de la velocidad observada del rotor) y luego es filtrada para proporcionar una primera señal filtrada N' de la velocidad y una segunda señal filtrada N'2 de la velocidad. La segunda señal filtrada N'2 de la velocidad proporciona atenuación para cualquier resonancia del eje a través de una ganancia KD de atenuación. La primera señal filtrada N' de la velocidad proporciona un puntero a una tabla precalculada 56 de consulta de la demanda de potencia en función de la velocidad filtrada. La tabla de consulta puede ser combinada con un controlador PI. La señal resultante P* de demanda de la exportación de potencia, que es la suma de las señales de atenuación y de demanda de potencia de la tabla de consulta, es aplicada al controlador 46 del puente de red, tal como se muestra en la Figura 1. Más en particular, la señal P* de demanda de exportación de potencia es dividida por la señal VQ_NET de retroalimentación subordinada de tensión transversal para convertirse en la señal limitante para la señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal en condiciones operativas normales. Alternativamente, la señal P* de demanda de exportación de potencia puede ser convertida en la señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal dividiendo la señal P* de demanda de exportación de potencia por una versión filtrada de la señal VQ_NET de retroalimentación subordinada de tensión transversal que se deriva de la tensión en los bornes de red de los inductores 16.

La señal limitada IQ_NET*_LIM de requisitos de corriente transversal (es decir, la salida del bloque 52 de la función de limitación) es la entrada de un controlador 58 de corriente. El controlador 58 de corriente para el puente 14 de red incluye dos reguladores, operando uno en el eje longitudinal y operando otro en el eje transversal. En total, el controlador 58 de corriente opera en una trama síncrona de referencia alineada con la tensión transversal VQ_NET de red. La Figura 5 muestra los reguladores globales de corriente longitudinal y transversal del puente 14 de red.

Además de la señal limitada IQ_NET*_LIM de demanda de corriente transversal y de una señal limitada ID_NET*_LIM de demanda de corriente longitudinal (es decir, la salida del bloque 66 de limitación), también se suministra al controlador 58 de corriente una señal IQ_NET de retroalimentación de corriente transversal y una señal ID_NET de retroalimentación de corriente longitudinal, que se derivan de la medición de las corrientes IR, IY e IB de fase del puente de red. La conversión de componentes trifásico en una trama de referencia estacionaria en componentes longitudinales/transversales en una trama de referencia síncrona se logra usando un bloque combinado 70 de la transformada de Clarke/Park. La transformada usa el ángulo θ MAINS de la tensión de la red para la conversión.

El controlador 58 de corriente opera comparando la señal limitada ID_NET*_LIM de demanda de corriente longitudinal con la señal ID_NET de retroalimentación de corriente longitudinal, y la señal limitada IQ_NET*_LIM de demanda de corriente transversal con la señal de retroalimentación de corriente transversal IQ_NET y aplicando los errores resultantes a controladores PI independientes. Las salidas de los controladores PI se suman entonces con señales de acoplamiento cruzado derivadas del producto de las demandas de corriente y de valores de impedancia del circuito del lado de la red para producir una tensión total de salida para los ejes longitudinal y transversal, VD_NET* y VQ_NET*, respectivamente. Los términos del acoplamiento cruzado son mostrados en la Figura 5 y emulan las ecuaciones estándar de tensión para todo el circuito de la red en el estado estacionario. Con referencia a los términos del acoplamiento cruzado, LN es la inductancia del filtro de red y WN es la frecuencia de la forma de onda de tensión de la red.

Las salidas finales de tensión del controlador 58 de corriente, VD_NET* and VQ_NET*, son convertidas de coordenadas cartesianas a polares usando un conversor 64 de coordenadas. La magnitud de la tensión total V_NET* se calcula según la ecuación:

$$V_NET^* = \sqrt{(VD_NET^{*2} + VQ_NET^{*2})}$$

y es suministrada al controlador 62 de señales de órdenes de accionamiento de puerta. El ángulo entre la magnitud de la tensión total V_NET* y la tensión transversal VQ_NET* es θ_NET y se calcula a partir del arco tangente de VD_NET*/VQ_NET* como sigue:

$$\theta_NET = \arctan\left(\frac{VD_NET^*}{VQ_NET^*}\right)$$

El ángulo θ_NET entre la magnitud de la tensión total V_NET* y la tensión transversal VQ_NET* es sumado al ángulo θ_MAINS de la tensión de la red para determinar el ángulo en el que la tensión total ha de imprimirse por el puente 14 de red en el circuito total del lado de la red.

Las señales individuales de órdenes de accionamiento de puerta superior (U) e inferior (L) para las tres fases R, Y y B resultantes en las señales individuales RU, RL, YU, YL, BU y BL del puente 14 de red se calculan en el generador 60 de modulación de la anchura de los impulsos usando la magnitud de la tensión total V_NET*, la suma de los ángulos θ_NET y θ_MAINS y la frecuencia de la modulación de la anchura de los impulsos. La señal VDC_FB de retroalimentación de tensión del enlace de cc también es tenida en cuenta en estos cálculos de PWM. La señal VDC_FB de retroalimentación de tensión del enlace de cc puede ser derivada de forma independiente cuando se usan controladores independientes para puente 14 de red y el puente 10 del generador, respectivamente. Esto resulta particularmente necesario cuando el puente 10 del generador y el puente 14 de red están físicamente separados entre sí y existe una inductancia significativa entre la capacitancia del enlace de cc de cada puente. En situaciones en las que se proporciona una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc derivada independientemente para cada puente, se apreciará fácilmente que debería efectuarse la siguiente sustitución:

Para el puente 14 de red: VDC_FB = VDC_FB_NET
 Para el puente 10 del generador: VDC_FB = VDC_FB_GEN

En situaciones en las que ocurre una caída de tensión de la red, el bloque 66 de limitación calcula la respectiva asignación de corriente disponible desde el puente 14 de red, basada en sus límites térmicos, con respecto a los ejes transversal y longitudinal y también calcula la corriente máxima IDC_LIM del enlace de cc del generador. La señal IDC_LIM, suministrada desde el controlador 46 del puente de red al controlador 18 del puente del generador, es usada para establecer rápidamente el nivel de corriente que puede ser proporcionada por el puente 10 del generador al enlace intermedio 12 de cc.

Existen requisitos diferentes dentro de los diversos códigos de red que dan prioridad a la salida de corriente activa o reactiva y los porcentajes de corriente reactiva requerida en función de la magnitud de la caída. En otras palabras, el comportamiento del convertidor de potencia depende de cómo está parametrizado para la operación en diferentes países o regiones.

En conjunto, la operación del convertidor de potencia es fundamentalmente diferente de la operación de los convertidores convencionales de potencia descrita en lo que antecede, porque mantiene el control del enlace 12 de cc durante las caídas de tensión de la red controlando directamente el flujo de potencia procedente del generador 4. Manteniendo el control de la tensión del enlace de cc durante una caída de la tensión de la red, es posible mantener la salida requerida de corriente reactiva procedente del puente 14 de red para satisfacer los requisitos de soporte de tensión de la red eléctrica.

Durante una caída de tensión de la red, el controlador de tensión del enlace de cc del puente de red (una combinación del controlador PI 50 y el nodo sumador precedente) se convierte en el maestro del sistema convertidor

de potencia y asigna señales tanto del límite de potencia como de la corriente del enlace de cc tanto al puente 14 de red como al puente 10 del generador, respectivamente, con base en la magnitud de la caída de tensión de la red.

La exportación de potencia desde el enlace 12 de cc es determinada por referenciación de la potencia aplicada al puente 14 de red. A medida que se exporte más potencia desde el enlace 12 de cc (para descargarlo), el puente 10 del generador reaccionará entonces a esto tomando más potencia del generador 4 para rellenar el enlace de cc. Esto contrasta vivamente con los convertidores de potencia convencionales de cuatro cuadrantes, en los que se carga la potencia en el enlace de cc para aumentar la tensión del enlace de cc como consecuencia de la demanda de par aplicada al puente del generador. La exportación de potencia a la red es determinada entonces por la acción del controlador del puente de red cuando la tensión del enlace de cc supera la demanda de tensión del puente de red.

Operación del convertidor de potencia

Una posible implementación operativa de la anterior topología del convertido de potencia es como sigue. En el arranque, la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc se fija en 1050 voltios. Se habilitan los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del puente 14 de red y, bajo del control del controlador 46 del puente de red, se lleva la tensión del enlace de cc hasta los 1050 voltios. Esto requerirá casi siempre una importación de potencia desde la red de suministro al enlace 12 de cc, de modo que la señal IQ_NET* de salida de demanda de corriente transversal dé como resultado que el flujo de potencia entre en el enlace de cc en esta condición de arranque.

A la vez, la señal VDC_GEN* de demanda de tensión del enlace de cc aplicada al controlador 18 de potencia del puente del generador es fijada en 1100 voltios.

Suponiendo que el viento esté soplando y que la turbina eólica 2 esté girando, cuando el puente 10 del generador esté habilitado controlará la corriente longitudinal ID_GEN para lograr que entre el necesario flujo magnético en el generador 4 para las condiciones imperantes de velocidad, y la corriente transversal IQ_GEN será regulada bajo del control del puente 10 del generador para lograr el objetivo de una tensión del enlace de cc de 1100 voltios.

A medida que la tensión del enlace de cc aumente para lograr el objetivo de 1100 voltios, superará la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente 14 de red. En consecuencia, la señal de error derivada por el controlador 46 del puente de red cuando se resta la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc de la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión actuará de tal manera que se transfiera potencia desde el enlace 12 de cc a la red de suministro, estando limitada la magnitud de esta transferencia de potencia (el bloque 52 de la función de limitación) por una señal derivada de la señal P* de demanda de exportación de potencia. Se filtra la señal N del sensor de velocidad para proporcionar una primera señal filtrada N' de la velocidad y una segunda señal filtrada N'2 de la velocidad. La ganancia KD de atenuación aplicada a la segunda señal filtrada N'2 de la velocidad proporciona atenuación de la resonancia del eje en la transmisión de la turbina. Se usa la primera señal filtrada N' de la velocidad como puntero a una tabla precalculada 56 de consulta de P* en función de N'. La señal P* de demanda de la exportación de potencia derivada de la tabla 56 de consulta es aplicada al controlador 46 del puente 14 de red. La señal aplicada P* de demanda de exportación de potencia es dividida por la tensión transversal imperante VQ_NET de red para obtener una señal límite a aplicar a la señal IQ_NET* de salida de demanda de corriente transversal derivada de la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente 14 de red.

En el caso de una caída de la tensión de la red, la asignación de una potencia nominal de salida (VA) a los ejes activo y reactivo del controlador 46 del puente de red será determinada en línea con los requisitos del código de red específico para el que está parametrizada la turbina eólica. Se calcula el límite aparente de potencia a partir de la tensión imperante V_NET según es medida por los circuitos de retroalimentación de tensión de la red y el valor nominal de corriente de sobrecarga I_OVERLOAD. Más en particular:

$$\text{Límite aparente de la potencia} = \sqrt{3}(V_NET \times I_OVERLOAD)$$

En la Figura 4, RÉGIMEN DE ACCIONAMIENTO es equivalente a I_OVERLOAD en la ecuación anterior.

El convertidor de potencia opera de forma dinámica para dar cabida a cambios en la velocidad del viento. Por ejemplo, para una velocidad creciente del viento, también aumentará la velocidad de giro de la turbina eólica 2, proporcionando con ello una creciente señal P* de demanda de exportación de potencia al controlador 46 del puente de red. El controlador 46 del puente de red hace que el puente 14 de red exporte más potencia desde el enlace 12 de cc a la red de suministro. Aumentar la cantidad de potencia que se exporta a la red de suministro lleva a una caída en la tensión del enlace de cc. El controlador 18 del puente del generador responde a esta caída en la tensión del enlace de cc mediante la acción del controlador 76 de tensión del enlace de cc (que comprende el controlador PI 20 y el nodo sumador precedente) para hacer que el puente 10 del generador extraiga más potencia del generador 4 para proporcionar más corriente al enlace 12 de cc hasta que se logre un nuevo estado estacionario (es decir, en el que la cantidad de potencia que se suministra a la red de suministro desde el puente 14 de red sea igual a la

cantidad de potencia que se suministra al puente 10 del generador desde el generador 4). En este estado estacionario, la tensión del enlace de cc ha coincidido con la señal VDC_GEN* de demanda de tensión del enlace de cc. Para una reducción en la velocidad del viento tienen lugar las acciones de control opuestas.

5 Durante las mismas condiciones de una velocidad creciente del viento, el convertidor de potencia descrito en la patente estadounidense 5083039 modifica una señal de demanda de par al controlador del puente del generador para provocar un par creciente del generador y, por ende, un flujo creciente de potencia procedente del generador a través del puente del generador hacia el enlace de cc. Esto causa un aumento en la tensión del enlace de cc. El controlador del puente de red responde entonces al aumento en la tensión del enlace de cc mediante la acción de su controlador de tensión del enlace de cc para aumentar la cantidad de potencia que se exporta a la red de suministro y, por ende, volver a reducir la tensión del enlace de cc a su valor de referencia.

10 Por lo tanto, la patente estadounidense 5083039 describe una situación en la que se “empuja” a través del convertidor de potencia mayor flujo de potencia desde el generador al enlace de cc en respuesta a un aumento en la velocidad del viento, y la respuesta secundaria es exportar potencia desde el enlace de cc a la red de suministro a través del puente de red. Sin embargo, el convertidor de potencia de la presente invención opera de manera contraria, de forma que, en respuesta a un aumento en la velocidad del viento, más potencia es “traccionada” del enlace 12 de cc por el puente 14 de red, y la respuesta secundaria es importar potencia al enlace de cc desde el generador 4 a través del puente 10 del generador para lograr más corriente en el enlace de cc.

Topologías alternativas del convertidor de potencia

20 Las topologías básicas de dos disposiciones diferentes de convertidores de potencia alternativos serán esbozadas con referencia a las Figuras 8 a 14. Los convertidores de potencia alternativos son muy similares al convertidor de potencia de la Figura 1 y a las partes similares se les han dado los mismos números de referencia. El propósito de las topologías de los convertidores de potencia alternativos es eliminar una o hasta tres características del convertidor de potencia de la Figura, concretamente (i) la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente 14 de red y su señal asociada VDC_FB de retroalimentación de tensión y el controlador PI 50, (ii) la señal IDC_LIM que se suministra desde el controlador 46 del puente de red y que se usa para limitar la señal IDC_GEN* de demanda de corriente del enlace de cc durante condiciones de fallo de la red eléctrica, y (iii) la señal POWER_FF de alimentación directa de potencia que es producida por el controlador 26 de corriente.

25 La primera topología del convertidor de potencia alternativo elimina solo las características de la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente 14 de red, su señal asociada VDC_FB de retroalimentación de tensión y el controlador PI 50. También modifica la acción de la señal IDC_LIM sustituyendo esta con una nueva señal IDC_FF de alimentación directa. Sigue activa una señal modificada POWER_FF' de alimentación directa de potencia, pero solo es usada por el controlador 46 del puente de red durante una situación de caída de tensión de la red de suministro. En este caso únicamente, se calcula la señal modificada POWER_FF' de alimentación directa de potencia a partir de la señal estándar POWER_FF de alimentación directa de potencia descrita en otro lugar menos
35 la salida del controlador PI 20 del controlador 76 de tensión del enlace de cc. Esto se muestra en la Figura 9. La señal modificada POWER_FF' de alimentación directa de potencia es usada en el controlador 46 del puente de red junto con una señal (marcada IQ_CAPACITY) relativa a la capacidad IQ del puente 14 de red durante una situación de caída de tensión de la red de suministro, el límite de potencia POWER_LIMIT y una señal relativa a la amplitud de la tensión imperante VQ_NET de la red para calcular una señal limitada IQ_NET*_LIM de demanda de corriente transversal que se usa durante una situación de caída de tensión de la red de suministro. La fuente nominal para la señal IQ_NET*_LIM es ignorada en esta situación.

40 En topologías en las que se elimina la señal VDC_NET* de demanda de tensión del enlace de cc para el puente de red, el puente 14 de red puede ser energizado usando la tensión de la red. La tensión del enlace de cc es determinada por el valor rectificado de la tensión de la red, que es nominalmente $\sqrt{2} \times V_{LL}$ (es decir, la tensión línea a línea en los bornes de ca del puente 14 de red). Esto establece un suministro de potencia de cc del cual pueden derivarse circuitos auxiliares, tales como el o los microprocesadores para el controlador 18 del puente del generador y el controlador 46 del puente de red, y la potencia de accionamiento de puertas para el puente 10 del generador y el puente 14 de red. La tensión del enlace de cc está entonces disponible para el flujo del generador 4 y ponerlo bajo control.

45 Suponiendo que el viento esté soplando y que la turbina eólica 2 esté girando, entonces el generador 4 puede empezar a proporcionar potencia al enlace 12 de cc y lograr una tensión del enlace de cc que sea igual a la señal VDC_GEN* de demanda de tensión del enlace de cc.

50 La topología básica de la primera disposición de convertidor de potencia alternativo será descrita ahora con referencia a las Figuras 8 a 10. En esta disposición, el controlador 76 de tensión del enlace de cc del controlador 18 del puente del generador permanece activo en todas las condiciones operativas. En condiciones de estado estacionario, se minimiza la acción del término integral dentro del controlador PI 20 del controlador 76 de tensión del enlace de cc mediante la inclusión de la señal IDC_FF de alimentación directa procedente del controlador 46 del puente de red. En una situación de caída de tensión de la red de suministros, la señal IDC_FF de alimentación directa proporciona información sobre la cantidad de corriente de cc que ha de ser proporcionada por el puente 14

del generador en respuesta a cambios en la tensión de la red de suministro. La señal IDC_FF es calculada en el bloque 90 de función. Incluyendo estas características, se minimiza la variación en la tensión del enlace de cc durante una situación de caída de tensión de la red de suministros. Además, se minimiza la acción requerida por el término integral dentro del controlador PI 20 del controlador 76 de tensión del enlace de cc y, por lo tanto, se requieren desviaciones mucho menores en la tensión real del enlace de cc para aumentar o disminuir el valor integral hasta el valor correcto para lograr una operación de estado estacionario.

La topología básica de la segunda disposición de convertidor de potencia alternativo será descrita ahora con referencia a las Figuras 11 a 14. En esta disposición, se elimina la tensión del enlace de cc del controlador 46 del puente de red de la misma manera que se ha descrito en lo que antecede.

Una primera opción para el enlace de cc control para el puente 10 del generador de la segunda disposición del controlador de potencia alternativo será descrita ahora con referencia a las Figuras 11 y 12. El propósito de la señal IDC_LIM en el convertidor de potencia de la Figura 1 es pasar información crítica sobre las condiciones imperantes de la tensión de la red y los niveles de caudal de potencia al controlador 18 del puente del generador. Esto resulta particularmente importante durante una situación de caída de tensión de la red de suministro cuando la capacidad de caudal de potencia está seriamente limitada. En el convertidor de potencia alternativo, la señal IDC_LIM es sustituida por una señal inferida IDC_NET' que es usada únicamente por el controlador 18 del puente del generador.

La señal inferida IDC_NET' es calculada a partir de información que está disponible para el controlador 18 del puente del generador mediante la ecuación siguiente:

$$IDC_NET' = \left(\frac{POWER_FF}{VDC_FB} \right) - I_CAP$$

En el segundo convertidor de potencia alternativo, la señal POWER_FF de potencia del generador se deriva del controlador 26 de corriente del controlador 18 del puente del generador, según se ilustra en la Figura 3, usando la ecuación:

$$POWER_FF = \sqrt{3} (VQ_GEN * IQ_GEN + VD_GEN * ID_GEN)$$

Sin embargo, la señal POWER_FF de potencia del generador no es suministrada al controlador 46 del puente de red, sino que es usada únicamente por el controlador 18 del puente del generador en la derivación de la señal inferida IDC_NET'. (POWER_FF tiene la misma derivación aquí que POWER_FF en la primera disposición mostrada en la Figura 2. En esta memoria, se mantiene igual la marca POWER_FF por coherencia; sin embargo, en este caso, la señal no es una señal literal de alimentación directa de potencia). La señal inferida IDC_NET' es usada para indicar una corriente efectiva de cc que el puente 14 de red exporta a la red de suministro, pero se calcula a partir de las condiciones del puente 10 del generador.

Dividir la señal POWER_FF de potencia del generador por la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión da la corriente efectiva de cc que se suministra al enlace 12 de cc desde el puente 10 del generador.

La medición de la carga (o la descarga) de corriente del condensador volumétrico 82 en el enlace 12 de cc se logra añadiendo un pequeño condensador 78 en paralelo con el condensador volumétrico, midiendo la corriente en el condensador pequeño usando un sensor 80 de corriente y volviendo a modificar la escala de la corriente medida en un factor relacionado con la proporción entre la capacitancia del condensador pequeño y la capacitancia total del enlace 12 de cc. El signo de la señal de corriente I_CAP es positivo cuando el condensador volumétrico 82 se está cargando y negativo cuando se está descargando. Dado que la corriente que fluye en el condensador volumétrico 82 es una forma de onda conmutada, es necesario integrar la corriente en un periodo completo de modulación de la anchura de los impulsos (PWM).

La señal inferida IDC_NET' es sumada a la salida del controlador 76 de tensión del enlace de cc en el nodo sumador mostrado en la Figura 12.

Cuando ocurre una situación de caída de tensión de la red de suministro, en el primer caso el puente 10 del generador no está al tanto de que el puente 14 de red ya no puede exportar potencia a la red de suministro a la tasa previa. El excedente de corriente entre la importada del generador 4 y la exportada a la red de suministro carga el condensador volumétrico 82 y es visto como una señal de aumento sobre la corriente de carga del condensador volumétrico derivada de la señal de corriente I_CAP. Entonces se recalcula la señal IDC_NET' y se modifica la señal que se suma a la salida del controlador 76 de tensión del enlace de cc, modificándose por ello la potencia real que se importa desde el generador 4 durante la situación de caída de tensión de la red de suministro.

En situaciones en las que las capacitancias volumétricas del enlace de cc del puente 10 del generador y del puente 14 de red están separadas por una distancia significativa, puede haber una inductancia entre puentes que provoque una resonancia entre los dos condensadores volumétricos desacoplados. En este caso, el condensador pequeño 78

puede ser sustituido por una red de dos condensadores y un inductor que sean seleccionados para lograr la misma frecuencia resonante que la combinación de la capacitancia de los condensadores volumétricos desacoplados y la inductancia entre puentes. La corriente es medida entonces como la corriente que fluye en ambos condensadores pequeños, para que se anule cualquier resonancia entre los mismos por el procedimiento de medición.

5 El control de potencia para el puente 14 de red será descrito ahora con mayor detalle con referencia a la Figura 13.

10 IQ_CAPACITY es una señal que se relaciona con los parámetros del régimen de accionamiento y la tensión imperante VQ_NET de la red. Se apreciará que el puente 10 del generador y el controlador 18 del puente del generador tienen conjuntamente un tiempo finito de respuesta a los cambios en las condiciones operativas. Para dar cuenta de esto dentro del controlador 46 del puente de red, la señal IQ_CAPACITY es la rapidez limitada de respuesta para producir una señal limitada IQ_NET*_LIM de demanda de corriente transversal que se aplica únicamente durante una situación de caída de tensión de la red de suministro. El límite de la rapidez de respuesta se regula de tal manera que la demanda limitada de corriente transversal IQ_NET*_LIM se reduzca a la misma velocidad que se reduce la potencia en el puente 10 del generador. El límite de la rapidez de respuesta está regulado correctamente cuando se minimiza la alteración de la tensión del enlace de cc que ocurre durante una situación de caída de tensión de la red de suministro.

15 El conmutador 84 toma la salida de una función de limitación de la velocidad de respuesta cuando DIP_DETECT = 1 (es decir, cuando el bloque 86 de limitación determina que existe una situación de caída de tensión de la red de suministro con referencia a condiciones específicas de tensión de la red y a la parametrización del controlador 46 del puente de red). Si no, en situaciones operativas normales, cuando DIP_DETECT = 0, entonces la señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal se deriva de la tensión imperante VQ_NET de la red, y el límite final de potencia POWER_LIMIT, determinado por los parámetros de accionamiento, tal como se muestra en la Figura 12. La señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal está limitada por una función de fijación determinada por la señal P* de demanda de exportación de potencia y la tensión imperante VQ_NET de la red. Cuando DIP_DETECT = 0, se aplica la salida de la función de fijación al controlador 58 de corriente como señal IQ NET*_LIM de demanda de corriente transversal.

20 El bloque 86 de limitación proporciona una señal limitada ID_NET*_LIM de demanda de corriente longitudinal al controlador 58 de corriente en una situación de caída de tensión de la red de suministro. En situaciones operativas normales, la señal ID_NET* de demanda de corriente longitudinal es suministrada directamente al controlador 58 de corriente como señal limitada ID_NET*_LIM de demanda de corriente longitudinal.

30 Se describirá ahora, con referencia a las Figuras 11 y 14, una segunda opción para el enlace de cc control para el puente 10 del generador de la segunda disposición del controlador de potencia alternativo.

35 Si el convertidor de potencia está operando, por ejemplo, a plena capacidad, entonces la integral del controlador PI 20 del controlador 76 de tensión del enlace de cc tendrá un valor significativo. En ausencia de cualquier otra característica de control, en el caso de una caída de la tensión de suministro de la red, tendría que ocurrir un error en la tensión del enlace de cc para descargar o reponer el valor integral. Tal error en la tensión del enlace de cc sería un valor transitorio de tensión positiva, con riesgo de que ocurriese una desconexión por voltaje excesivo del enlace de cc debido a limitaciones finitas de tensión del soporte físico.

40 Durante una situación de caída de tensión de la red de suministro, la tasa de cambio de la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión, indicativa de la tensión del enlace de cc (según está representada por $dVDC_FB/dt$), es significativamente mayor de la que se experimentaría durante la operación normal del convertidor de potencia. Si $dVDC_FB/dt$ es mayor que un umbral, puede deducirse que algo ha afectado a la capacidad del puente 14 de red de exportar potencia y probablemente sea que se ha reducido la tensión de la red.

45 La segunda opción para el enlace de cc control mostrado en la Figura 14 se basa en la determinación de que si la señal VDC_FB de retroalimentación de tensión es mayor que un primer umbral (VDC_FB_THRESHOLD) y $dVDC_FB/dt$ es mayor que un segundo umbral ($dVDC_FB/dt_THRESHOLD$), entonces el valor integral en el controlador PI 20 es multiplicado por un valor menor que 1, determinándose el valor mediante parametrización del controlador 18 del puente del generador.

50 Si estos requisitos de umbral siguen superándose, entonces se aplicará la misma acción del enlace de cc control en barridos consecutivos de PWM (es decir, representando un solo barrido de PWM una iteración del programa de control), de tal modo que el valor integral en el controlador PI 20 se reduzca de forma secuencial.

Los dos parámetros de umbral se basan en el conocimiento de las características de la turbina eólica, en el máximo previsto de $dVDC_FB/dt$ durante la operación normal y el valor previsto de $dVDC_FB/dt$ en el caso de un fallo de la red eléctrica. El máximo previsto de $dVDC_FB/dt$ durante la operación normal puede calcularse con conocimiento de la capacitancia del enlace de cc y los parámetros de accionamiento.

55

Operación del convertidor de potencia alternativo

Una posible implementación operativa de la topología del convertidor de potencia alternativo mostrado en las Figuras 11 a 14 es como sigue. En el arranque, se establece la tensión del enlace de cc por medio de circuitos adecuados de precarga (no mostrados) desde el transformador 6 mostrado en la Figura 11. En este punto, los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del puente 14 de red siguen inhabilitados.

La señal VDC_GEN* de demanda de tensión del enlace de cc aplicada al controlador 18 de potencia del puente del generador es fijada en 1100 voltios.

Suponiendo que el viento esté soplando y que la turbina eólica 2 esté girando, cuando el puente 10 del generador esté habilitado controlará la corriente longitudinal ID_GEN para lograr que entre el necesario flujo magnético en el generador 4 para las condiciones imperantes de velocidad, y la corriente transversal IQ_GEN será regulada bajo del control del puente 10 del generador para lograr el objetivo de una tensión del enlace de cc de 1100 voltios.

La señal P* de demanda de exportación de potencia es puesta a cero y la salida del controlador 88 de la tensión de red de la turbina (y, más en particular, el controlador PI 44) es fijada en cero. En este punto, los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia en el puente 14 de red están habilitados.

En el modo normal de operación, en el que la tensión de la red de suministro vista en los bornes de ca del puente 14 de red está dentro de los límites normales, se implementa la siguiente acción de control. Se filtra la señal N del sensor de velocidad para proporcionar una primera señal filtrada N' de la velocidad y una segunda señal filtrada N'2 de la velocidad. La ganancia KD de atenuación aplicada a la segunda señal filtrada N'2 de la velocidad proporciona atenuación de la resonancia del eje en la transmisión de la turbina. Se usa la primera señal filtrada N' de la velocidad como puntero a una tabla precalculada 56 de consulta de P* en función de N'. La señal P* de demanda de la exportación de potencia derivada de la tabla 56 de consulta es aplicada al controlador 46 del puente 14 de red. La señal aplicada P* de demanda de exportación de potencia es dividida por la tensión transversal imperante VQ_NET de red para obtener una señal límite. Esta señal límite es aplicada por medio de una función de fijación a la señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal para formar la señal IQ_NET*_LIM de demanda de corriente transversal.

En este modo de operación, la señal IQ_NET* de demanda de corriente transversal se fija a un valor mayor que el valor máximo que puede derivarse de la señal P* de demanda de exportación de potencia, para que permanezca activa la función de atenuación descrita en lo que antecede.

En el caso de una caída de tensión de la red de suministro, la asignación de una potencia nominal de salida (VA) a los ejes activo y reactivo del controlador 46 del puente de red será determinada en línea con los requisitos del código de red específico para el que está parametrizada la turbina eólica.

Implicaciones prácticas de la topología del convertidor de potencia

Las disposiciones de la topología del convertidor de potencia pueden ser implementadas como sigue. El puente 10 del generador y el puente 14 de red pueden ser implementados cada uno usando un módulo inversor DELTA MV3000 enfriado por líquido con un régimen de potencia adecuado. Este es un inversor de fuentes de tensión basado en IGBT adecuado para una operación en una red de ca de 690 V con una tensión resultante del enlace de cc of 1100 V. El controlador 18 del puente del generador y el controlador 46 del puente de red pueden ser implementados cada uno usando un controlador DELTA MV3000. Este es un controlador electrónico basado en un microprocesador, cuyo soporte lógico inalterable incorpora la funcionalidad necesaria para implementar los anteriores esquemas de control de la potencia. El microprocesador opera en una base de tiempo fija, a veces denominada "tiempo de barrido", relacionada con la frecuencia de la modulación de la anchura de los impulsos (PWM) del controlador. Todos estos productos son suministrados por Convertteam Ltd, de Boughton Road, Rugby, Warwickshire, CV21 1BU, Reino Unido.

Posibles modificaciones de la topología del convertidor de potencia

Los convertidores de potencia propuestos descritos en lo que antecede pueden ser dispuestos de forma similar si el generador 4 de inducción es sustituido por un generador síncrono de imanes permanentes o de devanados de campo. En situaciones en las que se emplea un generador síncrono de devanados de campo, la entrada adicional de excitación del campo al generador será usada, típicamente, para proporcionar el flujo principal, poniéndose a cero la señal de demanda de corriente longitudinal del estátor. Para situaciones de dinámica elevada y/o de debilitamiento del campo, la señal de demanda de corriente longitudinal del estátor puede ser fijada en valores distintos de cero para regular más rápidamente el flujo en el generador. Típicamente, el generador será una máquina trifásica, pero pueden emplearse otros números de fase. El convertidor de potencia también puede ser dispuesto para operar con inversores de nivel múltiple en vez de la disposición del inversos de dos niveles descrito en lo que antecede.

5 La disposición de controladores descrita en lo que antecede propone dos controladores independientes que son coordinados por medio de señales de control que se envían desde el controlador 18 del puente del generador al controlador 46 del puente de red y viceversa. Sería igualmente adecuado integrar la funcionalidad de los controladores en un solo controlador físico. De forma similar, la funcionalidad podría extenderse a más de dos controladores si esto es conveniente para la implementación práctica del convertidor de potencia.

REIVINDICACIONES

1. Un convertidor de potencia que puede ser usado para conectar un generador (4) que proporciona una tensión variable con una frecuencia variable a una red de suministro (RED) que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija, comprendiendo el convertidor de potencia:
 - 5 un primer rectificador/inversor activo (10) conectable eléctricamente al estátor del generador (4) y que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 - un segundo rectificador/inversor activo (14) que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 - 10 un enlace (12) de cc conectado entre el primer rectificador/inversor activo (10) y el segundo rectificador/inversor activo (14);
 - un filtro (16) conectado entre el segundo rectificador/inversor activo (14) y la red de suministro (RED), incluyendo el filtro (16) bornes de red;
 - un primer controlador (18) para el primer rectificador/inversor activo (10); y
 - 15 un segundo controlador (46) para el segundo rectificador/inversor activo (14);
 - en el que el primer controlador (18) está configurado para usar una señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para lograr el nivel deseado de tensión del enlace de cc que corresponda a la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*); y
 - 20 en el que el segundo controlador (46) está configurado para usar una señal de demanda de potencia (P*) indicativa del nivel de potencia que debe ser transmitida desde el enlace (12) de cc a la red de suministro (RED) a través del segundo rectificador/inversor activo (14), y una señal de demanda de tensión (VTURB*) indicativa de la tensión que debe lograrse en los bornes de red del filtro (16) para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para lograr los niveles deseados de potencia y tensión que corresponden a las señales de demanda de potencia y tensión (P* y VTURB*).
2. Un convertidor de potencia según la reivindicación 1 en el que el primer controlador (18) está configurado, además, para usar una señal de demanda de flujo (Φ^*) indicativa de un nivel deseado del flujo que debe lograrse en el generador (4), convierte la señal de demanda de flujo (Φ^*) en una señal de demanda de corriente longitudinal (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10), y está configurado, además, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente longitudinal deseada para el primer rectificador/inversor activo (10).
3. Un convertidor de potencia según la reivindicación 2 en el que el primer controlador (18) está configurado, además, para convertir la señal de demanda de flujo (Φ^*) en la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_GEN*) con referencia a una o más características (32) del generador.
4. Un convertidor de potencia según cualquier reivindicación precedente en el que el primer controlador (18) está configurado, además, para comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10) y está configurado, además, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente transversal deseada para el primer rectificador/inversor activo (10).
5. Un convertidor de potencia según la reivindicación 4 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para suministrar una señal de control (IDC_LIM) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro al primer controlador (18), y en el que el primer controlador (18) está configurado, además, para comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*), limita la señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*) usando la señal de control (IDC_LIM) procedente del segundo controlador (46) para determinar una señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*_LIM) y está configurado, además, para usar la señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*_LIM) para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 55 6. Un convertidor de potencia según la reivindicación 4 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para suministrar una señal de control (IDC_FF) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro y/o la señal de demanda de potencia (P*) al primer controlador (18), y en el que un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) está configurado, además, para comparar la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada

del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para proporcionar una señal de salida que se suma a la señal de control (IDC_FF) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*) que se usa para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).

- 5 **7.** Un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para convertir la señal de demanda de potencia (P*), indicativa del nivel de potencia que ha de transferirse desde el enlace (12) de cc a la red de suministro (RED) a través del segundo rectificador/inversor activo (14), en una señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14), y está configurado, además, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente transversal deseada para el segundo rectificador/inversor activo (14).
- 10
- 15 **8.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 7 en el que la señal de demanda de potencia (P*) es convertida en la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) dividiendo la señal de demanda de potencia (P*) por una señal (VQ_NET) que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro (16).
- 20 **9.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 7 señal de demanda de potencia (P*) es convertida en la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) dividiendo la señal de demanda de potencia (P*) por una versión filtrada de la señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro (16).
- 25 **10.** Un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para usar una señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_NET*) indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, está configurado, además, para comparar la señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_NET*) con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) y está configurado, además, para limitar la señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) a un valor determinado por una señal limitante (52) que se deriva de la señal de demanda de potencia (P*) para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14).
- 30 **11.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 10 en el que la señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) se suma a una señal de alimentación directa de corriente transversal (IQ_FF) que se deriva de: (i) una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF), (ii) una señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) y (iii) una señal de ganancia (PFF_GAIN) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 35 **12.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 11 en el que la señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) es suministrada al segundo controlador (46) desde el primer controlador (18).
- 40 **13.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 11 en el que la señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) menos la salida de un controlador PI (20) de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) es suministrada al segundo controlador (46) y es usada por el segundo controlador (46) solo durante una situación de caída de tensión de la red de suministro.
- 45 **14.** Un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para modificar la señal limitante que se deriva de la señal de demanda de potencia (P*) según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 50 **15.** Un convertidor de potencia según cualquier reivindicación precedente en el que el enlace (12) de cc incluye un condensador (82) y el convertidor de potencia comprende además un sensor (80) de corriente para medir la corriente que fluye en el condensador (82) y proporcionar una señal de salida.
- 55 **16.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 15 en el que la señal de salida del sensor (80) de corriente se resta de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) para proporcionar una señal (IDC_NET*) que se suma a la salida de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 60 **17.** Un convertidor de potencia según la reivindicación 15 en el que la señal de salida del sensor (80) de corriente se resta de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) para proporcionar una señal (IDC_NET*) que se filtra y se suma a la salida de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).

- 5 18. Un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14 que, además, comprende un sensor de tensión para medir la tensión del enlace de cc y proporcionar una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) y medios para medir la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB), en el que el valor integral de un controlador PI (20) de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) es modificado en un factor predeterminado cuando la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) es mayor que un primer umbral (VDC_FB_THRESHOLD) y la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) es mayor que un segundo umbral (dVDC_FB/dt_THRESHOLD).
- 10 19. Un convertidor de potencia según cualquier reivindicación precedente en el que, durante una situación de caída de tensión de la red de suministro, se deriva una señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14) a partir de una versión limitada de la rapidez de respuesta de una señal (IQ_CAPACITY) derivada del límite de potencia nominal del segundo rectificador/inversor activo (14), que se modifica en función de las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 15 20. Un convertidor de potencia según cualquier reivindicación precedente en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para comparar la señal de demanda de tensión (VTURB*), indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16), con una señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) para determinar una señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*) para el segundo rectificador/inversor activo (14), y está configurado, además, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente longitudinal deseada para el segundo rectificador/inversor activo (14).
- 20 21. Un convertidor de potencia según la reivindicación 20 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para modificar la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*) según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 25 22. Un convertidor de potencia según las reivindicaciones 20 o 21 en el que el segundo controlador (46) está configurado, además, para modificar una señal de error que surge de la diferencia entre la señal de demanda de tensión (VTURB*), indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16), y la señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) según una señal derivada de la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*).
- 30 23. Un convertidor de potencia según cualquier reivindicación precedente que, además, comprende un sensor (54) de velocidad u observador de la velocidad para derivar una señal de velocidad (N) indicativa de la velocidad de la parte móvil del generador (4) y en el que la señal de velocidad (N) se usa para derivar la señal de demanda de potencia (P*).
- 35 24. Un convertidor de potencia según la reivindicación 23 en el que la señal de demanda de potencia (P*) se deriva de una tabla (56) de consulta o de una función matemática y la señal de velocidad (N) forma un puntero a la tabla (56) de consulta o un valor para el que se calcula la función matemática.
25. Un convertidor de potencia según la reivindicación 23 en el que la señal de velocidad (N) es modificada por una función de filtro.
- 40 26. Un convertidor de potencia según la reivindicación 25 en el que la señal de demanda de potencia (P*) se deriva de una tabla (56) de consulta o de una función matemática y la señal modificada de velocidad (N') forma un puntero a la tabla (56) de consulta o un valor para el que se calcula la función matemática.
27. Un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 23 a 26 en el que la señal de demanda de potencia (P*) es sumada con una señal derivada de una versión filtrada de la señal de velocidad (N).
- 45 28. Una disposición que comprende una pluralidad de convertidores (1a a 1d) de potencia según cualquier reivindicación precedente conectables entre sí en paralelo a una red de suministro (RED) que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija por medio de una conexión paralela (72), en la que la señal de demanda de tensión (VTURB*), indicativa de la tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16) de cada convertidor de potencia, se deriva de una comparación de una señal superior de demanda de tensión (REFERENCIA DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) y una señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) que se mide en el punto en el que la conexión paralela (72) se conecta a la red de suministro (RED).
- 50 29. Una disposición según la reivindicación 28 en la que cada convertidor individual (1a a 1d) de potencia incluye un transformador elevador (6a a 6d) conectado eléctricamente entre el filtro asociado (16a a 16d) y la conexión paralela (72).

30. Una disposición según las reivindicaciones 28 o 29 que, además, comprende un transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
- 5 31. Una disposición según la reivindicación 30 en la que la señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN B DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) es medida en el lado de la red de suministro del transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
- 10 32. Una disposición según la reivindicación 30 en la que la señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN A DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) es medida en el lado de la conexión paralela del transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
33. Una turbina eólica que comprende:
 un generador (4) que tiene un estátor y un rotor;
 un conjunto (2) de turbina que incluye al menos una pala para hacer girar el rotor del generador (4); y
 un convertidor de potencia según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 27.
- 15 34. Una granja eólica que comprende:
 una red de suministro (RED) que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija; y
 una pluralidad de turbinas eólicas según la reivindicación 33;
 en la que los respectivos convertidores (1a a 1d) de potencia de la pluralidad de turbinas eólicas están
 20 conectados entre sí en paralelo a la red de suministro (RED) por medio de una conexión paralela (72), y en la que la señal de demanda de tensión (VTURB*), indicativa de la tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16) de cada convertidor (1a a 1d) de potencia, se deriva de una comparación de una señal superior de demanda de tensión (REFERENCIA DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) y una señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) que se mide en el punto en el que la conexión paralela (72) se conecta a la red de suministro (RED).
- 25 35. Una granja eólica según la reivindicación 34 en la que cada convertidor individual (1a a 1d) de potencia incluye un transformador elevador (6a a 6d) conectado eléctricamente entre el filtro asociado (16a a 16d) y la conexión paralela (72).
36. Una granja eólica según las reivindicaciones 34 o 35 que, además, comprende un transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
- 30 37. Una granja eólica según la reivindicación 36 en la que la señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN B DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) es medida en el lado de la red de suministro del transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
- 35 38. Una granja eólica según la reivindicación 36 en la que la señal superior de retroalimentación de tensión (RETROALIMENTACIÓN A DE TENSIÓN DE LA GRANJA EÓLICA) es medida en el lado de la conexión paralela del transformador elevador (74) conectado eléctricamente entre la conexión paralela (72) y la red de suministro (RED).
- 40 39. Un procedimiento de operación de un convertidor de potencia que puede ser usado para conectar un generador (4) que proporciona una tensión variable con una frecuencia variable a una red de suministro (RED) que opera a una tensión nominal fija y a una frecuencia nominal fija, comprendiendo el convertidor de potencia:
 un primer rectificador/inversor activo (10) conectable eléctricamente al estátor del generador (4) y que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 un segundo rectificador/inversor activo (14) que incluye una pluralidad de dispositivos semiconductores de conmutación de potencia;
 45 un enlace (12) de cc conectado entre el primer rectificador/inversor activo (10) y el segundo rectificador/inversor activo (14);
 un filtro (16) conectado entre el segundo rectificador/inversor activo (14) y la red de suministro (RED), incluyendo el filtro (16) bornes de red;
 un primer controlador (18) para el primer rectificador/inversor activo (10); y
 50 un segundo controlador (46) para el segundo rectificador/inversor activo (14);
 comprendiendo el procedimiento las etapas de que:
 el primer controlador (18) use una señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para lograr el nivel deseado de

- tensión del enlace de cc que corresponda a la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*); y
 el segundo controlador (46) use una señal de demanda de potencia (P*) indicativa del nivel de potencia que debe ser transferida desde el enlace (12) de cc a la red de suministro (RED) a través del segundo rectificador/inversor activo (14), y una señal de demanda de tensión (VTURB*) indicativa de la tensión que debe lograrse en los bornes de red del filtro (16) para controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para lograr los niveles deseados de potencia y tensión que corresponden a las señales de demanda de potencia y tensión (P* y VTURB*).
- 5
- 10 **40.** Un procedimiento según la reivindicación 39 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) use una medida de la tensión de la red de suministro (VQ_NET) para determinar límites a la potencia que puede ser exportada desde el segundo rectificador/inversor activo (14) cuando la tensión de la red de suministro se desvíe de su condición nominal.
- 15 **41.** Un procedimiento según las reivindicaciones 39 o 40 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) use una medida de la tensión de la red de suministro (VQ_NET) para determinar el nivel de corriente que ha de proporcionarse desde el segundo rectificador/inversor activo (14) para proporcionar soporte de tensión a la red de suministro cuando la tensión de la red de suministro se desvíe de su condición nominal.
- 20 **42.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 41 que, además, comprende la etapa de que el primer controlador (18) use una señal de demanda de flujo (Φ^*) indicativa de un nivel deseado de flujo que ha de lograrse en el generador (4), convierta la señal de demanda de flujo (Φ^*) en una señal de demanda de corriente longitudinal (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10) y controle los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente longitudinal deseada para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 25 **43.** Un procedimiento según la reivindicación 42 en el que la etapa de conversión de la señal de demanda de flujo (Φ^*) en la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_GEN*) se lleva a cabo con referencia a una o más características (21) del generador.
- 30 **44.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 43 que, además, comprende la etapa de que el primer controlador (18) compare la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10) y controle los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del primer rectificador/inversor activo (10) para producir cantidades eléctricas de estátor que logren la corriente transversal deseada para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 35 **45.** Un procedimiento según la reivindicación 44 que, además, comprende las etapas de que:
 el segundo controlador (46) suministre al primer controlador (10) una señal de control (IDC_LIM) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro durante una situación de caída de tensión de la red de suministro; y
 el primer controlador (10) compare la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VD_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*), limite la señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*) usando la señal de control (IDC_LIM) procedente del segundo controlador (46) para determinar una señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*_LIM) y use la señal limitada de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*_LIM) para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10) para que no se extraiga potencia alguna de la red de suministro durante la situación de caída de tensión de la red de suministro.
- 40 **46.** Un procedimiento según la reivindicación 44 que, además, comprende las etapas de que el segundo controlador (46) suministre una señal de control (IDC_FF) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro y/o la señal de demanda de potencia al primer controlador (18) y de que un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) compare la señal de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_GEN*), indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para proporcionar una señal de salida que se suma a la señal de control (IDC_FF) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (IDC_GEN*) que se usa para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 45 **47.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 44 a 46 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) convierta la señal de demanda de potencia (P*), indicativa del nivel de potencia que
- 50
- 55

- ha de ser transferida desde el enlace (12) de cc a la red de suministro (RED) a través del segundo rectificador/inversor activo (14), en una señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14) y controle los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente transversal deseada para el segundo rectificador/inversor activo (14).
- 5
48. Un procedimiento según la reivindicación 47 en el que la etapa de conversión de la señal de demanda de potencia (P*) en la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) se lleva a cabo dividiendo la señal de demanda de potencia (P*) por una señal (VQ_ NET) que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro (16).
- 10
49. Un procedimiento según la reivindicación 48 en el que la etapa de conversión de la señal de demanda de potencia (P*) en la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) se lleva a cabo dividiendo la señal de demanda de potencia (P*) por una versión filtrada de la señal que se deriva de la tensión en los bornes de red del filtro (16).
- 15
50. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 47 a 49 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) use una señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_NET*) indicativa de una tensión deseada del enlace de cc, compare la señal adicional de demanda de tensión del enlace de cc (VDC_NET*) con la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) para determinar una señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) y limite la señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) a un valor determinado por una señal limitante (52) que se deriva de la señal de demanda de potencia (P*) para determinar la señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14) durante el arranque y la condición operativa normal del convertidor de potencia.
- 20
51. Un procedimiento según la reivindicación 50 que, además, comprende la etapa de suma de la señal ilimitada de demanda de corriente transversal (VDC_PI_IQ_NET*) a una señal de alimentación directa de corriente transversal (IQ_FF) que se deriva de: (i) una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF), (ii) una señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) y (iii) una señal de ganancia (PFF_GAIN) que varía según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 25
52. Un procedimiento según la reivindicación 51 en el que la señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) es suministrada al segundo controlador (46) desde el primer controlador (18).
- 30
53. Un procedimiento según la reivindicación 51 en el que la señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) menos la salida de un controlador PI (20) de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) es suministrada al segundo controlador (46) y es usada por el segundo controlador (46) durante una situación de caída de tensión de la red de suministro.
- 35
54. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 50 a 53 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) modifique la señal limitante que se deriva de la señal de demanda de potencia (P*) según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro en una situación de caída de tensión de la red de suministro.
- 40
55. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 54 en el que el enlace (12) de cc incluye un condensador (82) y el convertidor de potencia comprende además un sensor (80) de corriente para medir la corriente que fluye en el condensador (82) y proporcionar una señal de salida, comprendiendo además el procedimiento las etapas de restar la señal de salida del sensor (80) de corriente de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) para proporcionar una señal (IDC_NET') que se suma a la salida de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 45
56. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 54 en el que el enlace (12) de cc incluye un condensador (82) y el convertidor de potencia comprende además un sensor (80) de corriente para medir la corriente que fluye en el condensador (82) y proporcionar una señal de salida, comprendiendo además el procedimiento las etapas de restar la señal de salida del sensor (80) de corriente de una señal derivada de una señal indicativa de la potencia del generador (POWER_FF) para proporcionar una señal (IDC_NET') que se filtra y se suma a la salida de un controlador (76) de tensión del enlace de cc del primer controlador (18) para determinar una señal de demanda de corriente del enlace de cc (ID_GEN*) para el primer rectificador/inversor activo (10).
- 50
57. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 54 en el que el convertidor de potencia comprende, además, un sensor de tensión para medir la tensión del enlace de cc y proporcionar una señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) y medios para medir la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB), comprendiendo además el procedimiento las etapas de modificación del valor integral de un controlador PI (20) de un controlador (76) de tensión del enlace
- 55

de cc del primer controlador (18) en un factor predeterminado cuando la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) es mayor que un primer umbral (VDC_FB_THRESHOLD) y la velocidad de cambio de la señal de retroalimentación de tensión del enlace de cc (VDC_FB) es mayor que un segundo umbral (dVDC_FB/dt_THRESHOLD).

- 5 **58.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 57 que, además, comprende la etapa de derivación de una señal de demanda de corriente transversal (IQ_NET*_LIM) para el segundo rectificador/inversor activo (14) a partir de una versión limitada de la rapidez de respuesta de una señal (IQ_CAPACITY) derivada del límite de potencia nominal del segundo rectificador/inversor activo (14), que se modifica en función de las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro en una situación de caída de tensión de la red de suministro.
- 10
- 59.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 58 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) compare la señal de demanda de tensión (VTURB*), indicativa del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16), con una señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) para determinar una señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*) para el segundo rectificador/inversor activo (14) y controlar los dispositivos semiconductores de conmutación de potencia del segundo rectificador/inversor activo (14) para producir cantidades eléctricas de filtro/red de suministro que logren la corriente longitudinal deseada para el segundo rectificador/inversor activo (14).
- 15
- 60.** Un procedimiento según la reivindicación 58 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) modifique la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*) según las condiciones imperantes de tensión de la red de suministro.
- 20
- 61.** Un procedimiento según las reivindicaciones 59 o 60 que, además, comprende la etapa de que el segundo controlador (46) modifique una señal de error que surge de la diferencia entre la señal de demanda de tensión indicativa (VTURB*) del nivel de tensión que ha de lograrse en los bornes de red del filtro (16) y la señal de retroalimentación de tensión (VQ_NET) medida en los bornes de red del filtro (16) según una señal derivada de la señal de demanda de corriente longitudinal (ID_NET*).
- 25
- 62.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 39 a 61 que, además, comprende la etapa de derivar una señal de velocidad (N) indicativa de la velocidad de la parte móvil del generador (4) y de usar la señal de velocidad (N) para derivar la señal de demanda de potencia (P*).
- 30
- 63.** Un procedimiento según la reivindicación 61 que, además, comprende la etapa de derivar la señal de demanda de potencia (P*) de una tabla (56) de consulta o una función matemática en la que la señal de velocidad (N) forma un puntero a la tabla (56) de consulta o un valor para el que se calcula la función matemática.
- 64.** Un procedimiento según la reivindicación 62 que, además, comprende la etapa de modificación de la señal de velocidad (N) por una función de filtro.
- 35
- 65.** Un procedimiento según la reivindicación 64 que, además, comprende la etapa de derivar la señal de demanda de potencia (P*) de una tabla (56) de consulta o una función matemática en la que la señal modificada de velocidad (N') forma un puntero a la tabla (56) de consulta o un valor para el que se calcula la función matemática.
- 40
- 66.** Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 62 a 64 que, además, comprende la etapa de sumar la señal de demanda de potencia (P*) con una señal derivada de una versión filtrada de la señal de velocidad.

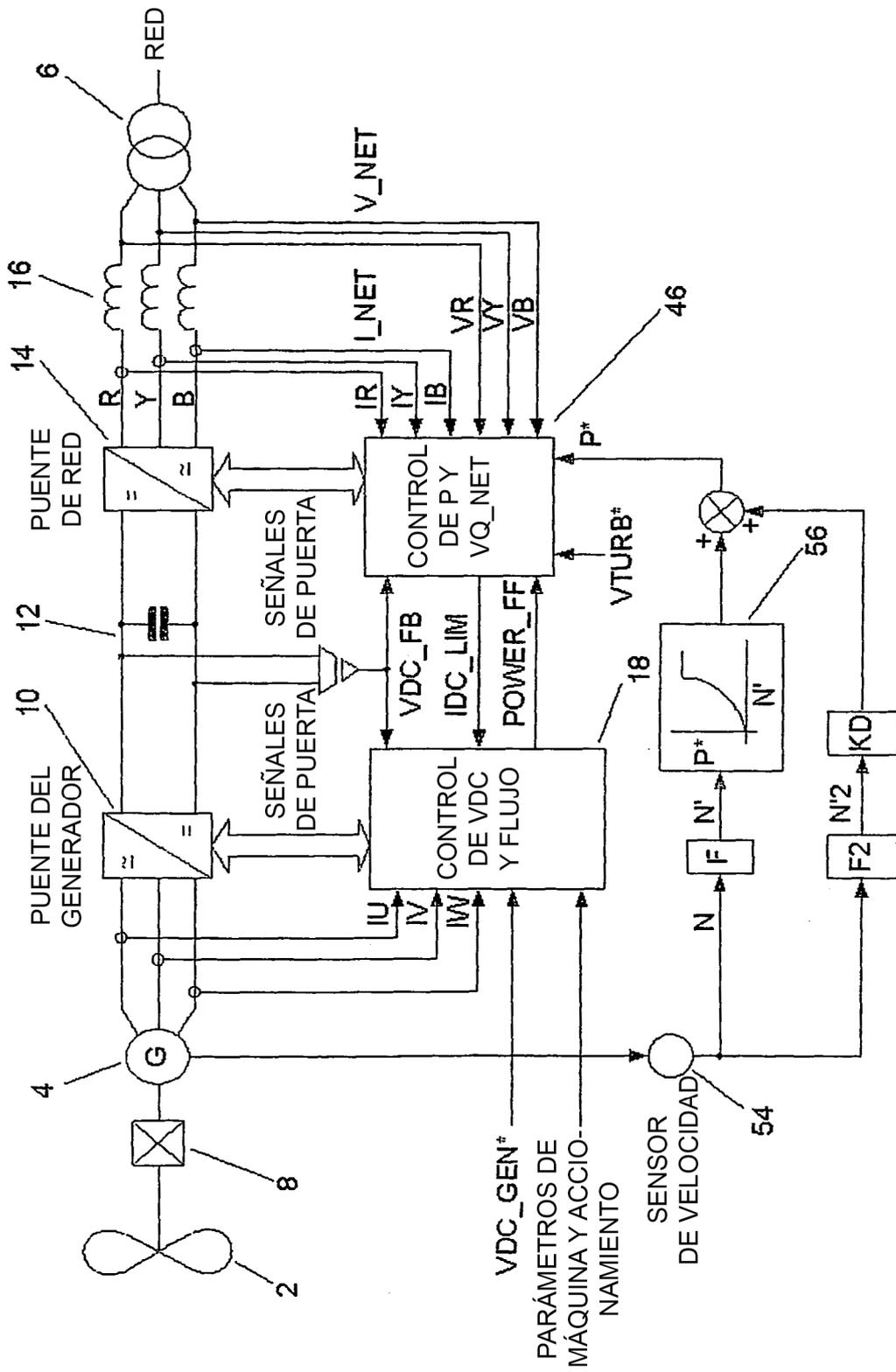


Figura 1

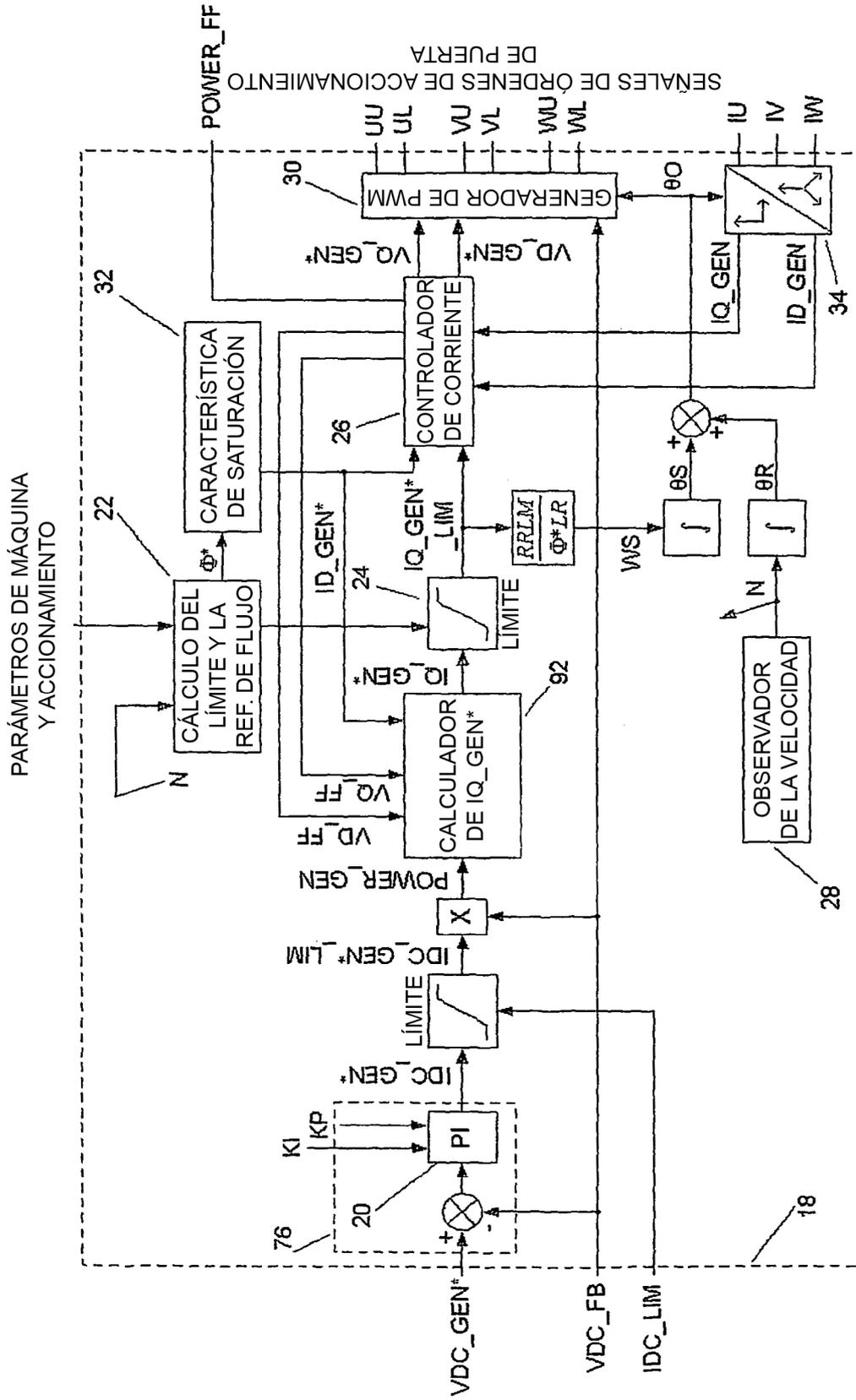


Figura 2

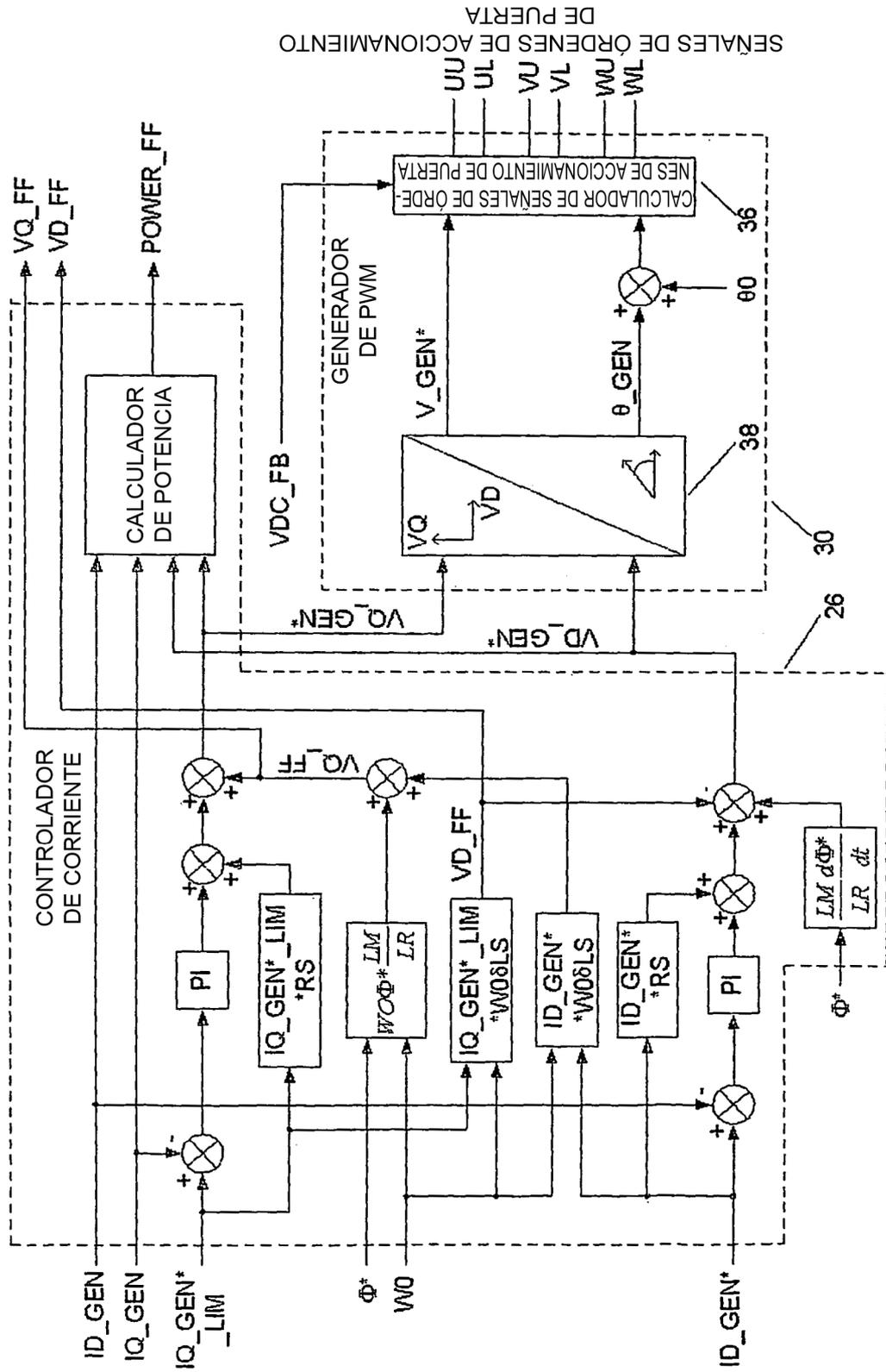


Figura 3

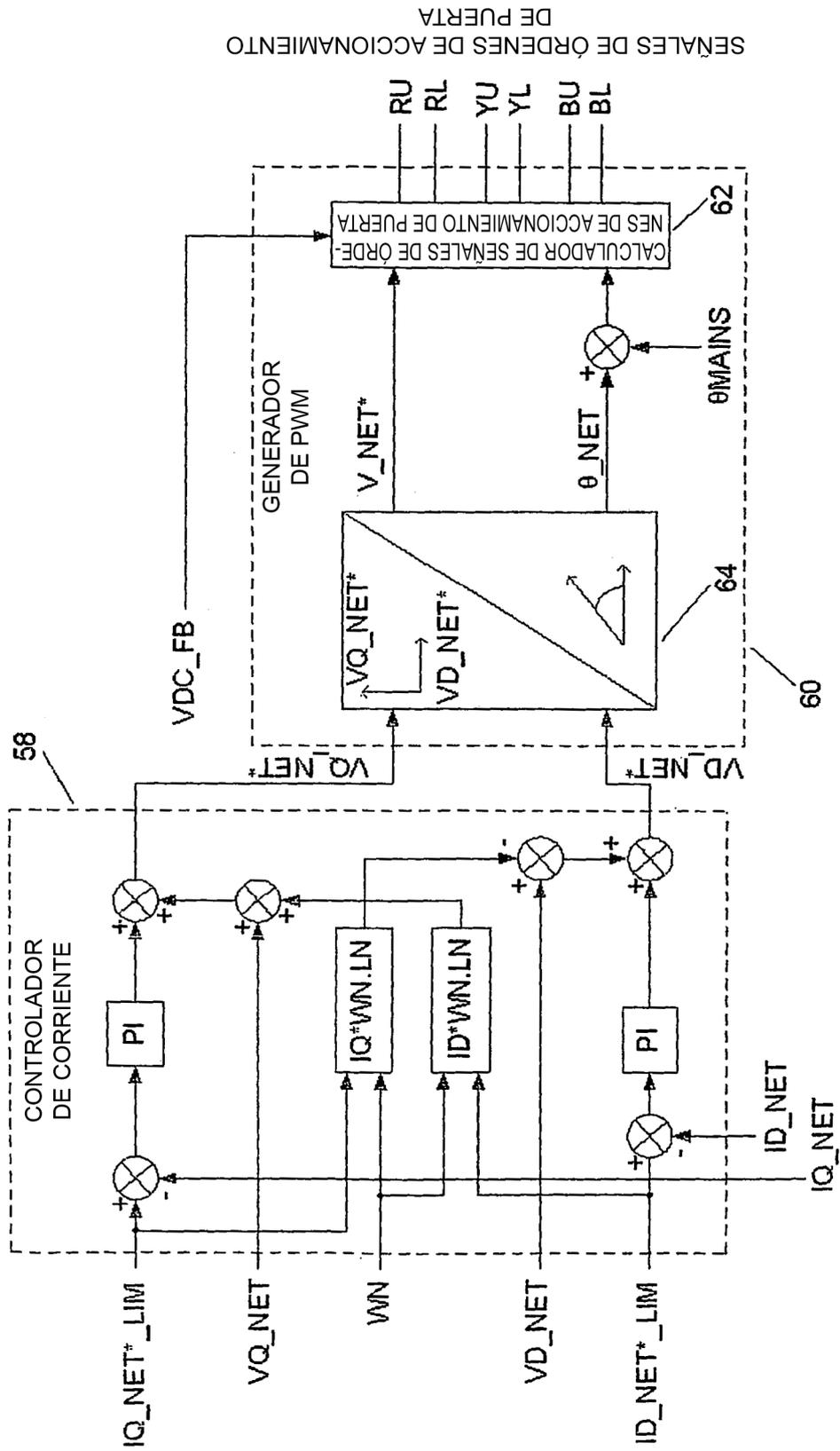
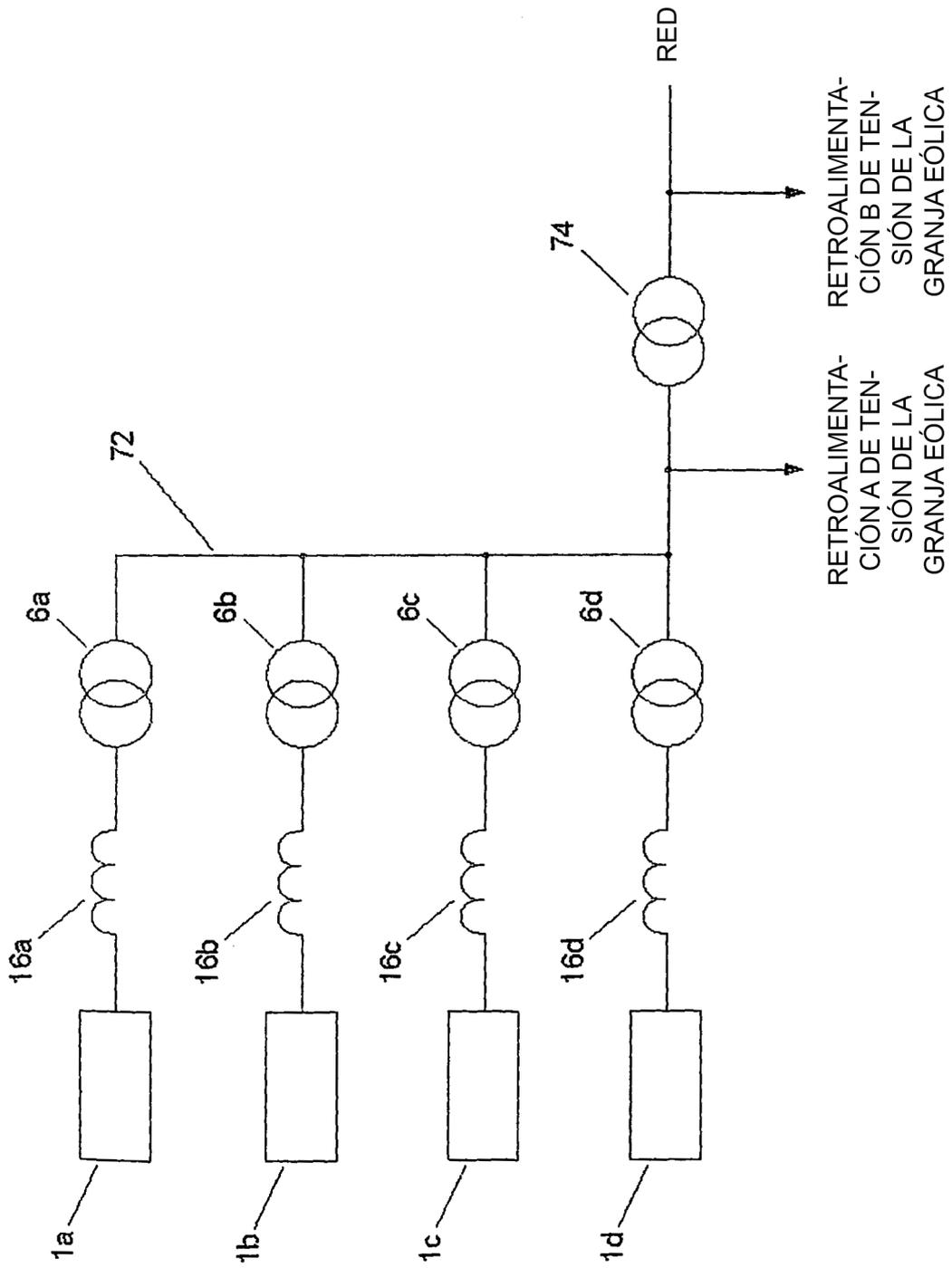


Figura 5



RETROALIMENTACIÓN A DE TENSION DE LA GRANJA EÓLICA

RETROALIMENTACIÓN B DE TENSION DE LA GRANJA EÓLICA

Figura 6

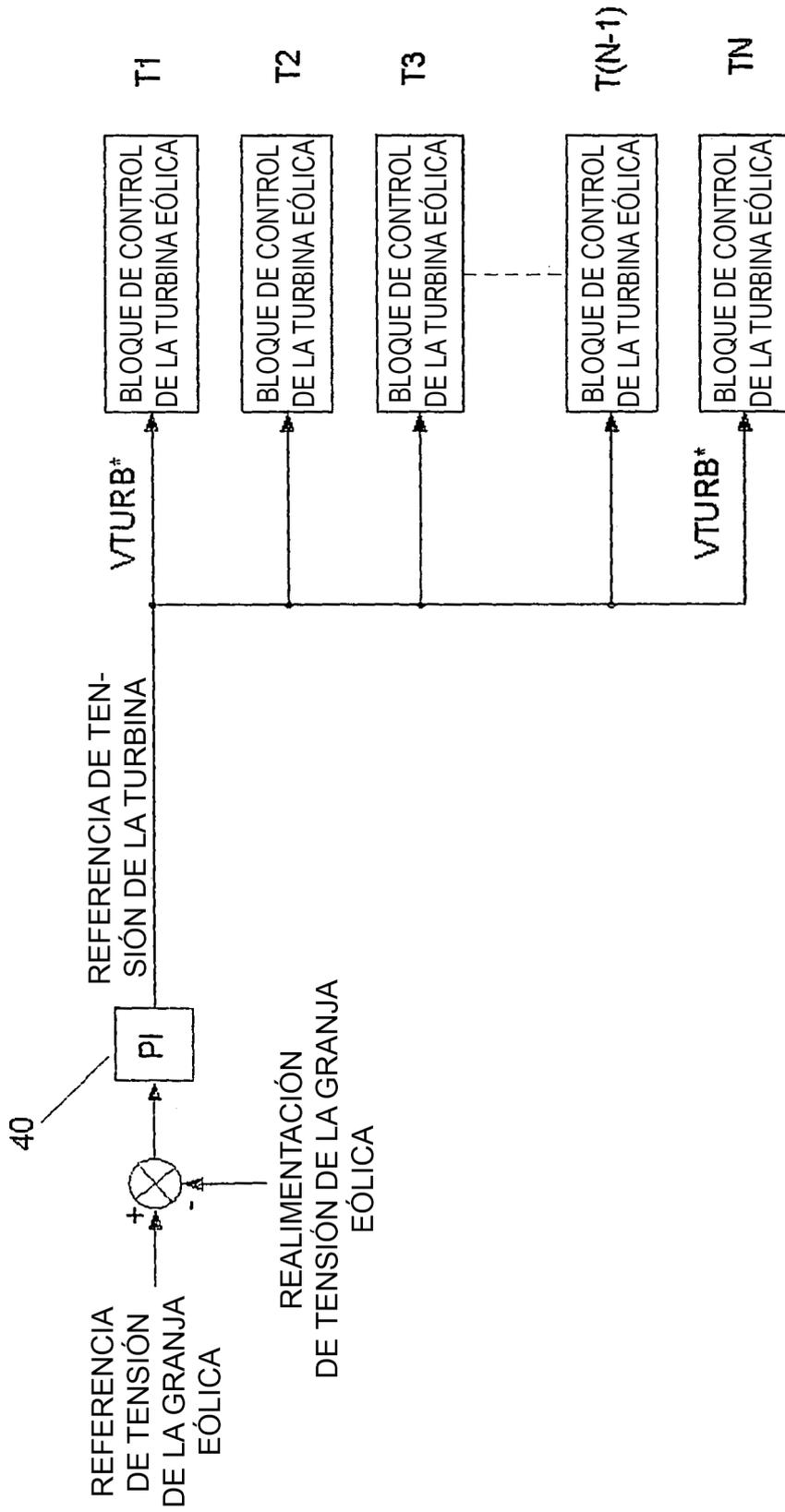


Figura 7

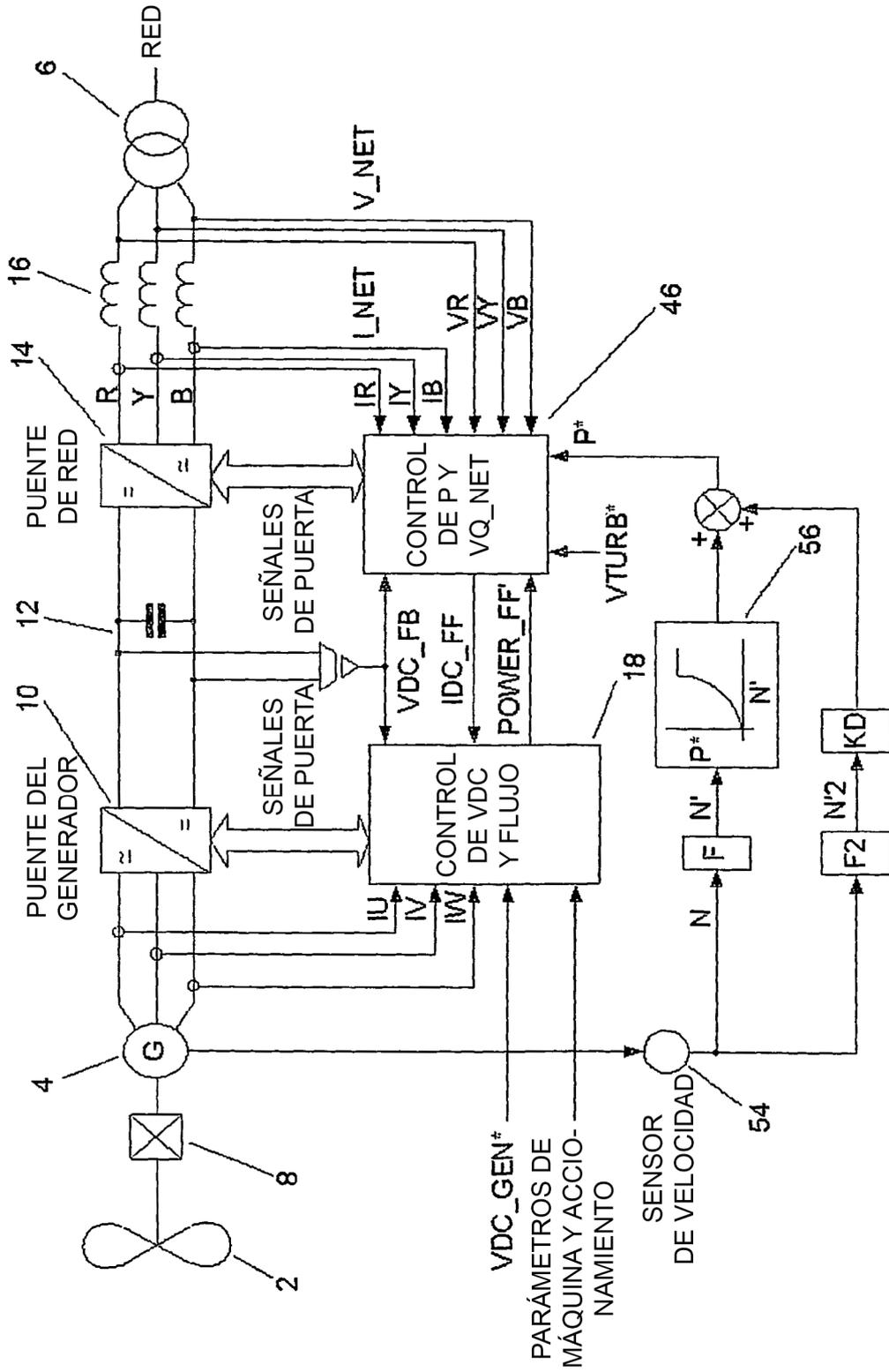


Figura 8

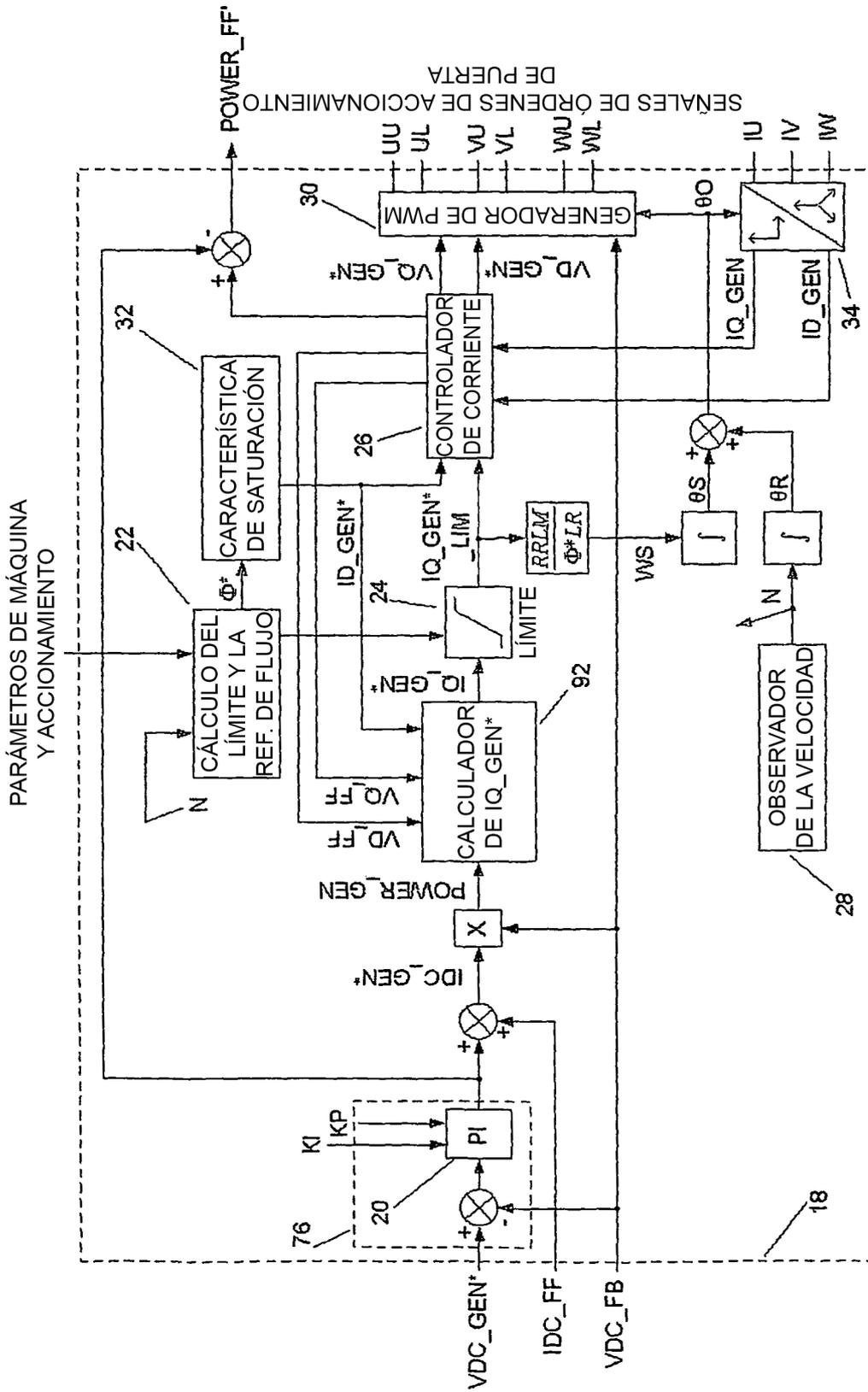


Figura 9

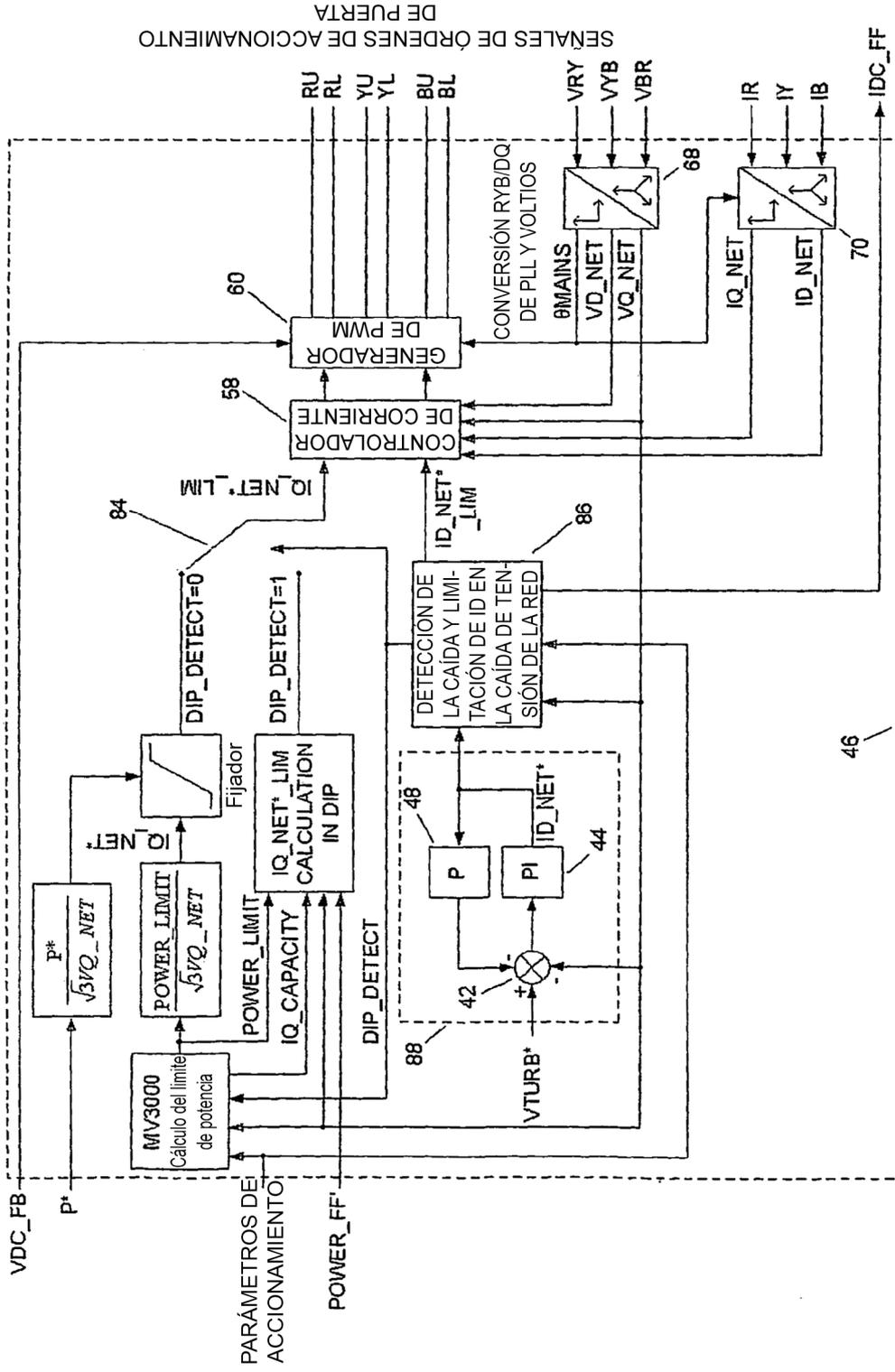


Figura 10

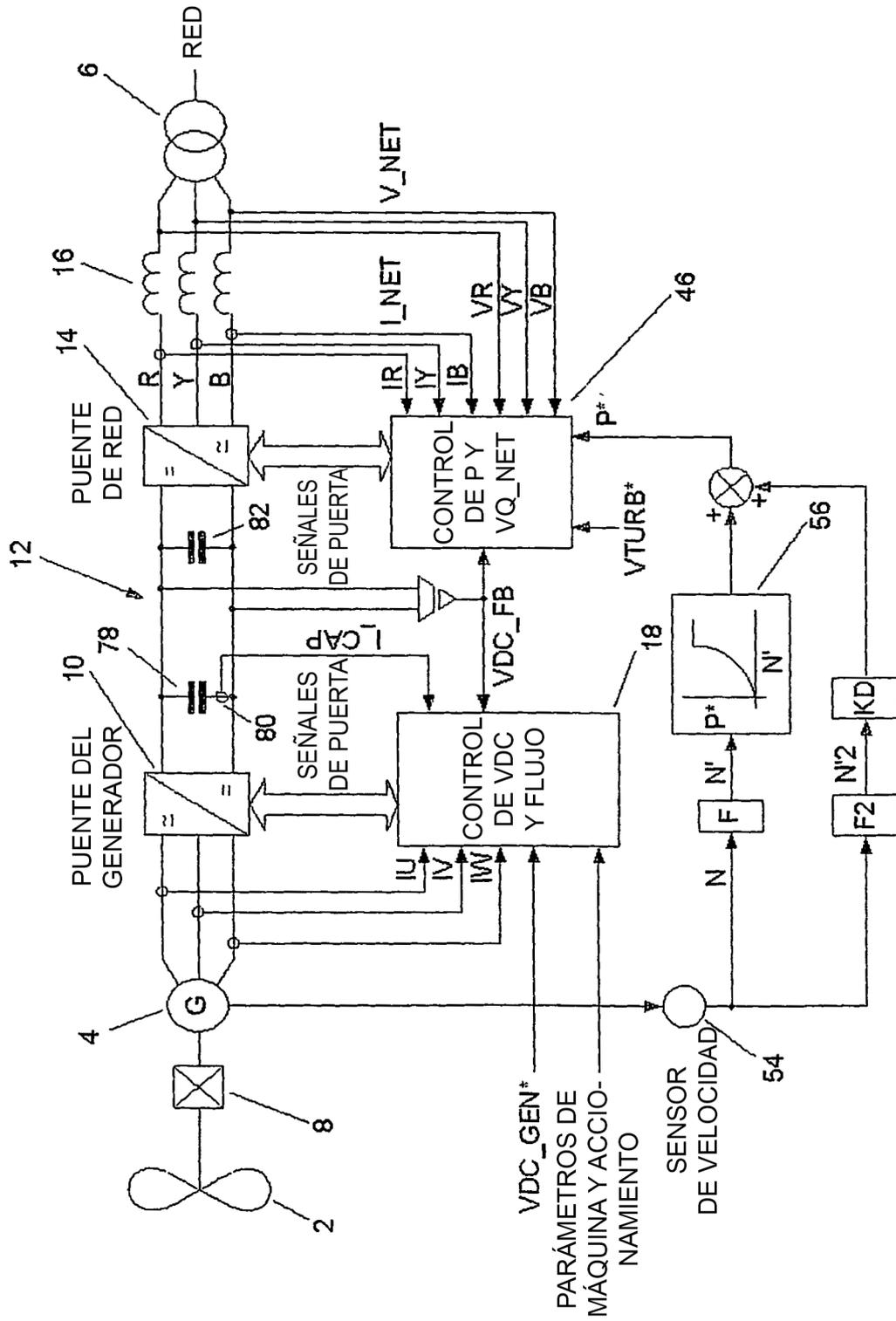


Figura 11

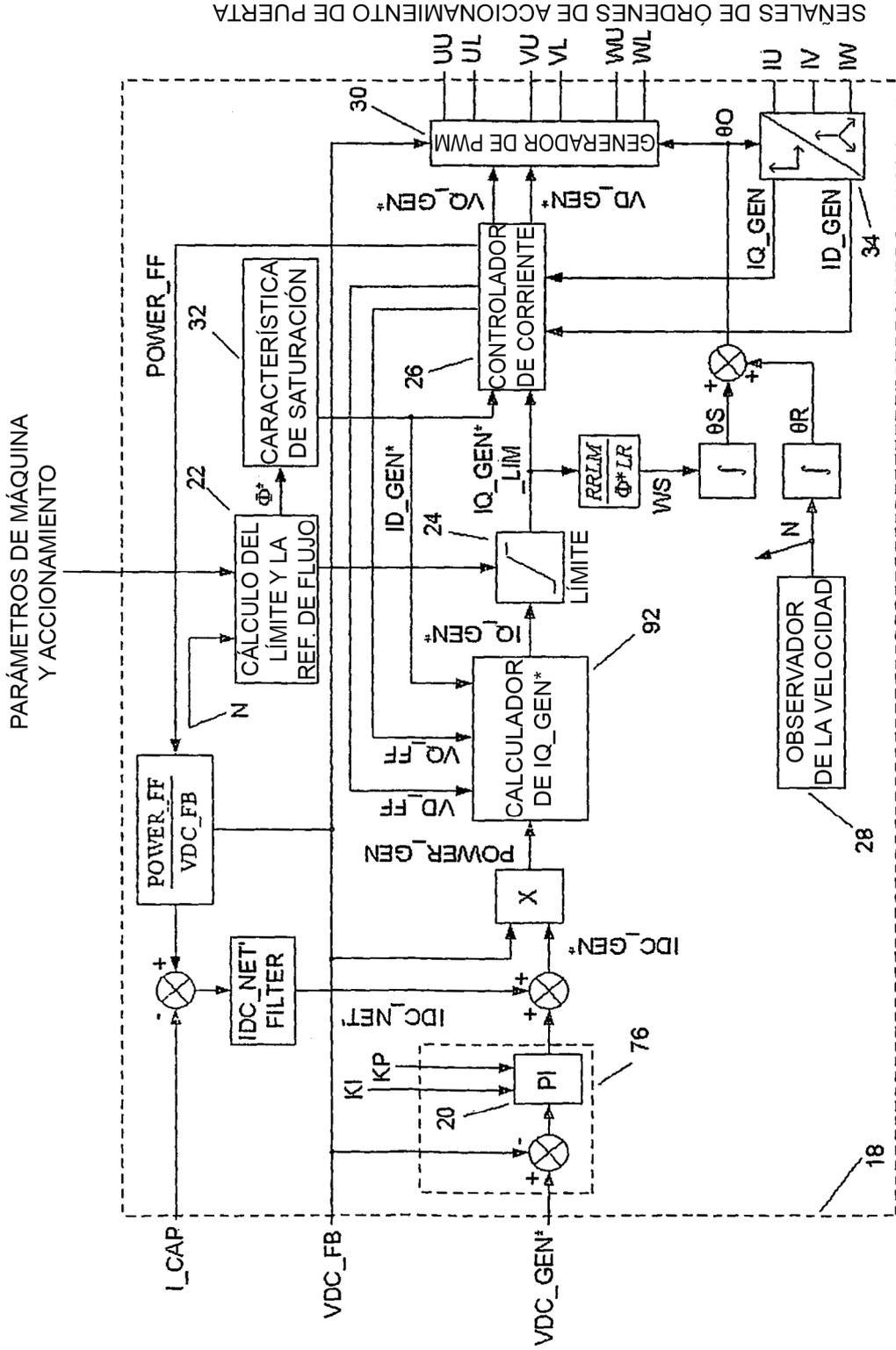


Figura 12

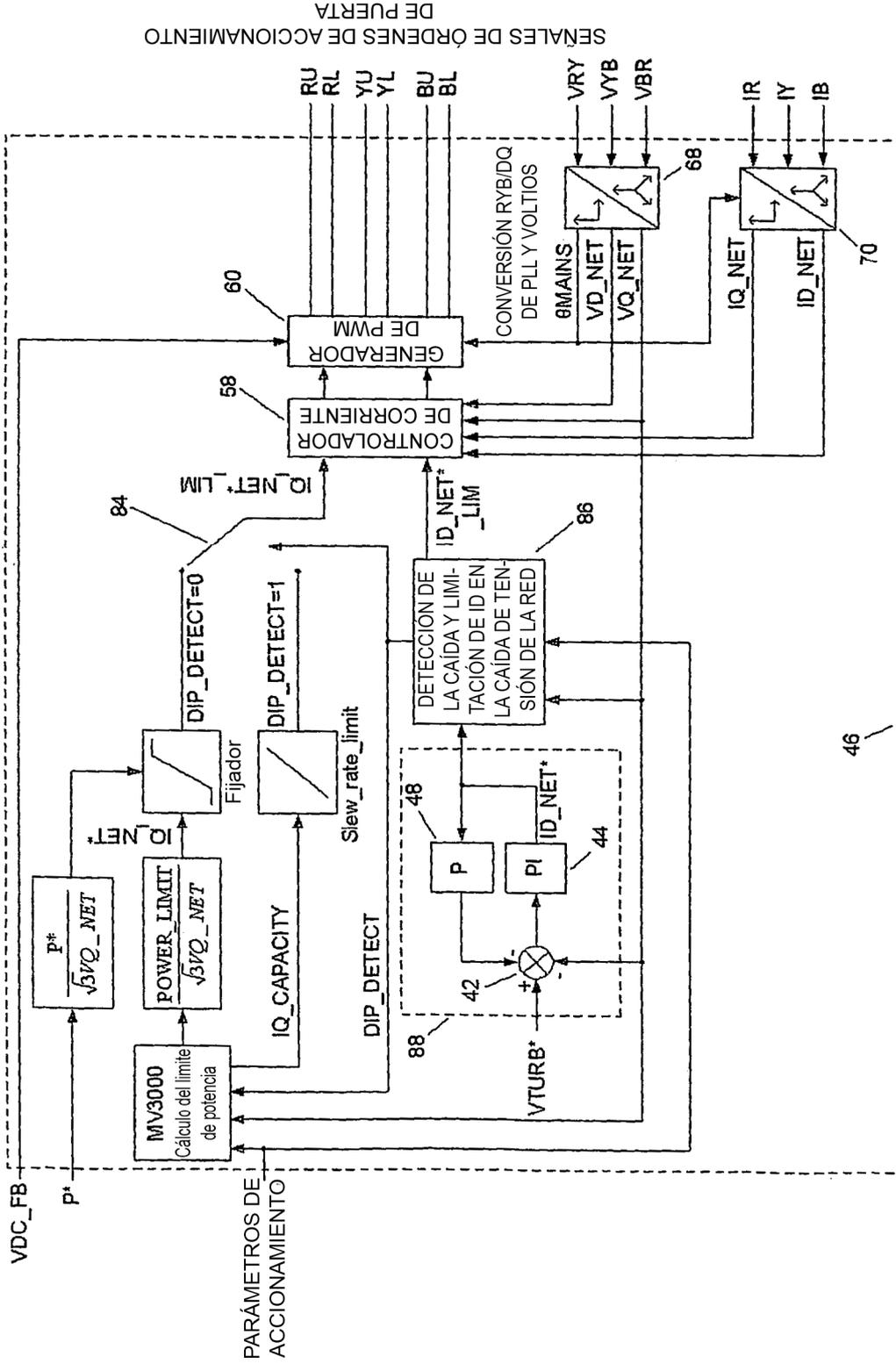


Figura 13

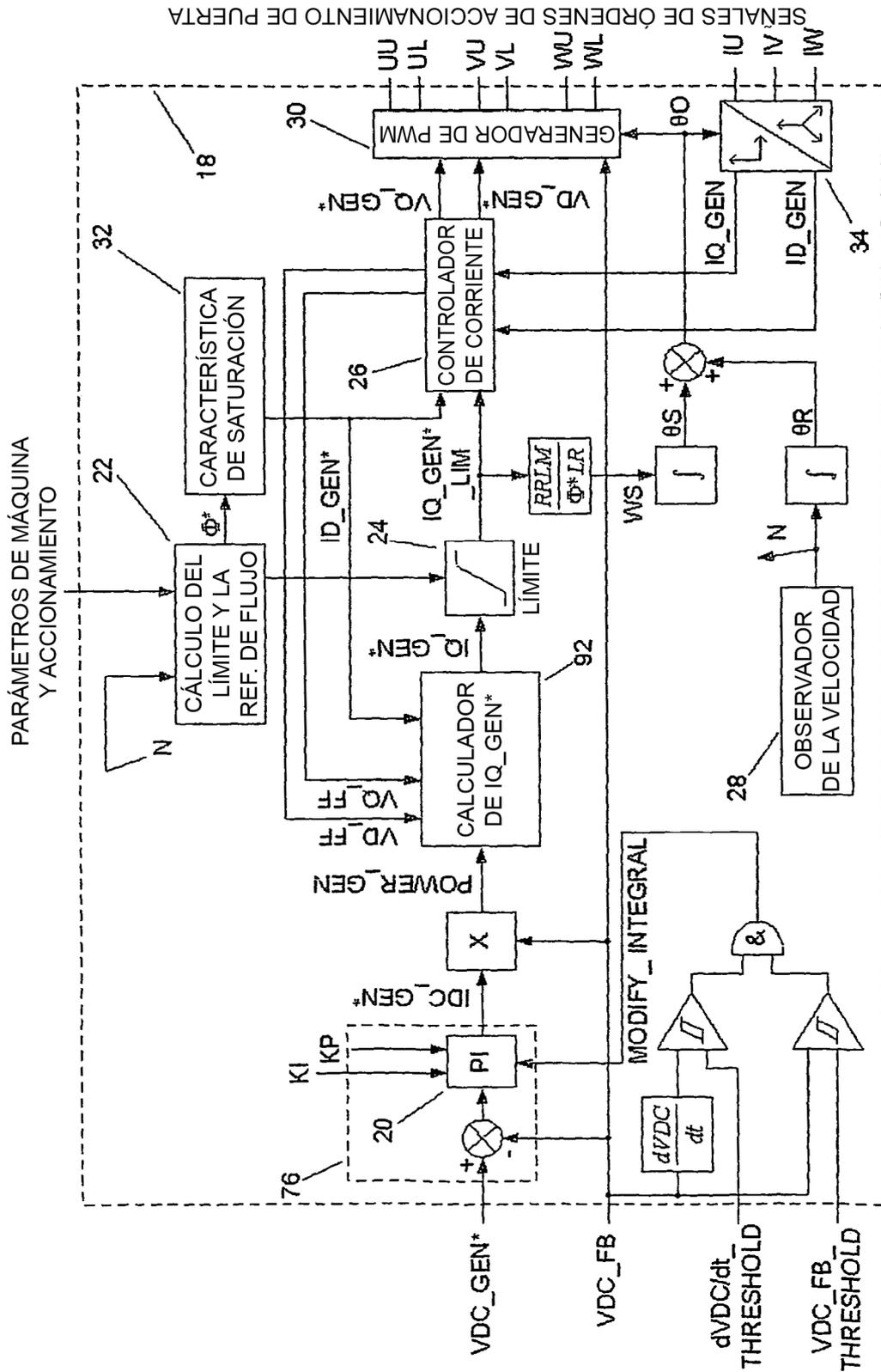


Figura 14