

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 407 678**

51 Int. Cl.:

F03D 9/00 (2006.01)

H02K 7/18 (2006.01)

F03D 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.07.2010 E 10006961 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2013 EP 2405134**

54 Título: **Procedimiento de control del par de torsión de un generador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
13.06.2013

73 Titular/es:

CONVERTEAM TECHNOLOGY LTD (100.0%)
Boughton Road Rugby
Warwickshire CV21 1BU, GB

72 Inventor/es:

BANHAM-HALL, DOMINIC DAVID;
TAYLOR, GARETH ANTHONY y
SMITH, CHRISTOPHER ALAN

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 407 678 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

Procedimiento de control del par de torsión de un generador

Campo técnico

5 La presente invención se refiere a procedimientos de control del par de torsión de un generador, y en particular a procedimientos para controlar el par de torsión en el generador de una turbina eólica durante una condición de fallo.

Antecedentes técnicos

10 Es posible convertir la energía eólica en energía eléctrica usando una turbina eólica para activar el rotor de un generador, ya sea directamente o mediante una caja de engranajes. La frecuencia de la ca que se desarrolla en los terminales del estator del generador (la "tensión del estator") es directamente proporcional a la velocidad de rotación del rotor. La tensión de los terminales del generador también varía como una función de la velocidad y, dependiendo del tipo particular de generador, del nivel de flujo. Para una captura de energía óptima, la velocidad de rotación del árbol de salida de la turbina eólica variará de acuerdo con la velocidad del viento que activa las palas de la turbina. Para limitar la captura de energía a altas velocidades de viento, la velocidad de rotación del árbol de salida se controla alterando el paso de las palas de la turbina. La coincidencia de la tensión y frecuencia variables del generador con una tensión y frecuencia nominalmente fijas de la red de suministro puede conseguirse usando un convertidor de potencia.

15 Un conjunto típico de turbina eólica y convertidor de potencia se muestra en la Figura 1. El convertidor de potencia se usa para hacer de interfaz entre la turbina 2 eólica que activa el generador 4 de ca de velocidad variable y una red de suministro (marcada como RED). La turbina eólica típicamente incluye tres palas de turbina montadas en un árbol rotatorio y cuyo paso se puede controlar mediante un accionador de paso. Una caja de engranajes 8 se usa para conectar el árbol rotatorio al rotor del generador 4. En algunos casos, el árbol rotatorio puede conectarse directamente al rotor del generador.

20 Los terminales del generador 4 están conectados a los terminales de ca de un puente 10 del generador trifásico que durante la operación normal opera como un rectificador activo para suministrar energía a un enlace 12 de cc. El puente 10 del generador tiene una topología de dos niveles trifásica convencional con una serie de dispositivos de conmutación de potencia semiconductores totalmente controlados y regulados usando una estrategia de modulación de la anchura de pulso (PWM). Sin embargo, en la práctica el puente 10 del generador puede tener cualquier topología adecuada tal como una topología de tres niveles de punto neutro fijo o una topología multinivel (una disposición Foch-Maynard por ejemplo).

25 La tensión de cc de salida del puente 10 de generador se alimenta a los terminales de cc de un puente 14 de la red que durante la operación normal opera como un inversor. El puente 14 de la red tiene una topología de dos niveles trifásica similar al puente 10 del generador con una serie de dispositivos de conmutación de potencia semiconductores totalmente controlados y regulados usando una estrategia PWM. Sin embargo, en la práctica el puente 14 de la red puede tener cualquier topología adecuada, como se ha analizado anteriormente para el puente 10 del generador.

30 El puente 10 del generador está controlado por un controlador 20 del puente del generador y el puente 14 de la red está controlado por un controlador 22 del puente de la red. Físicamente el sistema de control puede residir dentro del mismo hardware y ser solo una separación dentro del software.

35 La tensión de ca de salida del puente 14 de la red se filtra mediante un filtro de red antes de suministrarlo a la red de suministro a través de un transformador 6 escalonado. Puede incluirse un conmutador de alta tensión protector (no mostrado) para proporcionar una conexión fiable a la red de suministro y aislar el sistema generador de la red de suministro para diversos requisitos operativos y no operativos.

40 Los cambios súbitos en el par de torsión del generador pueden provocar oscilaciones mecánicas graves en el tren impulsor de la turbina eólica. Tales cambios pueden ocurrir durante un fallo de la red donde la incapacidad de exportar potencia a la red de suministro da como resultado una reducción de etapa casi simultánea en el par de torsión del generador, o como resultado de un fallo en el convertidor de potencia. La magnitud de las oscilaciones mecánicas es directamente proporcional a la magnitud de la reducción de etapa en el par de torsión del generador. En algunos casos, el conjunto de turbina y tren impulsor puede estar diseñado físicamente y modificado técnicamente para soportar estas oscilaciones mecánicas sin necesidad de ninguna protección adicional. Sin embargo, las oscilaciones mecánicas pueden mantenerse dentro de límites aceptables permitiendo que al menos parte de la potencia que no puede exportarse a la red de suministro sea absorbida en una resistencia de frenado dinámico (DBR) 16 que está conectada en serie con un accionador 18 adecuado o conmutador de alta tensión (por ejemplo un dispositivo de conmutación semiconductor tal como un FET o IGBT que en ocasiones se denomina "seccionador") a través del enlace 12 de cc. Cuando la tensión del enlace de cc sube por encima de un límite como respuesta a una condición de fallo entonces el accionador 18 está controlado por un controlador 25 del seccionador para cortocircuitar el enlace 12 de cc de manera que la potencia que se exporta desde el generador 4 sea absorbida por la DBR 16. La energía que se absorbe por la DBR 16 como resultado de la condición de fallo es la integral de la

potencia absorbida y se disipa en forma de calor. La DBR 16 puede tener cualquier construcción física adecuada y se puede refrigerar, por ejemplo, mediante aire o agua.

Si la DBR 16 está parcialmente capacitada entonces solo parte de la potencia del generador será absorbida por la DBR. En esta situación el par de torsión del generador aún experimentará una reducción escalonada pero será de una menor magnitud en comparación con una disposición donde no se proporciona DBR. La magnitud de las oscilaciones mecánicas en el tren impulsor por lo tanto se reducirá correspondientemente. Si la DBR 16 está plenamente capacitada entonces toda la potencia del generador será absorbida por la DBR hasta un tiempo tal que el generador 4 pueda iniciar a exportar potencia a la red de suministro. Convencionalmente esto puede significar que la DBR 16 está capacitada para aceptar toda la potencia del generador durante un segundo más. Si la DBR 16 está plenamente capacitada entonces el par de torsión del generador no experimentará una reducción escalonada y no hay nada que excite las oscilaciones mecánicas en el tren impulsor.

Se muestra la diferencia en la respuesta del par de torsión del generador para una disposición donde no hay DBR y una disposición donde se proporciona una DBR 16 plenamente capacitada a través del enlace 12 de cc en las Figuras 2A y 2B. Cada figura incluye una serie de siete gráficos marcados (a) a (g) que muestran cómo los siguientes parámetros operativos del conjunto de la turbina eólica y convertidor de potencia de la Figura 1 varían en un sistema pu o "por unidad" durante un fallo de la red donde la tensión de la red en la red de suministro se hunde a cero durante un segundo:

Gráfico (a) - tensión de la red (o tensión de suministro)

Gráfico (b) - velocidad del rotor del generador

Gráfico (c) - par de torsión del generador

Gráfico (d) - la cantidad de potencia que se exporta a la red de suministro a través del puente 14 de la red

Gráfico (e) - la cantidad de potencia que se exporta desde el generador 4 al enlace 12 de cc a través del puente 10 del generador

Gráfico (f) - la cantidad de potencia de generador que es absorbida por la DBR 16

Gráfico (g) - la cantidad de energía que es absorbida por la DBR 16

Puede verse a partir de los gráficos (a) de las Figuras 2A y 2B que la tensión de la red experimenta una reducción escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y recupera con un aumento escalonado de 0 a 1 en el tiempo $t = 66$ s. Los códigos de la red típicamente requieren que la turbina eólica permanezca conectada a la red de suministro durante los fallos o transiciones de la red. En otras palabras, el conjunto de turbina eólica y convertidor de potencia normalmente ha de tener alguna capacidad para fallos en la red o solventar bajas tensiones. Durante tales fallos en la red o transiciones el generador es incapaz de exportar potencia a la red de suministro. Los gráficos (d) de las Figuras 2A y 2B por lo tanto muestran que la potencia que se exporta a la red de suministro experimenta una reducción escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y, después de un pequeño levantamiento en el tiempo $t = 66$ s, empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red.

En la disposición donde no hay DBR entonces el gráfico (c) de la Figura 2A muestra que el par de torsión del generador experimenta una reducción escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red. El gráfico (b) de la Figura 2A muestra cómo la reducción escalonada en el par de torsión del generador en el tiempo $t = 65$ s provoca oscilaciones significativas en la velocidad del rotor del generador. La incapacidad de exportar potencia a la red de suministro durante el fallo en la red provoca también que la velocidad del rotor del generador aumente a una velocidad pico aproximadamente en el tiempo $t = 66,5$ s antes de empezar a disminuir gradualmente.

El gráfico (e) de la Figura 2A muestra que la cantidad de potencia que se exporta desde el generador al enlace de cc también experimenta una reducción escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red.

En la disposición donde se controla el accionador 18 en el tiempo $t = 65$ s para cortocircuitar el enlace 12 de cc de manera que la potencia que se exporta desde el generador 4 al enlace de cc a través del puente 10 del generador sea absorbida por la DBR 16 plenamente capacitada entonces el gráfico (f) de la Figura 2B muestra que la potencia que es absorbida por la DBR experimenta un aumento escalonado en el tiempo $t = 65$ s. Toda la potencia del generador es absorbida por la DBR 16 hasta el tiempo $t = 66$ s cuando se ha recuperado la tensión de la red y la potencia puede exportarse de nuevo a la red de suministro. En el tiempo $t = 66$ s la potencia que es absorbida por la DBR 16 empieza a disminuir a una velocidad constante. El gráfico (g) muestra la cantidad total de energía que es absorbida por la DBR 16. Se apreciará fácilmente que la energía es la integral de la potencia absorbida mostrada en el gráfico (f). La energía es absorbida a una velocidad constante entre los tiempos $t = 65$ s y $t = 66$ s puesto que la DBR 16 absorbe toda la potencia del generador durante toda la duración del fallo en la red. La velocidad a la que se absorbe la energía empieza a reducirse en el tiempo $t = 66$ s cuando la potencia que es absorbida por la DBR 16 empieza a disminuir a una velocidad constante y el gráfico (g) finalmente muestra un valor constante a aproximadamente $t = 66,4$ s que representa la cantidad total de energía que se ha absorbido por la DBR como

resultado del fallo en la red.

Debido a que toda la potencia del generador es absorbida por la DBR 16 durante el fallo en la red, el par de torsión del generador y la cantidad de potencia que es exportada desde el generador 4 permanecen sustancialmente constantes. No hay oscilaciones significativas en la velocidad del rotor del generador y no hay un aumento gradual en la velocidad tampoco. El uso de una DBR plenamente capacitada por tanto proporciona una protección útil y evita los problemas que ocurren cuando se permite que el par de torsión en el generador experimente una reducción escalonada. Aunque no se muestran los gráficos para una DBR parcialmente capacitada, se apreciará fácilmente que muestran una variación en los parámetros operativos en el conjunto de turbina eólica y convertidor de potencia que en ocasiones es entre las mostradas entre las Figuras 2A y 2B. En otras palabras, el par de torsión del generador experimentará una reducción escalonada pero la magnitud de la reducción escalonada y la magnitud de las oscilaciones resultantes en la velocidad del rotor del generador dependerán de la capacidad nominal parcial de la DBR en comparación con una capacidad nominal completa.

Sumario de la invención

La presente invención proporciona un procedimiento mejorado para controlar el par de torsión de un generador durante una condición de fallo (por ejemplo un fallo en la red o transición donde la red de suministro experimenta una caída de tensión, o un fallo en el convertidor de potencia que está conectado al generador del conjunto de turbina eólica). Más particularmente, en una turbina eólica que comprende un generador y un sistema mecánico rotatorio que tiene un periodo natural Tn, el procedimiento para controlar el par de torsión de un generador incluye la etapa de disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante con respecto al tiempo t de acuerdo con la ecuación:

$$\text{par de torsión del generador } (t) = \left(\frac{\text{par_de_torsión_nominal}}{n \cdot T_n} \right) t + c \quad (\text{EC1})$$

donde:

par_de_torsión_nominal es el par de torsión de la capacidad nominal del generador,
 n es un número entero, y
 c es una constante (que opcionalmente puede ser cero).

El par de torsión de la capacidad nominal del generador normalmente estará definido como el par de torsión del generador a la potencia de salida nominal y con una velocidad de generador igual a la velocidad de la capacidad nominal es decir:

$$\text{par_de_torsión_nominal} = \left(\frac{\text{potencia_nominal}}{\text{velocidad_nominal}} \right)$$

Si el par de torsión del generador disminuye de esta manera entonces la magnitud absoluta de cualquier oscilación mecánica en el sistema mecánico rotatorio puede reducir significativamente a cero o sustancialmente cero.

En un sistema de control de vector entonces el par de torsión del generador puede reducirse, por ejemplo, imponiendo límites de velocidad de rampa adecuados sobre el controlador de corriente real que forma parte del controlador del puente del generador. Los límites de la velocidad de rampa pueden aplicarse a una referencia de par de torsión y/o una referencia de corriente del eje del par de torsión.

El sistema mecánico rotatorio de la turbina eólica puede incluir un conjunto de turbina que tiene al menos una pala de turbina (lo típico serían tres), un conjunto de rotor del generador y cualquier árbol o árboles impulsores asociados. En el caso de una turbina eólica de impulsión no directa entonces el sistema mecánico rotatorio puede incluir adicionalmente una caja de engranajes que está provista entre el conjunto de turbina y el conjunto de rotor del generador. El sistema mecánico rotatorio por lo tanto puede considerarse en términos de un sistema de dos masas de muelle y amortiguador donde el conjunto de turbina está separado del conjunto de rotor del generador por al menos un árbol (y una caja de engranajes opcional) de tenacidad y amortiguamiento finitos. El periodo natural Tn para cualquier sistema mecánico rotatorio particular puede determinarse o calcularse a partir de parámetros tales como la tenacidad del árbol, amortiguación, inercia de la pala e inercia del generador.

El paso de al menos una pala de la turbina puede alterarse o ajustarse bajo el control de un accionador de paso. El

procedimiento por lo tanto puede incluir adicionalmente la etapa de alterar el paso de al menos una pala de la turbina para minimizar la velocidad máxima del generador durante una condición de fallo. En otras palabras, el paso de al menos una pala de la turbina puede alterarse de manera que el conjunto de turbina capture menos viento y se minimice cualquier aumento en la velocidad de rotación del árbol de salida (y por tanto el conjunto de rotor del generador) como resultado de la condición de fallo. El paso de al menos una pala de la turbina puede variarse tan pronto como se detecte una condición de fallo o en cualquier otro momento.

El par de torsión del generador puede hacerse disminuir tan pronto como se detecte una condición de fallo. Como alternativa, el par de torsión del generador puede mantenerse sustancialmente constante (por ejemplo al par de torsión de capacidad nominal del generador o al par de torsión del generador inmediatamente antes del comienzo de la condición de fallo) durante un periodo de tiempo antes de que disminuya. En particular, el par de torsión del generador puede mantenerse sustancialmente constante durante un periodo de tiempo predeterminado mientras que se altera o ajusta el paso de la al menos una pala de la turbina mediante el accionador de paso.

Típicamente el generador está conectado a un convertidor de potencia que hace de interfaz entre el generador y una red de suministro o red de potencia. El convertidor de potencia puede tener cualquier topología adecuada pero en una disposición incluye un puente de generador conectado a un puente de red mediante un enlace de cc. Una resistencia de frenado dinámico (DBR) puede conectarse en serie con un accionador o conmutador de alta tensión a través del enlace de cc. La capacidad nominal de la DBR y el accionador asociado o conmutador de alta tensión puede reducirse significativamente si el par de torsión del generador se hace disminuir a una velocidad sustancialmente constante como se ha descrito anteriormente. Esto se debe a que el flujo de potencia hacia la DBR puede reducirse rápidamente, asegurando así que se minimiza la cantidad total de energía que es absorbida por la DBR como resultado de la condición de fallo. La DBR puede tener una menor capacidad nominal que la que sería el caso para un conjunto convencional de turbina eólica y convertidor de potencia donde la potencia en generador es absorbida por la duración completa de la condición de fallo. Esto significa que la DBR puede hacerse físicamente más pequeña y se reducen significativamente los requisitos de refrigeración conduciendo a ahorros de coste.

El procedimiento es de particular importancia para turbinas eólicas que tienen generadores de imanes permanentes (PMG) donde la velocidad máxima del generador es crítica para la capacidad nominal de tensión del convertidor de potencia y donde las transiciones debidas a oscilaciones mecánicas en el sistema mecánico rotatorio o tren impulsor pueden exceder aquellas que resultan de la aceleración del conjunto de turbina. Los PMG típicamente tienen disposiciones de accionamiento directo o bajas proporciones de engranaje por lo que el periodo natural de sus sistemas mecánicos rotatorios a menudo es menor que el de otros tipos de turbinas eólicas.

La presente invención proporciona adicionalmente una turbina eólica que comprende: un generador; un sistema mecánico rotatorio que tiene un periodo natural T_n , incluyendo el sistema mecánico rotatorio un conjunto de turbina que tiene al menos una pala de turbina, un conjunto de rotor del generador y cualquier árbol o árboles impulsores asociados; y un convertidor de potencia; en el que se controla el convertidor de potencia para disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante con respecto al tiempo t de acuerdo con EC1.

El conjunto de turbina puede incluir un accionador de paso que está controlado para alterar el paso de la al menos una pala de la turbina para minimizar la velocidad pico de generador pico durante una condición de fallo. El convertidor de potencia puede tener cualquier topología adecuada pero en una disposición incluye un puente de generador que está controlado por un controlador de puente de generador para disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante imponiendo límites a la velocidad de rampa sobre una referencia de par de torsión y/o una referencia de corriente del eje de par de torsión que se usa por el controlador de puente del generador.

Dibujos

La Figura 1 es un dibujo esquemático de una disposición de turbina eólica y convertidor de potencia; Las Figuras 2A a 2D son una serie de gráficos (a) a (g) que muestran cómo los parámetros operativos del conjunto de turbina eólica y convertidor de potencia de la Figura 1 varían en ciertas situaciones; y La Figura 3 es un diagrama de control esquemático para la disposición de turbina eólica y convertidor de potencia de la Figura 1 de acuerdo con la presente invención.

El procedimiento de control del par de torsión de un generador de la presente invención se entenderá mejor con referencia a las Figuras 2C y 2D. Cada Figura incluye una serie de siete gráficos marcados (a) a (g) como se ha descrito anteriormente y que muestran cómo los parámetros operativos del conjunto de turbina eólica y convertidor de potencia de la Figura 1 varían en un sistema pu "por unidad" durante un fallo en la red donde la tensión de la red en la red de suministro cae a cero durante un segundo. La Figura 2C muestra cómo los parámetros operativos varían en una situación donde el par de torsión del generador se hace disminuir tan pronto como el fallo en la red es detectado. La Figura 2D muestra cómo los mismos parámetros operativos varían en una situación donde se mantiene el par de torsión del generador sustancialmente constante durante 0,5 s antes de hacerlo disminuir.

Puede verse a partir de los gráficos (a) de las Figuras 2C y 2D que la tensión de red experimenta una reducción

5 escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y se recupera con un aumento escalonado de 0 a 1 en el tiempo $t = 66$ s. Por las razones analizadas anteriormente, los gráficos (d) de las Figuras 2C y 2D muestran que la potencia que se exporta a la red de suministro por lo tanto experimenta una reducción escalonada de 1 a 0 en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 durante un segundo y, después de un pequeño alzamiento en el tiempo $t = 66$ s, empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red.

En ambas situaciones, se controla el accionador 18 en el tiempo $t = 65$ s para cortocircuitar el enlace 12 de cc de manera que la potencia del generador sea absorbida por la DBR 16.

10 El gráfico (c) de la Figura 2C muestra que el par de torsión del generador empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65$ s, permanece a 0 y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red. La velocidad constante a la que se reduce el par de torsión del generador está determinada por la ecuación EC1 y está relacionada con el par de torsión de capacidad nominal del generador 4 y el periodo natural T_n del sistema mecánico rotatorio de la turbina eólica que incluye el conjunto de turbina, el rotor de generador y los árboles impulsores asociados. El gráfico (b) de la Figura 2C muestra cómo la velocidad del rotor de generador aumenta a una velocidad pico aproximadamente en el tiempo $t = 66,5$ s antes de empezar a disminuir gradualmente. Debido a que la reducción del par de torsión (o rampa hacia abajo), no hay oscilaciones significativas en la velocidad del rotor.

15 El gráfico (e) de la Figura 2C muestra que la cantidad de potencia que es exportada desde el generador 4 hasta el enlace 12 de cc empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65$ s en línea con la disminución en el par de torsión del generador, permanece a 0 y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red.

20 El gráfico (f) de la Figura 2C muestra que la potencia que se absorbe por la DBR experimenta un aumento escalonado en el tiempo $t = 65$ s. Toda la potencia del generador es absorbida por la DBR 16 hasta el tiempo $t = 66$ s cuando se ha recuperado la tensión de la red y la potencia de nuevo puede exportarse a la red de suministro. Sin embargo, se apreciará fácilmente que a diferencia de la situación mostrada en la Figura 2B donde la potencia del generador permanece sustancialmente constante durante el fallo en la red debido a que no hay una disminución en el par de torsión del generador, en este caso la cantidad de potencia que se exporta desde el generador 4 hasta el enlace 12 de cc empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65$ s y alcanza 0 en aproximadamente el tiempo $t = 65,4$ s. Esto significa que desde el tiempo $t = 65$ s hay una cantidad en disminución de potencia al generador para que sea absorbida por la DBR 16, y que no hay potencia generadora a absorber en absoluto en el tiempo $t = 65,4$.

25 El gráfico (g) de la Figura 2C muestra la cantidad total de energía que es absorbida por la DBR 16 como resultado del fallo en la red. El valor constante que representa la cantidad total de energía que se ha absorbido por la DBR 16 es considerablemente menor que la mostrada en el gráfico (g) de la Figura 2B donde la DBR plenamente capacitada absorbe toda la potencia del generador durante toda la duración del fallo en la red.

30 El gráfico (c) de la Figura 2D muestra que se mantiene sustancialmente constante el par de torsión del generador durante 0,5 s después de que haya sido detectado el fallo en la red y solo empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65,5$ s. Esto podría permitir que el tiempo para el paso de las palas de la turbina sea variado por un accionador del paso para, por ejemplo, minimizar la velocidad máxima del generador. El par de torsión de generador permanece a 0 y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red. Se determina la velocidad constante a la que se reduce el par de torsión del generador mediante la ecuación EC1 y está relacionada con el par de torsión nominal del generador 4 y el periodo natural T_n del sistema mecánico rotatorio de la turbina eólica que incluye el conjunto de turbina, el rotor del generador y los árboles impulsores asociados. La velocidad a la que se reduce el par de torsión del generador es la misma para las situaciones alternativas mostradas en las Figuras 2C y 2D puesto que la velocidad es dependiente de los parámetros físicos del sistema de turbina eólica particular y no cuando el par de torsión de generador empieza a disminuir durante una condición de fallo. El gráfico (b) de la Figura 2D muestra cómo aumenta la velocidad del rotor del generador a una velocidad pico aproximadamente en el tiempo $t = 66,5$ s antes de empezar a disminuir gradualmente. Debido a la reducción del par de torsión, no hay oscilaciones significativas en la velocidad del rotor.

35 El gráfico (e) de la Figura 2D muestra que la cantidad de potencia que se exporta desde el generador 4 al enlace 12 de cc permanece a la potencia de salida nominal durante 0,5 s después de haber detectado el fallo en la red y solo empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65,5$ s en línea con la disminución en el par de torsión del generador. La potencia del generador permanece a 0 y empieza a aumentar a una velocidad constante en el tiempo $t = 66$ s una vez que se ha recuperado la tensión de la red.

40 El gráfico (f) de la Figura 2D muestra que la potencia que es absorbida por la DBR experimenta un aumento escalonado en el tiempo $t = 65$ s. Toda la potencia del generador es absorbida por la DBR 16 hasta el tiempo $t = 66$ s cuando se ha recuperado la tensión de la red y la potencia de nuevo puede exportarse a la red de suministro. Sin embargo, se apreciará fácilmente que a diferencia de la situación mostrada en la Figura 2B cuando la potencia del generador permanece sustancialmente constante durante el fallo de la red debido a que no hay disminución en el

par de torsión del generador, en este caso la cantidad de potencia que se exporta desde el generador 4 hasta el enlace 12 de cc empieza a disminuir a una velocidad constante en el tiempo $t = 65,5$ s y alcanza 0 aproximadamente en el tiempo $t = 69,4$ s. Esto significa que desde el tiempo $t = 65,5$ s hay una cantidad en disminución de potencia de generador para que sea absorbida por la DBR 16, y no hay potencia de generador a absorber en absoluto desde el tiempo $t = 65,9$ s.

El gráfico (g) de la Figura 2D muestra la cantidad total de energía que es absorbida por la DBR 16 como resultado del fallo en la red. El valor constante que representa la cantidad total de energía que ha sido absorbida por la DBR 16 es considerablemente menor que la cantidad total mostrada en el gráfico (g) de la Figura 2B donde la DBR plenamente capacitada absorbe toda la potencia del generador durante toda la duración del fallo en la red. Sin embargo, el valor constante mostrado en el gráfico (g) de la Figura 2D es mayor que la cantidad total mostrada en el gráfico (g) de la Figura 2C donde el par de torsión del generador se hace disminuir tan pronto como se detecta el fallo en la red.

La Figura 3 muestra un diagrama de control esquemático para el conjunto de turbina eólica y convertidor de potencia de la Figura 1. El generador 4 es un generador de imanes permanente (PGM). La serie de dispositivos de conmutación de potencia semiconductores del puente 10 del generador están totalmente controlados y regulados usando una estrategia de modulación de la anchura de pulso (PWM) por el controlador 20 del puente del generador. El controlador 20 del puente de generador usa un control de vector donde, en este ejemplo, el control del par de torsión tiene lugar en el eje q. Se compara una señal de referencia de tensión V_{dc_ref} indicativa de una tensión deseada del enlace dc con una señal de retroalimentación de tensión V_{dc} que es una medición de la tensión del enlace de cc. Un controlador 26 basado en PI de la tensión de cc usa la comparación de la señal de referencia de tensión V_{dc_ref} y la señal de retroalimentación de tensión V_{dc} para proporcionar una señal de referencia de corriente $I_{q^*_ref}$ del eje de par de torsión (o eje q). Un bloque 28 de función impone un límite de velocidad de rampa adecuado sobre la señal de referencia de corriente del eje de par de torsión $I_{q^*_ref}$ y proporciona una señal de corriente del eje de par de torsión limitada $I_{q^*_lim}$ que es usada después por el controlador 20 del puente del generador para derivar comandos de conexión E_{abc} para que los dispositivos de conmutación de potencia semiconductores del puente 10 del generador consigan un par de torsión de generador deseado. Durante un fallo de la red o transición entonces los límites de la velocidad de rampa impuestos por el bloque de función 28 sobre la señal de referencia de corriente $I_{q^*_ref}$ no permitirán que el par de torsión del generador experimente un cambio escalonado y en lugar de ello provocarán que el par de torsión del generador disminuya a una velocidad constante (es decir rampa descendente) de acuerdo con la ecuación EC1 mencionada anteriormente. Los límites a la velocidad de rampa pueden imponerse tan pronto como se detecte el fallo en la red o después de un tiempo de retraso predeterminado durante el cual el par de torsión del generador se mantiene al mismo par de torsión que el inmediatamente previo al comienzo del fallo en la red.

La importancia de los límites de la velocidad de rampa puede verse considerando el caso sin ellos. Antes de que un fallo en la red o fallo en el convertidor de potencia el generador 4 exportará potencia al enlace 12 de cc a través del puente 10 del generador. Para equilibrar la tensión del enlace de cc, la potencia se exporta a través del puente 14 de red a la red de suministro. Cualquiera del puente 10 del generador o el puente 14 de la red puede tener responsabilidad de mantener la tensión del enlace de cc al nivel deseado. Durante un fallo en la red o fallo del convertidor de potencia, la potencia que puede exportarse a la red de suministro disminuirá y provocará que aumente la tensión del enlace de cc. Si el puente 10 del generador tiene responsabilidad para controlar la tensión del enlace de cc entonces el controlador 20 del puente del generador disminuirá rápidamente la señal de referencia de corriente del eje del par de tensión $I_{q^*_ref}$ para reducir la tensión del enlace de cc. Como alternativa, la referencia del par de torsión del puente del generador puede disminuir rápidamente mediante una señal retroalimentada que es proporcionada por el controlador 22 del puente de red. Según cualquiera de los procedimientos, la señal de referencia de corriente del eje del par de torsión $I_{q^*_ref}$ por lo tanto experimentará un cambio de par de torsión que se aproxima a un cambio escalonado como se muestra en el gráfico (c) de la Figura 2A. En la presente invención los límites de la velocidad de rampa se aplican para limitar la velocidad a la que la señal de referencia de corriente del eje de par de tensión $I_{q^*_ref}$ puede disminuir y provocar que el par de torsión del generador disminuya a una velocidad constante de acuerdo con la ecuación EC1 mencionada anteriormente.

Aunque la descripción específica se ha concentrado sobre una situación de fallo en la red, se apreciará fácilmente que los límites a la velocidad de rampa pueden imponerse también sobre la señal de referencia de corriente del eje de par de torsión $I_{q^*_ref}$ en el caso de un fallo en el convertidor de potencia.

El diagrama de control de la Figura 3 es con fines ilustrativos únicamente y se apreciará fácilmente que el par de torsión del generador puede controlarse usando otra referencia de par de torsión y/o sistema de control de referencia de corriente del eje del par de torsión.

REIVINDICACIONES

1. En una turbina eólica que comprende un generador (4) y un sistema mecánico rotatorio que tiene un periodo natural T_n , un procedimiento para controlar el par de torsión del generador incluye la etapa de disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante respecto al tiempo t de acuerdo con la ecuación:

$$\text{par de torsión del generador } (t) = \left(\frac{\text{par_de_torsión_nominal}}{n \cdot T_n} \right) t + c$$

donde:

par_de_torsión_nominal es el par de torsión nominal del generador (4),
 n es un número entero, y
 c es una constante.

- 2. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la turbina eólica comprende adicionalmente un conjunto de turbina que tiene al menos una pala de turbina, incluyendo el procedimiento adicionalmente la etapa de alterar el paso de la al menos una pala de turbina para minimizar la velocidad máxima del generador durante una condición de fallo.
- 3. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el paso de la al menos una pala de turbina es alterado tan pronto como se detecta la condición de fallo.
- 4. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2 o la reivindicación 3, que incluye adicionalmente la etapa de mantener el par de torsión del generador sustancialmente constante durante un periodo de tiempo durante una condición de fallo antes de disminuir el par de torsión a una velocidad sustancialmente constante.
- 5. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que el par de torsión del generador se mantiene sustancialmente constante mientras se altera el paso de la al menos una pala de la turbina.
- 6. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el par de torsión disminuye a una velocidad sustancialmente constante tan pronto como se detecta la condición de fallo.
- 7. Un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la turbina eólica comprende adicionalmente un puente (10) del generador que está controlado por un controlador (20) de puente de generador, comprendiendo adicionalmente el procedimiento la etapa de disminuir el par de torsión a una velocidad sustancialmente constante imponiendo límites a la velocidad de rampa sobre una referencia de par de torsión y/o una referencia de corriente del eje del par de torsión ($I_{q^*_ref}$) que es usada por el controlador (20) del puente de generador.
- 8. Una turbina eólica que comprende:
 - un generador (4);
 - un sistema mecánico rotatorio que tiene un periodo natural T_n , incluyendo el sistema mecánico rotatorio un conjunto de turbina que tiene al menos una pala de turbina, un conjunto de rotor del generador (4) y algún árbol o árboles impulsores asociados; y
 - un convertidor de potencia;
 - en el que el convertidor de potencia es controlado para disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante con respecto al tiempo t de acuerdo con la ecuación:

$$\text{par de torsión del generador } (t) = \left(\frac{\text{par_de_torsión_nominal}}{n \cdot T_n} \right) t + c$$

donde:
 par_de_torsión_nominal es el par de torsión nominal del generador (4),
 n es un número entero, y
 c es una constante.

9. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 8, en la que el conjunto de turbina incluye adicionalmente un accionador de paso que está controlado para alterar el paso de la al menos una pala de turbina para minimizar la

velocidad máxima del generador de pico durante una condición de fallo.

- 5 10. Una turbina eólica de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, en la que el convertidor de potencia comprende un puente (10) de generador que está controlado por un controlador (20) de puente de generador para disminuir el par de torsión del generador durante una condición de fallo a una velocidad sustancialmente constante imponiendo límites a la velocidad de rampa sobre la referencia del par de torsión y/o la referencia de corriente del eje del par de torsión (I_q^* _ref) que es usado por el controlador (20) del puente de generador.

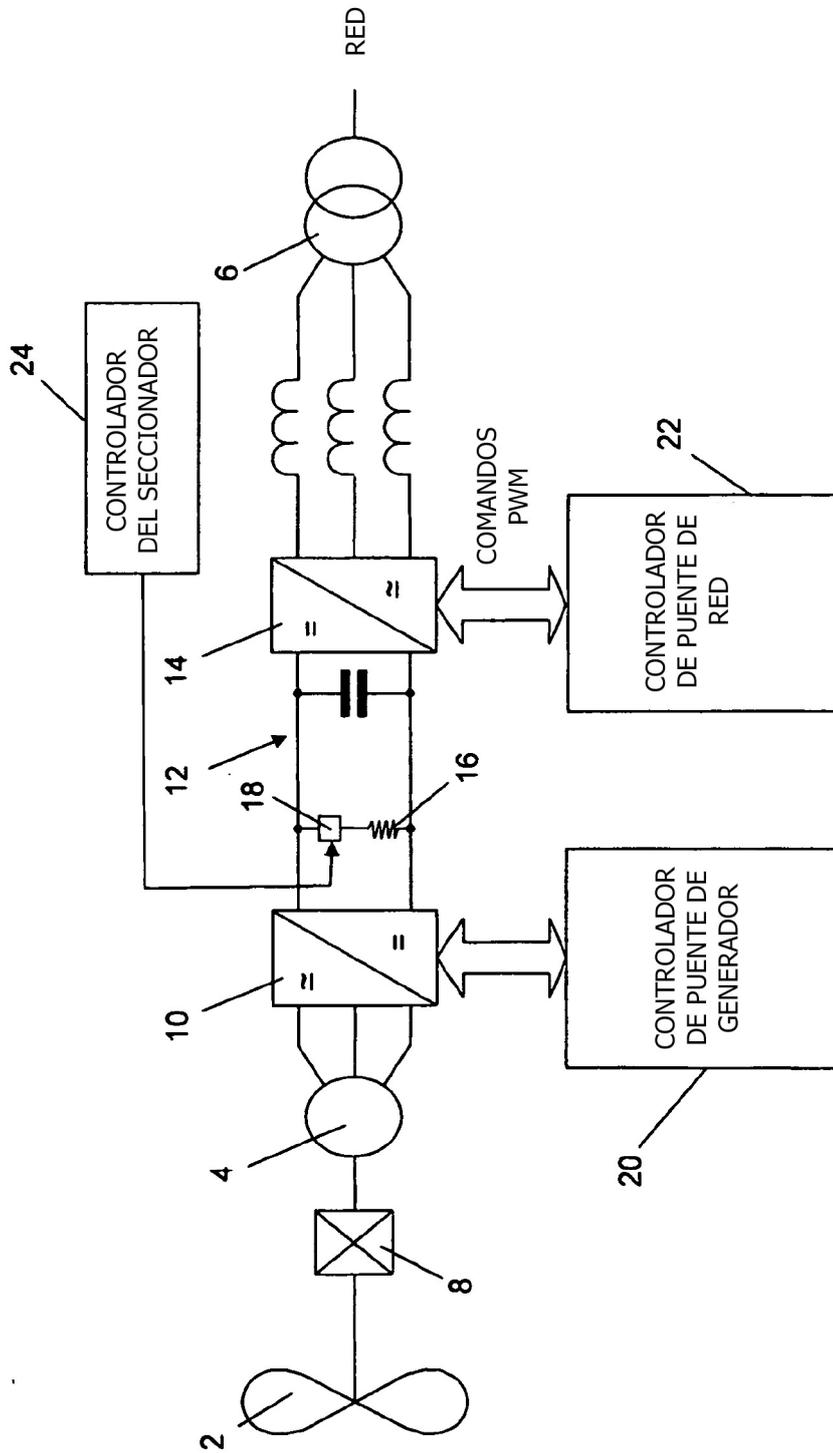


Figura 1

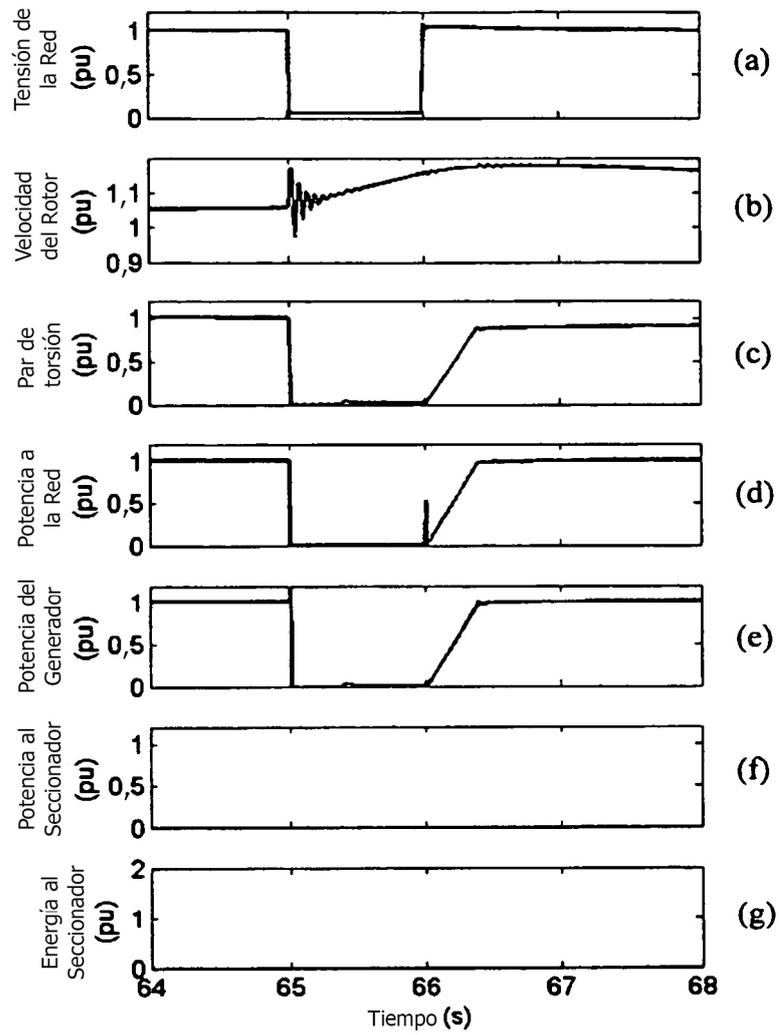


Figura 2A

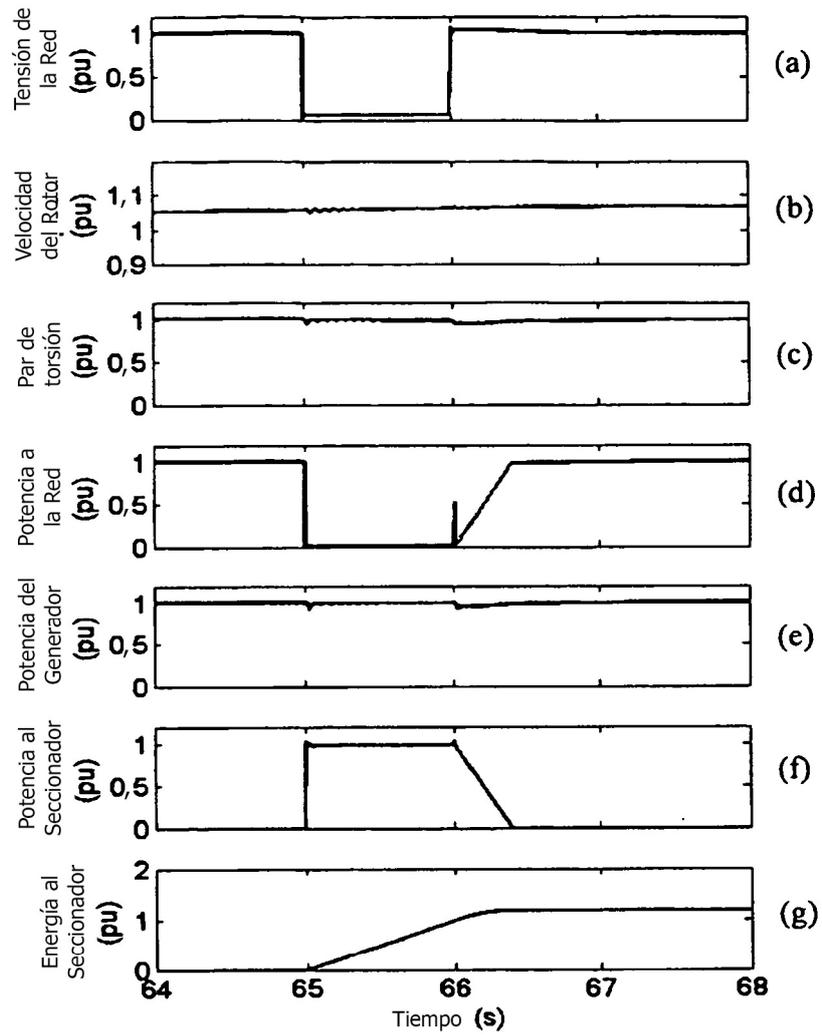


Figura 2B

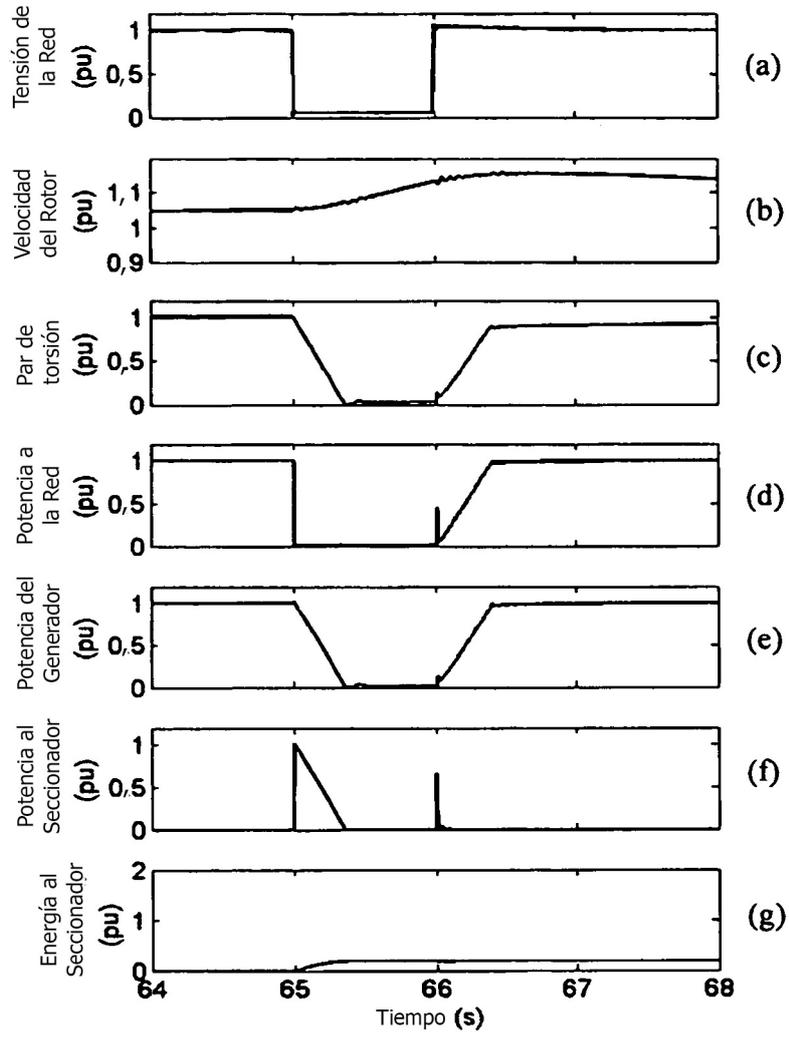


Figura 2C

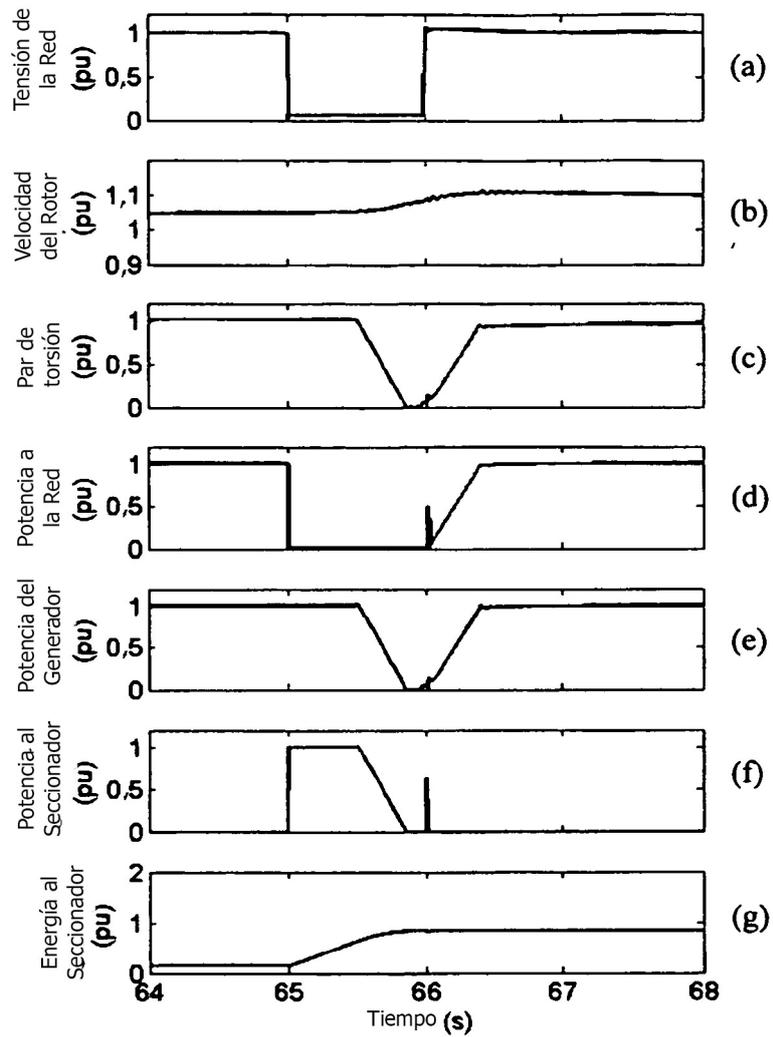


Figura 2D

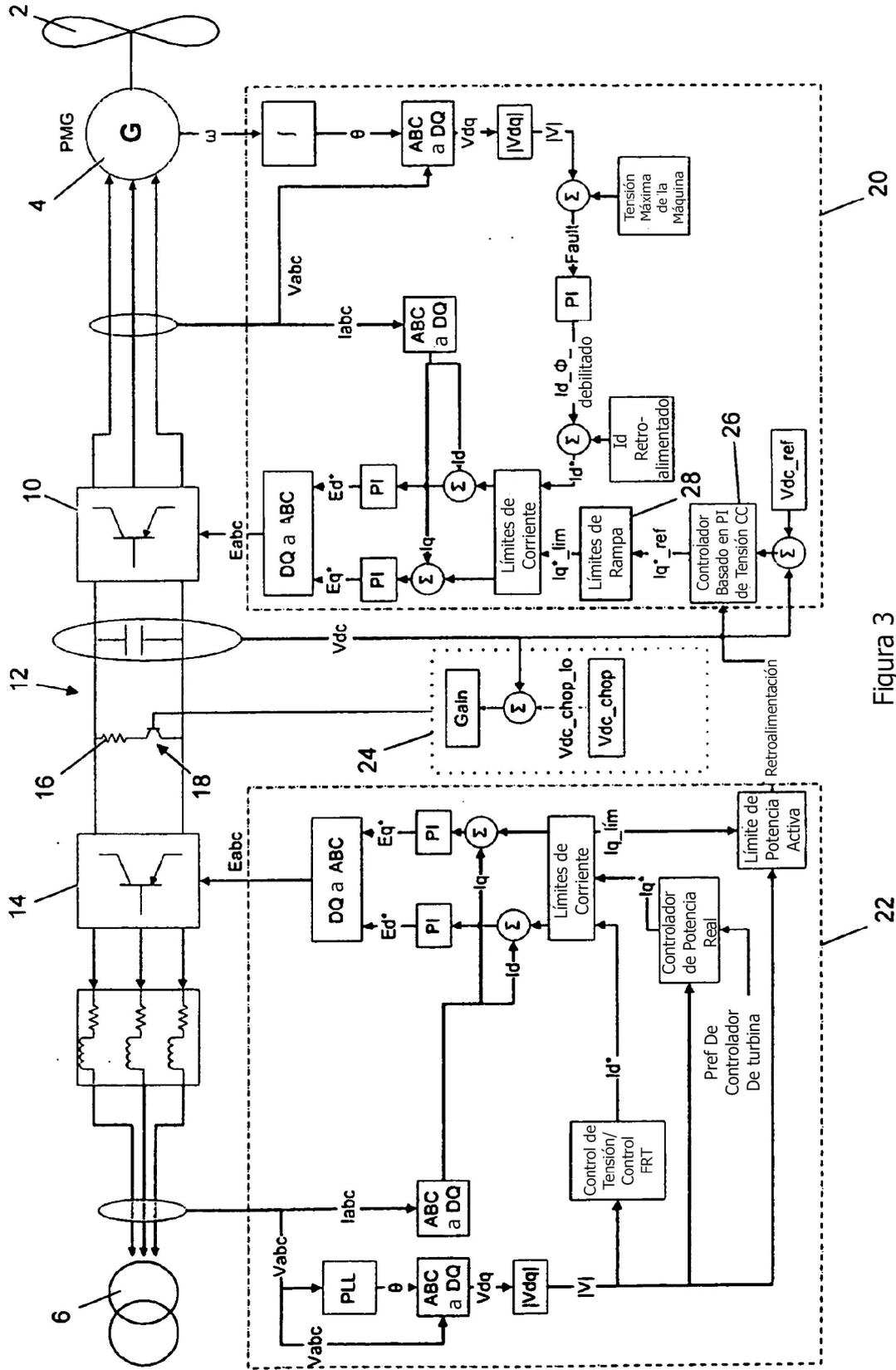


Figura 3