



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 330 229**

51 Int. Cl.:

H02P 9/10 (2006.01)

F03D 9/00 (2006.01)

G05B 9/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05000275 .7**

96 Fecha de presentación : **07.01.2005**

97 Número de publicación de la solicitud: **1561946**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **10.08.2005**

54 Título: **Generador con capacidad de tolerancia a errores de red.**

30 Prioridad: **03.11.2004 US 981364**
04.02.2004 US 773851

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
07.12.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
07.12.2009

73 Titular/es: **Clipper Windpower Technology, Inc.**
6305 Carpinteria Avenue, Suite 300
Carpinteria, California 93013, US

72 Inventor/es: **Erdman, William;**
Cousineau, Kevin L. y
Mikhail, Amir S.

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 330 229 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

Generador con capacidad de tolerancia a errores de red.

5 **Antecedentes de la invención**

La invención se refiere a generadores con inversores regulados por carga, incluyendo turbinas eólicas y de corriente de agua, y más en particular a turbinas eólicas de velocidad variable que emplean generadores multifase que utilizan sistemas de conversión de plena potencia con capacidad de tolerancia a errores de red.

10 La aplicación de sistemas de generación eólicos en el pasado se ha realizado a pequeña escala en comparación con la capacidad de generación total de la red eléctrica. Un término utilizado frecuentemente para describir la cantidad relativa de potencia eólica generada es el de “penetración”. La penetración es la tasa de potencia eólica generada respecto al total de potencia generada disponible. Incluso en aquellos estados en los que la potencia eólica generada es máxima, los niveles de penetración son de alrededor del 1% o inferiores. Aunque esto es una cantidad relativamente pequeña de potencia, y las reglas que gobiernan el funcionamiento de las turbinas reflejan esta pequeña penetración, está claro que las reglas de funcionamiento están cambiando. Esto es un anticipo de futuros niveles substancialmente más altos de penetración. Un principio operativo que está siendo sometido a revisión es cómo reacciona una turbina eólica a un fallo en el sistema de red de transmisión (o subtransmisión) al que se encuentra interconectada la turbina eólica. Un fallo se define como una perturbación de la red que da como resultado una caída significativa de voltaje en el sistema de transmisión de red durante un periodo corto (típicamente inferior a 500 ms). Los fallos pueden estar ocasionados por la conexión inadvertida a tierra de al menos un conductor de fase (un fallo a tierra), o la conexión inadvertida, o el cortocircuito, de conductores de múltiples fases. Estos tipos de fallos tienen lugar durante tormentas eléctricas y de viento, o cuando una línea de transmisión se ve involucrada en un accidente de un vehículo, por ejemplo. 15 Una reducción significativa de voltaje puede ocurrir asimismo cuando tiene lugar un gran cambio en la carga eléctrica o en la generación eléctrica en la proximidad del sistema de transmisión de red. Ejemplos de este tipo de eventos podrían incluir la brusca desconexión de una gran planta de potencia, o la súbita conexión de una gran carga, tal como una planta de laminación de acero. Este tipo de eventos de reducción de voltaje no se denominan típicamente como fallos en la terminología de red, aunque para el propósito de esta descripción, el término “fallo” pretende cubrir tales eventos de reducción de voltaje. El término “fallo” como se utiliza aquí pretende cubrir cualquier evento en el sistema de red que cree una reducción o aumento momentáneo en el voltaje de una o más fases. En el pasado, bajo estos fallos inadvertidos y grandes circunstancias de perturbación de potencia, ha sido aceptable y deseable la desconexión de una turbina eólica en el momento en que tuviera lugar la reducción de voltaje. Obrar de este modo no tiene un efecto perjudicial real en el suministro de electricidad cuando la penetración es baja. Sin embargo, esta regla de operación se encuentra bajo 20 revisión, y ahora es deseable que una turbina eólica permanezca en línea y tolere tal condición de bajo voltaje. Este nuevo modo de funcionamiento es similar a los requerimientos aplicados a fuentes de generación tradicionales, tales como plantas de generación síncronas alimentadas por combustible fósil. La razón para este requerimiento es sencilla; si la potencia eólica generada tiene un alto nivel de penetración, y tiene lugar un fallo momentáneo, la caída de una cantidad significativa de potencia eólica generada (como se requería bajo las reglas de funcionamiento antiguas) podría provocar problemas de estabilidad mucho más serios, tales como oscilaciones de frecuencia, o grandes inestabilidades a lo ancho del sistema en los sistemas de generación. Éstas son condiciones de fallo muy extensivas y pueden conducir a la perturbación de la potencia en grandes regiones, afectando a grandes cantidades de clientes de la red. El uso de turbinas eólicas de velocidad variable para generar potencia eléctrica presenta muchas ventajas, que incluyen una eficiencia de pala mayor que para las turbinas eólicas de velocidad constante, control de la potencia reactiva-VARs y del factor de potencia, y mitigación de las cargas mecánicas sobre la transmisión de la turbina. Los requerimientos de suministro ininterrumpido de bajo voltaje descritos anteriormente, denominados a menudo como tolerancia a fallos de red, se abordan más fácilmente asimismo utilizando cierta tecnología de turbina eólica de velocidad variable, como se divulgará aquí. Al considerar turbinas eólicas de velocidad variable, es importante examinar dos clases de convertidores de potencia que se utilizan y que podrían ser utilizados por la función de tolerancia a fallos de red. 25 30 35 40 45

50 Una turbina eólica de velocidad variable del estado de la técnica anterior utiliza un sistema de conversión total para rectificar completamente la totalidad de la potencia entregada por la turbina eólica. Esto es, la turbina eólica, funcionando a una frecuencia y voltaje variables, convierte esta potencia en una frecuencia y voltaje fijos que corresponden a los de la red. Un ejemplo de este tipo de sistemas se divulga en el documento de patente US 5.083.039 (incorporado a la presente memoria por referencia), que comprende un rotor de turbina que acciona una pareja de generadores AC de inducción de jaula de ardilla con dos convertidores de potencia respectivos, que convierten la salida del generador a un nivel de voltaje DC fijo. El bus DC de este sistema se acopla a continuación al inversor de red y la potencia se invierte a una frecuencia fija, y se suministra de nuevo a la red. El sistema de control del generador en la patente 5.083.039 utiliza principios de orientación de campo para controlar el par y utiliza procedimientos de control por potencia reactiva para controlar el inversor de red. Aunque la generación en esta turbina requiere sólo un flujo de potencia unidireccional, se requiere inherentemente un convertidor bidireccional, ya que los generadores de inducción necesitan ser excitados desde el bus DC. El bus DC en este sistema se controla desde la porción de inversor de red del sistema de conversión, y el control del bus DC es difícil cuando el voltaje de red cae sustancialmente. 55 60

65 Un segundo ejemplo de un sistema de conversión total se divulga en la solicitud de patente norteamericana US 10/773.851, y la solicitud de patente europea correspondiente de 5 de enero de 2005. Este sistema utiliza generadores síncronos junto con un rectificador pasivo y un inversor de red activo para convertir una frecuencia y voltaje de generador variables a una frecuencia y voltaje compatibles con la red. Este sistema es inherentemente unidireccional

en su capacidad para trasladar potencia del generador a la red. Una ventaja de este sistema es que el bus DC se controla desde el lado del generador del sistema de conversión de potencia, y el control del bus es sencillo durante los periodos de bajos voltajes de red. El funcionamiento paralelo de generadores síncronos que alimentan un bus DC se describe en el documento JP 2003 259 693.

5

Los documentos de patente US 6.137.187 y US 6.420.795 (ambos incorporados a la presente memoria por referencia) describen un sistema de conversión parcial y velocidad variable para su uso con turbinas eólicas. El sistema comprende un generador de inducción de rotor bobinado, un controlador de par y un controlador de ángulo de paso proporcional integral derivativo (PID). El controlador de par controla el par del generador utilizando control orientado a campo y el controlador PID realiza la regulación del ángulo de paso en base a la velocidad del rotor del generador. Al igual que la patente 5.083.39, el flujo de potencia es bidireccional en el rotor del generador y se utiliza un rectificador activo para el proceso de conversión. El convertidor utilizado en este sistema está limitado a sólo una porción del régimen total de la turbina, dependiendo la limitación del deslizamiento del generador deseado máximo en el diseño de la turbina. El convertidor controla la corriente y frecuencia en el circuito del rotor sólo con una conexión eléctrica directa entre el estator del generador y la red. Además de controlar el par, el convertidor es capaz de controlar la potencia reactiva del sistema o factor de potencia. Esto se consigue infraexcitando o sobreexcitando el circuito del rotor del generador junto a su eje de magnetización. El convertidor se conecta en paralelo a la conexión del estator/red, y sólo maneja la entrada y salida de potencia del rotor. Este sistema es difícil de controlar en el caso de una caída brusca en el voltaje de red. Esto es debido a que el bus DC del convertidor del rotor se controla desde el convertidor del lado de la red, justo como en la patente 5.083.039, y a que el estator del generador se conecta directamente a la red. La conexión directa del estator provoca problemas porque no hay ningún convertidor entre el estator y la red, y se generan pares y corrientes transitorias que no están sometidas a control por un controlador intermedio.

La solicitud de patente norteamericana US 10/733.687 (incorporada a la presente memoria por referencia) describe sistema para regular una turbina eólica conectada al nivel de distribución de la red en base al voltaje del sistema. La solicitud 10/733.687 está en contradicción con el hecho de que la mayoría de la generación eólica en los Estados Unidos está conectada a nivel de subtransmisión. Además, el procedimiento descrito no abordan las caídas súbitas y profundas del voltaje de red. En el documento EP 1.426.616 se considera el funcionamiento en carga débil.

Es deseable proporcionar una turbina de corriente de agua o eólica de velocidad variable, que tenga la capacidad de continuar el control del inversor durante un fallo de red, tal como una caída profunda, súbita del voltaje de red.

Es deseable, asimismo, proporcionar capacidad de tolerancia a fallos de red para un sistema de turbina de corriente de agua o eólica, en el cual el generador esté completamente desacoplado de una red de distribución y de sus perturbaciones.

Resumen de la invención

Brevemente, la invención es un aparato de acuerdo con la reivindicación 8 y un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para controlar un generador, en el cual se realiza una medida de frecuencia de voltaje y de ángulo de fase sobre una fase, se realiza una síntesis de plantillas de forma de onda de corriente para todas las fases en base a la medida de voltaje de la una fase, y en base de la forma de onda de corriente, se suministra corriente eléctrica a una red de distribución durante una condición de fallo a un nivel que es sustancialmente el mismo que en las condiciones previas al fallo.

45

La invención tiene la ventaja de que presenta la capacidad de continuar el control de inversor en un sistema de turbina eólica de velocidad variable durante un fallo de la red.

La invención presenta la ventaja de que proporciona un procedimiento para sintetizar plantillas de forma de onda de referencia de corriente trifásica balanceada bajo condiciones en las que la red es completamente funcional, pero asimismo cuando se presentan uno o más fallos en el sistema de transmisión y recogida de la red.

Le invención tiene la ventaja de que descansa en que esté operativa sólo una fase del sistema trifásico, y esta fase necesita estar operativa tan sólo a un 5% del voltaje nominal.

55

La presente invención presenta la ventaja de que el sistema requiere sólo de un pequeño nivel de voltaje para la sincronización, aproximadamente un 5% del voltaje, sobre la fase individual detectada del sistema trifásico, las referencias de corriente y, por lo tanto, las corrientes de inversor no se ven afectadas por un amplio intervalo de fallos. Condiciones de fallo a tierra, o fallos fase a fase sobre las dos fases no detectadas afectan poco o nada a las corrientes de referencia y de red. Fallos a tierra sobre la fase individual detectada, a nivel del sistema de recogida o de transmisión, producirán típicamente más de un voltaje del 5%, dadas las impedancias típicas de un sistema de granja eólica.

60

La presente invención presenta la ventaja de que el generador está completamente desacoplado de la red (y de sus perturbaciones) por el convertidor total. El sistema de convertidor parcial, por el contrario, no está completamente desacoplado, ya que el estator está conectado directamente a la red de distribución, y las perturbaciones de red provocan transitorios grandes que no pueden ser amortiguados o desacoplados por el convertidor.

65

ES 2 330 229 T3

La presente invención presenta la ventaja de que proporciona al sistema capacidad de tolerancia frente a perturbaciones y fallos de la red por medio de una función de síntesis de referencia de corriente robusta y una aproximación simplificada de comando del par de generador.

5 La presente invención presenta la ventaja de que proporciona al sistema síntesis de las referencias de corriente trifásica a partir de la detección de una fase individual.

10 La presente invención presenta la ventaja de que proporciona al sistema el funcionamiento de la función de síntesis trifásica hasta un voltaje muy bajo, de aproximadamente un voltaje de línea del 5%, durante una condición de fallo de la fase detectada.

15 La presente invención presenta la ventaja de que proporciona al sistema plantillas de corriente libres de distorsión por medio del uso de tablas de referencia equilibradas, trifásicas, sinusoidales o funciones trigonométricas seno computadas.

20 La invención presenta la ventaja adicional de que, con el fin de que el sistema funcione, sólo se necesita que haya una señal de frecuencia detectable en la línea de potencia a la salida del inversor. Como se detecta frecuencia incluso durante una condición de fallo de red, el inversor continúa inyectando corriente en la línea de un modo trifásico balanceado con una forma casi puramente sinusoidal a la frecuencia detectada, con el ángulo de fase apropiado para las tres fases.

Breve descripción de las figuras

25 La figura 1 muestra un esquema eléctrico de un montaje de turbinas eólicas que emplea inversores modulados en ancho de pulso (PWM) regulados en corriente, conectados a un sistema de recogida de granja eólica y a un sistema de subtransmisión de red en el que se materializa la presente invención;

30 la figura 2 muestra un esquema eléctrico de un inversor individual PWM regulado en corriente y una turbina eólica de velocidad variable de acuerdo con una realización de la presente invención;

la figura 3 muestra una serie temporal de voltaje fase a tierra y fase a fase en las tres fases del sistema de red antes, durante, y tras un fallo de red;

35 la figura 4 muestra una serie temporal expandida de corriente inyectada en el sistema de red durante el período de tiempo en el que se inicia un fallo instantáneo;

la figura 5 muestra una serie temporal de corriente inyectada en el sistema de red durante el periodo de tiempo en el que un fallo desaparece instantáneamente; y

40 la figura 6 muestra una realización de un circuito de control del inversor de acuerdo con la presente invención que utiliza un bucle de enganche de fase.

Descripción detallada de la invención

45 En referencia a la figura 1, que muestra un conjunto de generadores con sistemas de inversor regulados en corriente en la forma de una granja energética de corriente de agua o eólica 1. Turbinas eólicas 3 individuales se conectan a un sistema de recogida 5 de una granja eólica. El sistema de recogida 5 de la granja energética puede interactuar con sistema 7 de distribución, subtransmisión o transmisión de red por medio de una subestación transformadora 9. El sistema de recogida 5 de la granja energética puede aislar grupos 11 de turbinas eólicas utilizando dispositivos de sectorización 13. Los dispositivos de sectorización, a menudo disyuntores o fusibles, aíslan un grupo de turbinas 11 en el caso de un fallo eléctrico dentro del grupo de turbinas 11, permitiendo así que el resto de la granja eólica 1 continúe funcionando. Grupos de turbinas (tales como el 11) están conectados en común al sistema de recogida 5 de la granja energética para interactuar con la red eléctrica 7.

55 La granja energética 1 se compone de turbinas de flujo de fluido 3, mostradas en detalle en la figura 2. Cada turbina de flujo de fluido tiene un rotor 15. Una salida del rotor es potencia rotacional. Un generador 17 se conecta a la salida del rotor, siendo una salida del generador potencia eléctrica. Un inversor 23 se conecta a la salida del generador 17, siendo condicionada al menos una porción de la salida de potencia eléctrica por el inversor, lo que resulta en un voltaje y una corriente de salida del inversor a una frecuencia y ángulo de fase adecuados para su transmisión a la red 7. Cada turbina de flujo de fluido tiene un sistema de control 24 que tiene una entrada y una salida del sistema de control conectadas al inversor. La granja energética tiene un sistema de recogida 5 conectado a la red. Un grupo de turbinas de flujo de fluido 11 tienen sus salidas de inversor conectadas al sistema de recogida 5. Un sensor 8 de ángulo de fase y frecuencia se conecta a la red en un punto adecuado para funcionar durante un fallo en la red. Cada turbina tiene su entrada del sistema de control conectada al sensor. Cada sistema de control produce una salida que es una señal de comando de corriente que permite que el inversor al que está conectado saque una forma de onda de corriente que es de la misma fase y frecuencia que la detectada por el sensor 8. En lugar del sensor común mostrado en la figura 1, cada turbina puede tener su propio sensor, como se muestra en la figura 2.

ES 2 330 229 T3

Además de los dispositivos de sectorización 13, la granja energética incluye asimismo típicamente dispositivos adicionales de protección y aislamiento en la subestación 9, y asimismo en el controlador de cada turbina eólica 3 individual. Tales dispositivos de protección adicionales incluirían típicamente mecanismos de disparo por sobre e infra voltaje y sobre e infra frecuencia. Estos mecanismos de disparo están coordinados entre sí y con la subestación para proporcionar un esquema de protección deseado.

En referencia a la figura 2, en la que se muestran esquemáticamente componentes de una turbina eólica 3 individual de la figura 1. Un rotor 15 convierte energía de un flujo de fluido, tal como viento o una corriente de agua, en energía cinética rotacional. Un generador 17 convierte la energía cinética rotacional en potencia eléctrica AC de frecuencia variable. Un rectificador 19 convierte la potencia AC en DC. Un enlace DC 21 tiene alguna capacidad de almacenamiento de energía DC para estabilizar transitorios pequeños. Un inversor 23 regulado en corriente convierte la potencia DC a potencia AC a la frecuencia de red. Un circuito de control del inversor 24 incorpora muchas funciones de control de turbina. Se proporciona un dispositivo de protección 25, tal como un disyuntor de circuito y/o un fusible para aislar la turbina 3 en caso de fallo. Un transformador tipo pedestal 27 cambia el voltaje de la potencia producida al voltaje del sistema de recogida 5 de la granja energética. La turbina eólica produce habitualmente potencia a bajo voltaje, tal como 575 VAC o 690 VAC, y el sistema de recogida es típicamente de mayor voltaje, tal como 34,5 kV. La turbina eólica 3 y el sistema de recogida 5 se muestran funcionando con potencia trifásica. La presente invención podría incluir el uso de potencia de una única fase o potencia con cualquier número de fases. El diseño del rotor 15 entra dentro de las habilidades del experto de la técnica y podrían realizarse utilizando las técnicas descritas en Wind Energy Handbook, escrito por Burton, Sharpe, Jenkins y Bossanyi, y publicado por John Wiley & Sons en 2001, Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, escrito por Gasch y Twele, y publicado por James & James en 2002, Wind Turbine Engineering Design, escrito por Eggleston y Stoddard y publicado por Van Nostrand Reinhold en 1987, Windturbines, escrito por Hau y publicado por Springer en 2000, Wind Turbine Technology, editado por Spera y publicado por ASME Press en 1994, y Wind Energy Conversion Systems, escrito por Freris y publicado por Prentice Hall en 1990, todos los cuales se incorporan aquí por referencia. Información sobre diseño de transformadores, puesta a tierra, potencia, calidad, y otros aspectos de la integración de granjas energética con la red se puede encontrar en Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, escrito por Heier y publicado por John Wiley & Sons, Inc, 2002, ISBN: 0-471-97143-X, que se incorporan a la presente memoria por referencia.

El circuito de control del inversor 24 puede ser relativamente sencillo o muy complejo, incorporando muchas funciones de control de turbina. El circuito de control de inversor puede ser un circuito independiente simplemente para las funciones relativas a la técnica de la presente invención, o puede ser simplemente una parte del inversor o algún otro componente del sistema de turbina eólica, o aspectos del circuito de control 24 se distribuyen entre componentes. El circuito de control del inversor mostrado en la figura 2 es menos un componente físico separado de la turbina eólica, sino más bien se muestra para ilustrar la técnica de la presente invención. El circuito de control del inversor 24 contiene aquellos elementos utilizados normalmente en la regulación de corrientes de línea AC, como se describe, por ejemplo, en Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins Power Electronics: Converters, Applications, and Design, publicado por John Wiley & Sons; 3ª edición (Octubre 2002) ISBN: 0471226939, y W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, 1985, ambos incorporados a la presente memoria por referencia.

El circuito de control del inversor 24 detecta una señal de voltaje 30 de una fase individual del lado de bajo voltaje de transformador tipo pedestal 27. La técnica de la presente invención trabajará detectando voltaje de una fase solamente, pero se concibe que el circuito de control del inversor 24 pudiera detectar las tres fases y, en el caso de una condición de fallo, elegir rastrear la más fuerte de las tres o rastrear las tres independientemente. El circuito de control del inversor 24 puede utilizar sólo información de frecuencia y fase de la señal recibida 30. La amplitud de la señal de voltaje es relativamente poco importante. La frecuencia y fase se pueden detectar incluso si el voltaje es cero en el punto de fallo en una localización distante en el sistema de transmisión, subtransmisión, distribución o recogida, la impedancia entre el generador y el fallo creará aun así una forma de onda de voltaje en tanto en cuanto se suministre corriente.

La figura 3 muestra las formas de onda de voltaje de fase a tierra y fase a fase en la localización de conexión de la turbina eólica antes 18, durante 20 y después 22 de un fallo de fase individual a tierra simulado (el tipo de fallo más común). Se puede observar que incluso la fase que falla presenta todavía una fase y frecuencia detectables. Otros tipos de fallos de transmisión, incluyendo un fallo fase a fase y un fallo simétrico trifásico mostrarían formas de onda similares, todas las cuales tendrían fase y frecuencia detectables si se suministra corriente del generador. Una vez que se ha determinado la frecuencia y la fase de una forma de onda de voltaje, el circuito de control del inversor 24 genera entonces una señal 32 de comando de corriente (en la línea quebrada) que da instrucciones al inversor 23 para sacar una plantilla de forma de onda de corriente al dispositivo de protección 25, plantilla que es de la misma fase y frecuencia. En un sistema trifásico balanceado, esto consistiría en una fase a 0°, una fase desplazada 120° y una tercera fase desplazada 240°. La forma de onda de corriente es, a diferencia de la forma de onda de voltaje detectada 30, de forma casi perfectamente sinusoidal (a la que podría no conducir el voltaje y durante una condición de fallo), y su magnitud no depende de la magnitud del voltaje de línea. El dispositivo de protección 25 está conectado al transformador tipo pedestal 27, que cambia el voltaje de la potencia producida al voltaje del sistema de recogida 5 de la granja energética.

Las señales de comando de corriente 32 pueden generarse digitalmente utilizando tablas de referencia o utilizando circuitería analógica, o pueden ser una rutina de software que ejecuta una función trigonométrico seno. Para el caso de una turbina eólica que se discute aquí, la estrategia es dejar el nivel del comando de corriente AC 32 constante durante el fallo. Esto se hace ya que los fallos discutidos aquí son de corta duración y el impacto en el sistema de turbina eólica

ES 2 330 229 T3

es mínimo. Asimismo, cuando la red retorna a valores normales, el sistema de turbina eólica vuelve justo a donde quedó antes del fallo, de un modo libre de irregularidades. Antes 18, durante 20, y después 22 (de un fallo), el inversor regulado en corriente aplica el mismo suministro de corriente al sistema de red con tan sólo perturbaciones menores en la corriente.

5 Las figuras 4 y 5 muestran formas de onda de corriente simuladas del generador al inicio y al término de una condición de fallo fase a tierra individual, respectivamente. De este modo, un generador con un inversor regulado en corriente puede ser forzado a “tolerar” una breve condición de fallo sin desconectarse de la red o añadir una perturbación sustancial al sistema de recogida y de subtransmisión al término del fallo. Una técnica para conseguir la función anterior del controlador de circuito del inversor 24 es utilizar un bucle de enganche de fase, una técnica familiar a aquellos expertos en la técnica y descrita en F.M. Gardner, *Phase-lock Techniques* (2ª edición), Wiley (1979) o en Roland E. Best, *Phase-locked Loops*, McGraw-Hill (1993), ambas incorporadas aquí por referencia. Son posibles ciertamente otras técnicas aparte de la de bucle de enganche de fase para alcanzar el efecto deseado y se entienden dentro del ámbito de la presente invención. El circuito de control del inversor 24 se puede realizar como un componente hardware físico o se puede implementar en software utilizando un microprocesador.

La figura 6 muestra elementos de un circuito de control del inversor 24 utilizado en un bucle de enganche de fase. Mostrar un circuito de control del inversor 24 de este modo no limita en modo alguno la técnica de la presente invención a esta topología específica, sino que antes bien ilustra un modo en el cual la técnica de la presente invención puede ser implementada. El voltaje de línea 30 detectado se multiplica 33 por una señal correctiva 34 de un bucle de enganche de fase. Como la señal correctiva 34 está idealmente a 90° fuera de fase con la señal de entrada 30, y ambas señales son de 60 Hz, la señal resultante 36 es una señal sinusoidal de 120 Hz con un desfase DC relativo a la diferencia de fase entre la señal de entrada 30 y la señal correctiva 34. Una diferencia de fase de exactamente 90° produce un desfase DC cero. La señal resultante 36 pasa entonces a un filtro 38 de paso bajo, que retira la componente de 120 Hz de la señal resultante, dejando tan sólo una señal DC 40. Esta señal DC 40 se pasa a través de un regulador proporcional integral (P-I) 42, que se ajusta para controlar la dinámica de la respuesta del circuito de control del inversor 24. La salida 44 del P-I es una señal DC que se añade a una salida 46 de un generador de ondas triangulares 48. El generador de ondas triangulares 48 produce una onda triangular continua de 60 Hz. La señal de salida 44 del P-I y la señal de onda triangular se suman en 50. La señal suma 52 pasa a continuación a través de una función coseno 54 que es la señal correctiva 34. La señal de salida 44 del P-I se escala de modo que, al añadirla a la onda triangular 46, la señal correctiva 34 se desplaza en fase para acercarse a un desfase de 90° con la señal de entrada 30. La señal suma 52 se conecta a un conjunto de circuitos de desplazamiento de fase paralelos 61, 63, 65, en los que la señal suma se somete a una función de desplazamiento de fase de -240° 61, una función de desplazamiento de fase de -120° 63, y una función de desplazamiento de fase de -0° 65 de modo paralelo. Un conjunto de circuitos de función trigonométrica seno 56 se conecta a un conjunto de circuitos de desplazamiento de fase paralelos que producen una onda sinusoidal de referencia de amplitud fija 58 de 60 Hz (u otra frecuencia apropiada a la frecuencia de red), sustancialmente en fase con la red. De este modo, se genera un conjunto de señales de referencia de corriente trifásica balanceada de amplitud unidad 58. El conjunto de forma de onda sinusoidal de referencia 58 se escala a continuación por un conjunto de circuitos multiplicadores de escala 59 multiplicando un valor DC 60 que corresponde al nivel de corriente de salida AC deseado, produciendo una señal sinusoidal escalada que es la señal de comando de corriente 32. Este valor DC se establece por un controlador de turbina para establecer el nivel de corriente AC. Este nivel de corriente es aproximadamente proporcional al nivel del par del generador y se basa en un conjunto de entradas. La señal de comando de corriente 32 ajustará la corriente de salida del inversor sustancialmente en fase con el voltaje de las tres fases de la red. La magnitud de la señal escalada 60 no se determina directamente por la señal de voltaje de entrada 30, y así pues la cantidad de corriente comandada del inversor 23 no varía sustancialmente con cambios en la señal de voltaje de entrada 30. El inversor 23 inyectará corriente en la línea de red de magnitud, frecuencia y fase correspondientes a la señal de comando de corriente, independientemente del voltaje en la línea de red. Las técnicas para producir un inversor capaz de tal inserción de corriente son bien conocidas por aquellos expertos en la técnica y pueden ser encontradas en Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, editado por John Wiley & Sons; 3ª edición (Octubre 2002) ISBN: 0471226939, y W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, 1985.

Para ilustrar la presente invención, su funcionamiento se describe como si funcionara en una turbina eólica 3 similar a la divulgada en la solicitud de patente norteamericana US 10/773.851. En el caso de un fallo, el circuito de control del inversor 24 comanda sustancialmente la misma corriente durante la duración de la condición de fallo que la que existía inmediatamente antes del fallo. La técnica de control utilizada en la turbina eólica 3 anteriormente mencionada controla la salida de corriente en base al par deseado del rotor 15. El control del par deseado tiene una constante de tiempo del orden de segundos en comparación con los milisegundos de la duración del fallo. Durante un fallo, mostrado con una duración temporal 20, el voltaje es menor que el normal en al menos en una de las fases (véase la figura 3). Así pues, con la misma corriente fluyendo que en el periodo de tiempo previo al fallo (designado como condición 18) hay menos potencia transmitida a la red durante el periodo de fallo 20. En el caso de la turbina 3 anteriormente mencionada, esto provoca que el voltaje en el enlace DC 21 suba ligeramente, lo que disminuirá el par que el generador 17 aplica al rotor 15, causando que rotor 15 se acelere ligeramente. La cantidad de energía que necesita ser absorbida durante 150 ms o incluso durante 500 ms es lo suficientemente pequeña para que esté bien dentro del intervalo de velocidades permitidas del rotor 15. Una vez que el fallo ha pasado 22, la turbina eólica 3 se regula asimismo normalmente, disipando la energía extra a la red a través del cabeceo de las palas del rotor. De hecho, la cantidad de energía que debe ser absorbida con el fin de permitir que un generador funcione a través de un fallo transitorio es lo suficientemente pequeña para que la energía que se pudiera almacenar simplemente a medida que sube el voltaje en el enlace DC 21 (o el equivalente en otros tipos de generadores). La energía almacenada de

esta magnitud (decenas a cientos de vatios-hora para un generador de 1,5 MW, dependiendo del tipo y duración del fallo) está fácilmente disponible, siendo ejemplos de tales dispositivos de almacenamiento de energía supercapacitores y baterías de amperaje instantáneo. El ejemplo anterior tiene tan sólo el propósito de ilustrar la técnica de la presente invención en una aplicación específica, pero en modo alguno limita el ámbito de la invención.

5

La capacidad de tolerar tales fallos es imperativa para que tales tipos de generación logren suponer un porcentaje significativo de la generación en un sistema de distribución. La mayoría de cargas en el sistema de distribución esperan la misma disponibilidad de potencia tras un fallo 22 que antes 18, de modo que si una gran porción de la generación en un sistema de distribución se desconecta o suministra una baja calidad de potencia debido a tal fallo, entonces la fiabilidad del sistema de red se ve comprometida. Actualmente esto es significativo para la industria de generación eólica, que hasta ahora ha sido una pequeña parte del suministro eléctrico nacional. El rápido crecimiento de la generación de potencia eólica ha provocado que se convierta en una fuente significativa de potencia en algunas regiones, y se proyecta que alcance un porcentaje significativo del suministro eléctrico nacional en el futuro próximo. Así pues, dotar a los generadores eólicos con la capacidad de tolerar una condición de fallo de red (este es un requerimiento que se exige a la mayoría de otras fuentes principales de generación) es una necesidad apremiante. La misma necesidad se aplicará a otras formas de generación de fuentes de corriente, a medida que esas tecnologías alcancen niveles de penetración significativos.

La presente invención se muestra y describe en un conjunto de diferentes realizaciones. Existen otras realizaciones de esta invención más allá de aquéllas descritas específicamente. Estas otras realizaciones, aunque no se describan aquí específicamente, están implícitas de las realizaciones descritas, o se entenderán de las mismas por el experto en la técnica.

La presente invención involucra un generador con un sistema de inversor regulado en corriente interconectado con un sistema de conducción eléctrica. En esta descripción, el generador con un inversor regulado en corriente se describe como un sistema de turbina eólica de conversión total consistente con la patente US 5.983.039. Este sistema de generación rectifica toda la salida del generador eólico para producir electricidad DC, que a continuación se convierte de nuevo en AC a la frecuencia y fase de la red mediante un inversor modulado en anchura de pulso (PWM) regulado en corriente. Aquellos expertos en la técnica entenderán que otros generadores con un inversor regulado en corriente podrán emplear la técnica de la presente invención, incluyendo otras topologías de turbinas eólicas, turbinas de corriente de agua, sistemas de célula de combustible, sistemas fotovoltaicos, generadores diésel, y otras fuentes de generación de potencia. Además, la presente invención se puede utilizar asimismo con una turbina de velocidad variable que utilice conversión parcial de la salida del generador, como se describe en las patentes US 6.137.187 y US 6.420.795. La invención se puede utilizar con una turbina eólica que incluya bien un generador síncrono o un generador de inducción.

En la presente memoria, el sistema de conducción eléctrica se describe como una red de distribución eléctrica con el generador y el inversor regulado en corriente conectados a un sistema de recogida, y además colectivamente al nivel de subtransmisión con generadores similares a través de un transformador de subestación. Estas especificidades son sólo para propósitos ilustrativos, ya que este es un modo típico de que la energía de turbinas eólicas se interconecte con el sistema de red. La técnica de la presente invención funciona para un generador individual así como para un grupo colectivo. La presente invención se puede usar asimismo en conexión con el nivel de distribución de la red, así como con el nivel de transmisión de muy alto voltaje de un sistema de red de distribución. Además, esta técnica se puede emplear en aplicaciones aisladas o en pequeños sistemas de potencia de poblaciones aisladas.

Los ejemplos anteriores de generadores de fuente de corriente alterna y de sistemas de conducción eléctrica pretenden demostrar la naturaleza no exclusiva de la técnica de la presente invención, y no son limitativos en modo alguno. Los expertos en la técnica se darán cuenta de que, aunque la invención se describe como un sistema de conversión total, se puede aplicar igualmente a la porción del convertidor de rotor de sistemas de conversión parcial. En este último caso, la capacidad de tolerar una perturbación de red está aun obstaculizada por la conexión directa del estator a la red, que no puede ser amortiguado por el sistema de convertidor. Más en general, la invención descrita aquí se refiere a una técnica para tolerar fallos de una red para cualquier generador con un sistema de inversor regulado en corriente.

Los expertos en la técnica se darán cuenta igualmente de que mirando solamente a una fase del sistema trifásico para determinar frecuencia y ángulo eléctrico, se construye una plantilla de corriente trifásica balanceada y se utiliza para el propósito de controlar la corriente de inversor de una turbina eólica. Mirando solamente a una fase del sistema trifásico, las otras dos fases se sintetizan a -120 y -240 grados eléctricos para formar un sistema trifásico balanceado de corrientes de referencia. El inversor utilizado es típicamente un inversor modulado en anchura de pulso, regulado en corriente, denominado a menudo como inversor de tipo CRPWM. Este sistema de inversor tiene la capacidad de regular instantáneamente corrientes de red siguiendo un conjunto de corrientes de referencia como las generadas por la invención descrita aquí. Los expertos en la técnica entenderán que se podrían utilizar otros tipos de inversores regulados en corriente, tales como inversores de fuente de corriente PWM actuales e inversores multinivel.

Debe hacerse notar que debido a las impedancias entre el sistema de convertidor de turbina eólica y el sistema de subtransmisión (transformadores tipo pedestal, transformadores de subestación, longitud de conductores, etc.) habrá algún voltaje en el generador, incluso si el voltaje en el fallo del sistema de transmisión o recogida es cero. Como las corrientes de inversor siguen estas curvas de referencia, las corrientes de red permanecen casi balanceadas incluso si

ES 2 330 229 T3

los voltajes no están balanceados entre fases, e incluso si la forma de onda en la fase detectada está significativamente distorsionada. De este modo, se inyecta corriente en el sistema de red a sustancialmente el mismo nivel durante un fallo que en una condición previa al fallo. Como la corriente permanece igual, pero el voltaje es significativamente inferior en al menos una fase, se transmite menos potencia a la red de distribución. Aquellos expertos en la técnica comprenderán que cuando este sistema está funcionando en una turbina eólica de velocidad variable, el exceso de energía se absorbe simplemente como una pequeña aceleración del rotor. Además, como el periodo de fallo para estas perturbaciones transitorias no excede generalmente los 500 ms, la energía total que se necesita absorber como energía cinética en el rotor de la turbina eólica no provoca que se desarrolle una velocidad excesiva en el rotor de la turbina.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ES 2 330 229 T3

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para controlar un generador de potencia, en particular una turbina eólica o de corriente de agua, conectada a un circuito eléctrico que tiene múltiples fases, que comprende la etapas de:
- A. medir una frecuencia de voltaje y un ángulo de fase en una fase de dicho circuito eléctrico;
 - 10 B. sintetizar plantillas de forma de onda de corriente para las fases de dicho circuito eléctrico en base a una medida de voltaje de dicha una fase; y
 - C. utilizar dichas plantillas de forma de onda de corriente para suministrar corriente eléctrica a dichas fases de dicho circuito eléctrico durante una condición de fallo.
- 15 2. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende una etapa de evaluar la forma de onda de voltaje en varias fases de dicho circuito eléctrico para determinar dicha una fase en la que medir frecuencia de voltaje y ángulo de fase.
- 20 3. El procedimiento de acuerdo con la reivindicaciones 1 o 2, en el que dicha etapa de sintetizar plantillas de forma de onda de corriente se realiza mediante un circuito analógico, mediante un bucle de enganche de fase y/o mediante un software en un microprocesador.
- 25 4. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, con un sistema de inversor regulado en corriente y en el que el circuito eléctrico es un sistema eléctrico de múltiples fases, aplicándose el procedimiento de control durante un fallo de red.
- 30 5. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la magnitud de las corrientes transmitidas a dicho sistema eléctrico durante dicho fallo de red se establece para que sea la misma que la magnitud de las corrientes transmitidas a dicho sistema eléctrico inmediatamente antes de dicho fallo de red.
- 35 6. El procedimiento de acuerdo a las reivindicaciones 4 o 5, que comprende además una etapa de evaluar la forma de onda de voltaje en todas las fases de dicho sistema eléctrico y determinar la fase en la que detectar dicha frecuencia de voltaje y dicho ángulo de fase.
- 40 7. El procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 4-6, en el que dicha etapa de sintetizar plantillas de forma de onda de corriente se realiza mediante un circuito analógico, un bucle de enganche de fase y/o un software en un microprocesador.
- 45 8. Una turbina de flujo de fluido (3), en particular una turbina eólica o de corriente de agua , con capacidad de tolerancia a fallos de red a bajo voltaje, que comprende:
- un rotor (15) que tiene al menos una pala, siendo una salida de dicho rotor potencia rotacional;
 - un generador (17) conectado a dicha salida de dicho rotor (15), siendo una salida de dicho generador potencia eléctrica;
 - un inversor (23) conectado a dicha salida de dicho generador (17), siendo condicionada al menos una porción de dicha salida de potencia eléctrica por dicho inversor (23), dando como resultado un voltaje de salida del inversor y una corriente a una frecuencia y ángulo de fase adecuados para su transmisión a una red de distribución multifásica (7);
 - un sensor (8) de frecuencia y ángulo de fase conectado a dicha red de distribución (7), operativo durante un fallo de dicha red (7) para detectar voltaje y ángulo de fase en una fase; y
 - un sistema de control (24) que tiene una entrada del sistema de control conectada a dicho sensor (8) y una salida del sistema de control conectada a dicho inversor;
 - estado adaptado dicho sistema de control (24) para sintetizar plantillas de forma de onda de corriente para todas las fases en base a un voltaje detectado en una fase y para transmitir corriente a todas las fases del sistema eléctrico en base a plantillas de forma de onda de corriente sintetizadas;
 - siendo la salida de dicho sistema de control una señal de comando de corriente que le permite a dicho inversor (23) sacar una forma de onda de corriente que es de la misma fase y frecuencia que la detectada por dicho sensor (8).
- 65 9. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicho generador es un generador síncrono y que comprende además un rectificador para convertir potencia AC de dicho generador en potencia DC.

ES 2 330 229 T3

10. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 o 9, en la que dicha red de distribución es un sistema trifásico, y en la que dicho sensor detecta la frecuencia y ángulo de fase del voltaje en una fase de dicha red de distribución trifásica durante un fallo en dicha red de distribución.
- 5 11. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-10, en la que dicho sensor monitoriza todas las fases de dicha red de distribución multifásica y selecciona una fase sobre la cual detectar la frecuencia y ángulo de fase del voltaje.
- 10 12. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicho sistema de control controla dicho inversor para proporcionar corriente a dicha red a sustancialmente la misma magnitud a la que se proporcionaba inmediatamente antes de dicho fallo.
- 15 13. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicho sistema de control se implementa en hardware como un circuito analógico o un bucle de enganche de fase o se implementa mediante software en un microprocesador.
- 20 14. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicha turbina se conecta a dicha red de distribución a un voltaje de nivel de distribución.
- 25 15. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicha turbina es una de una pluralidad de turbinas de flujo de fluido conectadas a dicha red de distribución a través de una subestación común, en la que dicha pluralidad de turbinas se conectan a dicha red de distribución a un voltaje de nivel de subtransmisión o a un voltaje de nivel de transmisión.
- 30 16. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, en la que dicho sistema de control comprende:
- una señal correctiva (34) de un bucle de enganche de fase;
 - un multiplicador (33) conectado a dicha entrada del sistema de control y a dicha señal correctiva, siendo una señal de salida (36) de dicho multiplicador dicho voltaje de línea de entrada (30) multiplicado por dicha señal correctiva (34), siendo además dicha señal de salida (36) una componente de señal sinusoidal con un desfase DC relativo a una diferencia de fase entre dicha señal de entrada y dicha señal correctiva;
 - un filtro de paso bajo (38) conectado a dicha señal de salida (36) de dicho multiplicador (33), siendo una salida de dicho filtro de paso bajo (38) una señal DC ausente en dicha componente de señal sinusoidal;
 - un regulador proporcional integral (P-I) (42) conectado a dicha salida de dicho filtro de paso bajo, teniendo dicho regulador proporcional integral (42) una salida de regulador PI;
 - 40 un circuito de suma (50) conectado a dicha salida del regulador P-I;
 - un generador de ondas triangulares (48) conectado a una entrada de dicho circuito de suma, siendo una salida de dicho generador de ondas triangulares de dicho generador de ondas triangulares una onda triangular AC continua, siendo una salida del circuito de suma una suma de dicha salida del regulador P-I y dicha salida del generador de ondas triangulares; y
 - 45 un circuito de función coseno (54) conectado a dicha salida del circuito de suma, siendo una salida de dicho circuito de función coseno una señal correctiva (34).
- 50 17. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 16, que comprende además:
- un número de circuitos de desplazamiento de fase paralelos conectados a dicha salida de dicho circuito de suma, uno de tales circuitos de desplazamiento de fase para cada fase de dicha red de distribución multifásica;
 - 55 un número de circuitos de función trigonométrica seno, conectados a dicho número de circuitos de desplazamiento de fase paralelos, siendo la salida de cada circuito de función trigonométrica seno una onda sinusoidal de referencia de amplitud fija a una frecuencia adecuada a la frecuencia de la red de distribución y sustancialmente en fase con dicha red de distribución;
 - 60 un circuito de valor DC que tiene una salida DC que corresponde a un nivel de corriente de salida AC deseado; y
 - 65 un número de circuitos multiplicadores de escalado conectados a dicho número de circuitos de función trigonométrica seno y a dicha salida de valor DC, siendo las salidas de dichos circuitos de escalado señales sinusoidales escaladas para cada fase.

ES 2 330 229 T3

18. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 16, en la que dicho regulador P-I se ajusta para controlar la dinámica de la respuesta del circuito de control del inversor.

5 19. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 17, en la que dicho circuito de valor DC se ajusta mediante un controlador de turbina a dicho nivel de corriente AC proporcional a un nivel de par de generador.

10 20. La turbina de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 18 en la que dicha señal de salida P-I se escala de tal modo que añadiéndola a dicha salida de onda triangular dicha señal correctiva está desplazada en fase para acercarla a un desfase de 90° con dicha entrada del sistema de control.

15 21. Una granja energética (1) configurada para interactuar con una red de distribución (7), estando compuesta dicha granja energética de turbinas de flujo de fluido de acuerdo con la reivindicación 8, teniendo cada turbina de flujo de fluido (3) un rotor (15), siendo una salida de dicho rotor una potencia rotacional; un generador (17) conectado a dicha salida de dicho rotor, siendo una salida de dicho generador una potencia eléctrica; un inversor (23) conectado a dicha salida de dicho generador (17), estando condicionada al menos una porción de dicha salida de potencia eléctrica por dicho inversor, dando como resultado un voltaje de salida del inversor y una corriente a una frecuencia y ángulo de fase adecuados para su transmisión a dicha red de distribución; y un sistema de control (24) que tiene una entrada y una salida del sistema de control conectadas a dicho inversor, comprendiendo además dicha granja energética:

20 un sistema de recogida (5) conectado a dicha red de distribución;

teniendo un grupo de dichas turbinas de flujo de fluido (11) salidas del inversor conectadas a dicho sistema de recogida; y

25 un sensor (8) de frecuencia y ángulo de fase conectado a dicha red de distribución (7) operativo durante un fallo en dicha red;

30 teniendo cada uno de dichos sistemas de control una entrada del sistema de control conectada a dicho sensor (8);

siendo cada una de dichas salidas del sistema de control una señal de comando de corriente que permite que cada inversor (23) saque una forma de onda de corriente que es de la misma fase y frecuencia que las detectadas por dicho sensor (8).

35 22. La granja energética de acuerdo con la reivindicación 21, en la que dicho grupo de turbinas de flujo de fluido se conectan a dicha red de distribución a un voltaje de nivel de distribución.

40 23. La granja energética de acuerdo con la reivindicación 21, en la que dicho grupo de turbinas de flujo de fluido se conectan a dicha red de distribución a través de una subestación común.

45 24. La granja energética de acuerdo con la reivindicación 21, en la que dicho grupo de turbinas de flujo de fluido se conectan a dicha red de distribución a un voltaje de nivel de subtransmisión o a un voltaje de nivel de transmisión.

50

55

60

65

70

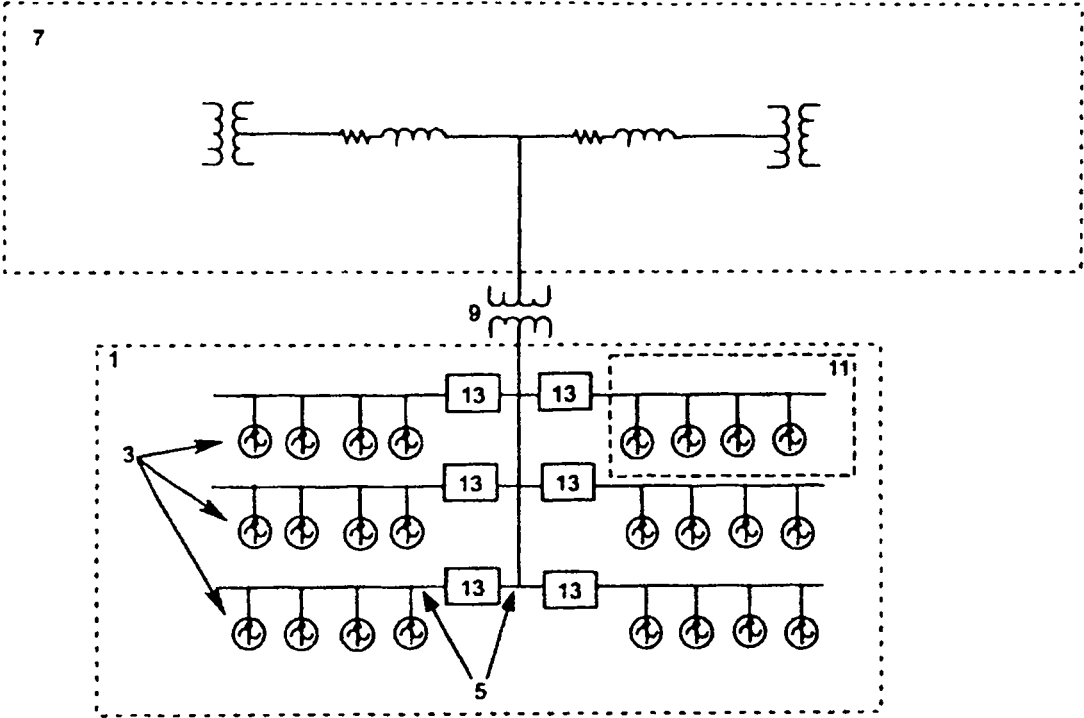


FIGURA 1

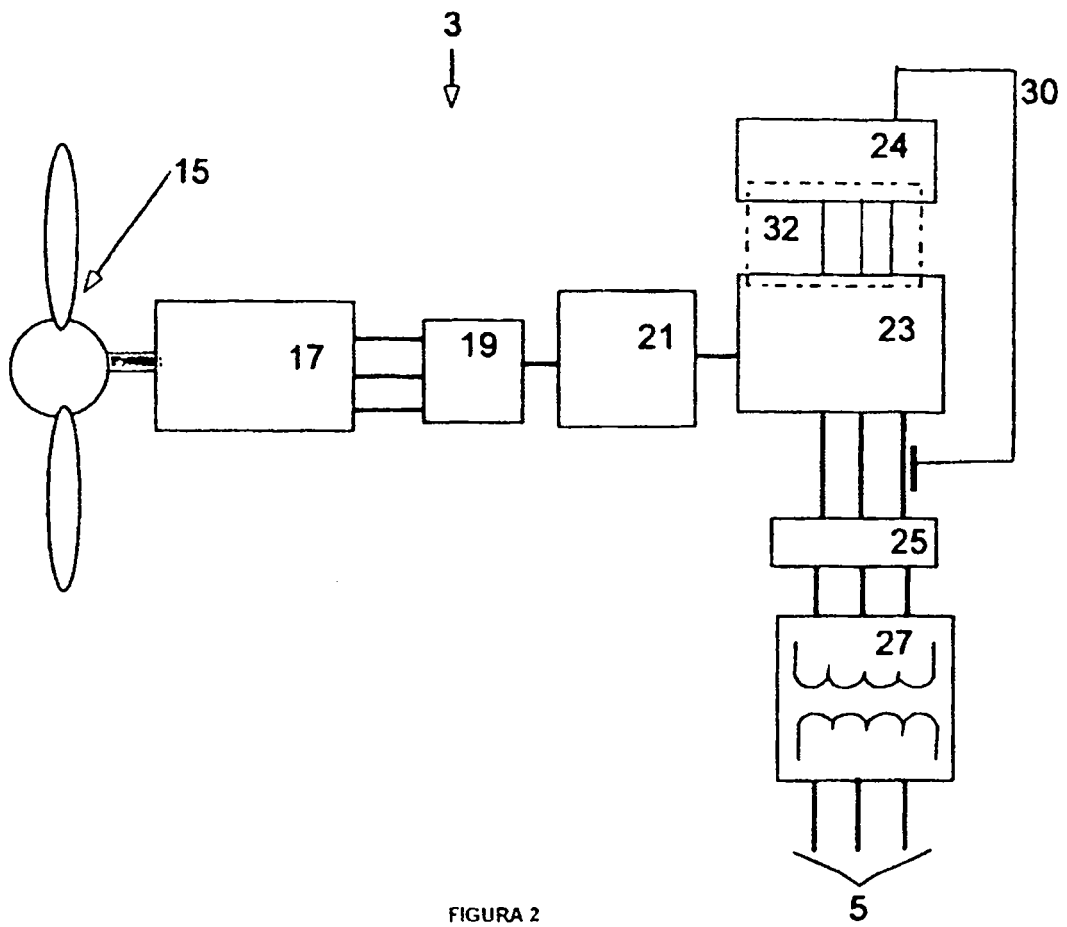


FIGURA 2

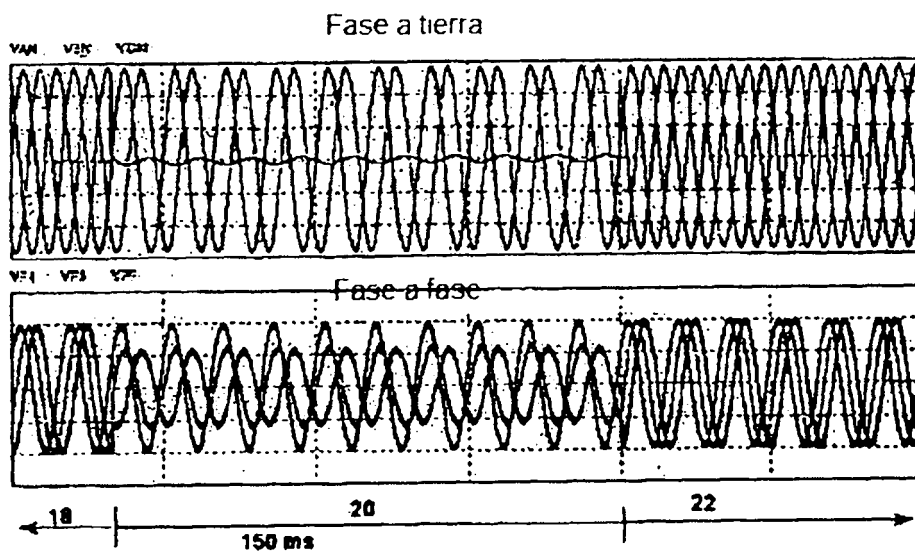


FIGURA 3

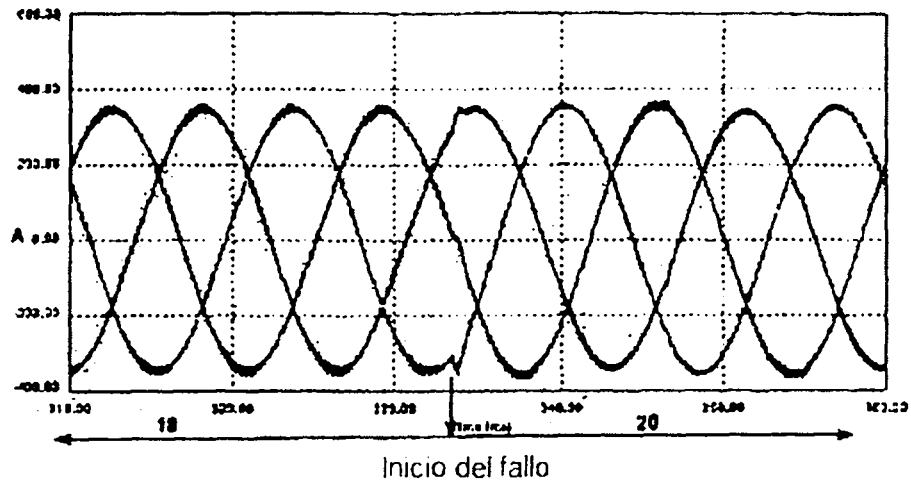


FIGURA 4

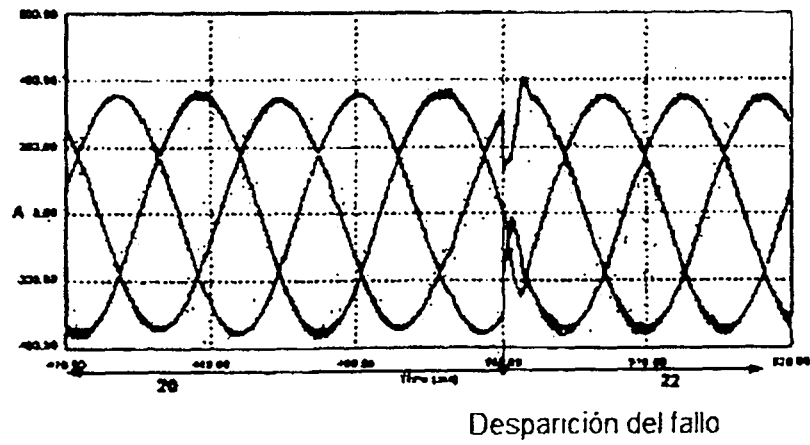


FIGURA 5

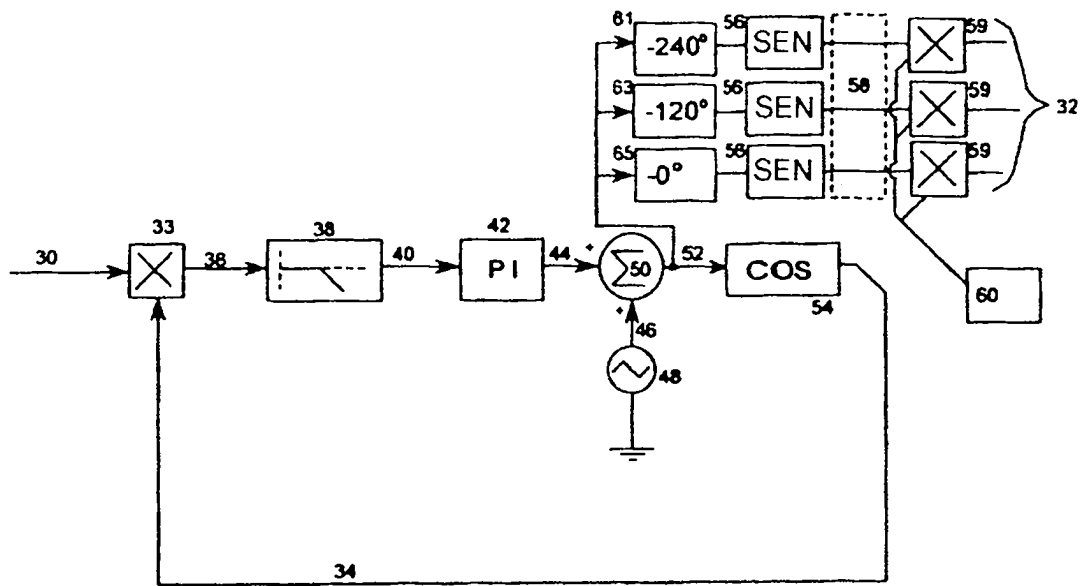


FIGURA 6