

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 710 311**

51 Int. Cl.:

**H02P 29/02** (2006.01)

**H02J 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.11.2013 PCT/DK2013/050374**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.05.2014 WO14079453**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.11.2013 E 13798238 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.01.2019 EP 2923441**

54 Título: **Métodos y sistemas para reducir el impacto de un cortocircuito de generador en una turbina eólica**

30 Prioridad:  
**20.11.2012 US 201261728275 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**24.04.2019**

73 Titular/es:  
**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)  
Hedeager 42  
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:  
**DONESCU, VICTOR y  
HELLE, LARS**

74 Agente/Representante:  
**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 710 311 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**

Métodos y sistemas para reducir el impacto de un cortocircuito de generador en una turbina eólica

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere de manera general a métodos y a sistemas para reducir el impacto de un arco o cortocircuito de generador en un generador de turbina eólica (WTG) (también denominado en el presente documento “turbina eólica”), y en particular a métodos y a sistemas para reducir daños debidos a oscilaciones transitorias de par de torsión del generador después de producirse un cortocircuito en el generador.

**Antecedentes de la invención**

10 El uso de un generador síncrono de imán permanente en el tren de transmisión de una turbina eólica presenta algunas ventajas en comparación con otros tipos de generadores usados más comúnmente en turbinas eólicas. Estas ventajas incluyen, entre otras cosas, alta eficiencia, menos pérdidas en el rotor del generador (que es una parte difícil de enfriar), ausencia de anillos colectores y sus problemas asociados, y mejor rendimiento de capacidad de respuesta ante baja tensión.

15 Sin embargo, cuando se produce un evento de cortocircuito, tal como un arco, en el generador o en el convertidor durante el funcionamiento normal, un generador síncrono de imán permanente continuará generando tensión de estator mientras el generador esté girando ya que los imanes permanentes en el rotor continuarán produciendo un campo magnético. Por tanto, en tales condiciones se produce corriente de cortocircuito y debe gestionarse adecuadamente para evitar daños en la turbina eólica.

20 Pueden producirse diferentes tipos de eventos de cortocircuito y pueden gestionarse de diferentes maneras para reducir el impacto sobre la turbina eólica. Por ejemplo, en una configuración de convertidor de potencia y generador polifásico, un fallo de convertidor de potencia aparecerá en la mayoría de los casos como un cortocircuito trifásico en el generador. Un cortocircuito trifásico en el generador provoca una oscilación transitoria de par de torsión seguida por una descarga casi completa del tren motriz. Una descarga de este tipo provoca niveles de carga mecánica no deseados en la turbina eólica. Para reducir el impacto de un evento de cortocircuito de este tipo, la turbina eólica  
25 puede tener medios para desconectar el convertidor del generador y para aplicar posteriormente una carga resistiva pasiva, que servirá para reintroducir un par de torsión de carga determinado en el tren motriz.

Otro evento de cortocircuito, que aparece de manera algo poco frecuente, es un cortocircuito trifásico en el interior de un generador trifásico. Este tipo de evento de cortocircuito también provoca una oscilación transitoria de par de torsión seguida por una descarga casi completa del tren motriz. Desde un punto de vista eléctrico, no pueden  
30 tomarse medidas, tales como la aplicación de una carga resistiva pasiva, para contrarrestar esta descarga no deseada del tren motriz.

Un tercer tipo de evento de cortocircuito es un cortocircuito desequilibrado en el generador de una turbina eólica. Cuando se produce, por ejemplo, un cortocircuito bifásico (que es un tipo de cortocircuito desequilibrado) en el generador, aparece una oscilación transitoria de par de torsión seguida por una oscilación estacionaria de par de torsión con un contenido de frecuencia determinado por la velocidad del generador. Una contramedida que puede  
35 tomarse en respuesta a un cortocircuito desequilibrado en el generador es apagar la turbina eólica (es decir, detener la turbina eólica). Sin embargo, como se muestra, por ejemplo, en las figuras 8, 9 y 10, la oscilación del tren motriz pasaría a través de un intervalo de frecuencia muy amplio dando como resultado un alto riesgo de excitar resonancias en el tren motriz y en la cimentación de la turbina. Además, al igual que con el evento de cortocircuito trifásico, la aplicación de una carga resistiva no tendría ningún efecto sustancial sobre las oscilaciones del par de torsión.  
40

La figura 7 muestra un descenso en rampa de velocidad controlado del generador en una turbina eólica cuando se apaga debido a un cortocircuito bifásico en un devanado del generador. La figura 8 muestra un gráfico de una respuesta de par de torsión de ejemplo del generador asociada con el perfil de descenso en rampa de velocidad en la figura 7, pero sin aplicación de la carga resistiva. El gráfico incluye dos curvas, una primera calculada mediante un modelo dinámico, y una segunda calculada mediante un sencillo enfoque analítico. Las figuras 9 y 10 muestran diferentes vistas ampliadas del gráfico en la figura 8. Como se muestra en las figuras 9 y 10, la oscilación de par de torsión contiene un amplio intervalo de armónicos.  
45

La figura 11 muestra un gráfico de una respuesta de par de torsión de ejemplo del generador asociada con el perfil de descenso en rampa de velocidad mostrado en la figura 1, pero en este gráfico se ha aplicado la carga resistiva. Las figuras 12 y 13 muestran diferentes vistas ampliadas del gráfico en la figura 11. Como se muestra en las figuras 12 y 13, las oscilaciones de par de torsión contienen un amplio intervalo de armónicos independientemente del hecho de que se ha aplicado una carga resistiva. Por tanto, las oscilaciones de par de torsión debidas a un cortocircuito bifásico son igual de graves que sin la carga resistiva.  
50

55 “Synchronous Machine Drive Response to Symmetrical and Asymmetrical Short Circuit Faults” de Welchko *et al.* (IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, n.º 2, junio de 2003) describe oscilaciones de par de torsión de

larga duración y alta amplitud aplicadas a una máquina síncrona de imán permanente interior (IPM) debidas a un fallo de un interruptor de inversor de un accionamiento de velocidad ajustable que suministra corriente a la máquina de IPM. El fallo del interruptor de inversor da como resultado un cortocircuito asimétrico en los terminales de la máquina de IPM. Welchko *et al.* proponen cerrar interruptores adicionales en el accionamiento de velocidad ajustable para crear un fallo de cortocircuito equilibrado, lo que reduce los niveles potencialmente dañinos de las oscilaciones de par de torsión. Sin embargo, este enfoque tiene el inconveniente de introducir altos niveles de corriente en componentes del accionamiento de velocidad ajustable que pueden no estar clasificados para altas corrientes. El mismo problema se produce cuando se usa la máquina de IPM como generador en vez de como motor y se usa un convertidor en lugar del accionamiento de velocidad ajustable.

Con frecuencia en el presente documento se hace referencia a que un cortocircuito o evento de cortocircuito se produce "en" un generador. Sin embargo, la ubicación de una conexión eléctricamente conductora no intencionada (por ejemplo, un arco) que hace que se produzca un cortocircuito en el generador puede ser externa a un alojamiento del generador. Por ejemplo, puede producirse una conexión eléctrica no intencionada en cualquiera de varios lugares externos al alojamiento de generador (por ejemplo, entre los cables que transportan potencia producida por el generador a un convertidor, entre conductores eléctricos dentro del convertidor, entre conductores en una terminación compleja de cable o en un dispositivo, tal como un disyuntor o un dispositivo de protección de tensión) pero puede tener sustancialmente el mismo efecto de cortocircuito que una conexión eléctrica no intencionada que se produce en el interior del alojamiento de generador. Por tanto, una conexión eléctrica no intencionada que se produce o bien dentro o bien fuera del alojamiento de generador crea un cortocircuito en el generador si uno o más elementos conductores en el generador están en un circuito eléctricamente conductor (es decir, un cortocircuito) que incluye la conexión eléctrica no intencionada.

A modo de antecedentes adicionales, el documento EP2372860 describe un circuito de protección para una máquina eléctrica en el que conductores entre un generador y un convertidor de potencia están acoplados a un terminal común mediante contactores respectivos. En el caso de una corriente de fallo en el circuito o el convertidor de potencia, pueden hacerse funcionar los contactores para acoplar los conductores al terminal común.

La presente invención se define en las reivindicaciones independientes.

### Sumario de la invención

Según un primer aspecto, la invención proporciona un método de reducción de un impacto de un evento de cortocircuito desequilibrado que se produce en un generador de imán permanente polifásico de una turbina eólica, teniendo el generador una pluralidad de patas de fase. El generador también incluye un convertidor que convierte potencia eléctrica producida por el generador para usarla en una red de distribución de potencia, y un punto de interruptor entre el generador y el convertidor. El punto de interruptor incluye una pluralidad de interruptores, cada uno de los cuales está acoplado entre un par diferente de patas de fase. Según el método, se detecta un evento de cortocircuito desequilibrado en el generador de la turbina eólica, y, en respuesta a la detección del evento de cortocircuito desequilibrado, se controlan unos seleccionados de los interruptores con el fin de cortocircuitar al menos una de las patas de fase del generador en el punto de interruptor para crear un cortocircuito equilibrado en el generador.

Haciendo esto, la respuesta de par de torsión del generador se altera ventajosamente para evitar oscilaciones de par de torsión de alta amplitud que se producirían de otro modo como resultado del evento de cortocircuito desequilibrado.

En otra realización del método según el primer aspecto de la invención, el evento de cortocircuito desequilibrado detectado es al menos uno de un evento de cortocircuito bifásico, un evento de cortocircuito monofásico a masa, y un evento de cortocircuito multifásico a masa.

En otra realización del método según el primer aspecto de la invención, el método incluye etapas adicionales. Por ejemplo, en primer lugar se detecta un fallo de tensión. A continuación, se acopla una carga resistiva a una salida del generador en respuesta a la detección del fallo de tensión. Según esta realización, detectar el cortocircuito desequilibrado incluye determinar que el fallo de tensión detectado está provocado por el evento de cortocircuito desequilibrado en el generador. Además, cortocircuitar la al menos una fase del generador incluye cortocircuitar la carga resistiva.

Según un segundo aspecto, la invención proporciona una turbina eólica con una protección frente a cortocircuito desequilibrado. La turbina eólica incluye un rotor que incluye una o más palas que hacen que el rotor rote en respuesta a fuerzas eólicas y un generador de imán permanente polifásico que tiene una pluralidad de patas de fase, y que recibe una entrada de par de torsión desde el rotor y produce una potencia eléctrica multifásica. La turbina eólica según el segundo aspecto de la invención también incluye un convertidor configurado para recibir la potencia eléctrica producida por el generador y convertir la potencia eléctrica para usarla en una red de distribución de potencia. Un interruptor de cortocircuito se dispone entre el generador y el convertidor y está configurado para crear un cortocircuito equilibrado en el generador cuando se activa, en el que el interruptor de cortocircuito comprende una pluralidad de interruptores, y en el que cada uno de la pluralidad de interruptores está acoplado

entre un par diferente de patas de fase del generador para cortocircuitar de forma selectiva dichas patas de fase. La turbina eólica incluye además uno o más sensores que proporcionan información indicativa de un evento de cortocircuito desequilibrado y un controlador que recibe datos del uno o más sensores para detectar el evento de cortocircuito desequilibrado en el generador de la turbina eólica. El controlador también provoca que unos seleccionados de los interruptores de cortocircuito cortocircuiten unas respectivas de las patas de fase para crear un cortocircuito equilibrado en el generador en respuesta a la detección del evento de cortocircuito desequilibrado. Por consiguiente, la respuesta de par de torsión del generador se altera ventajosamente para evitar oscilaciones de par de torsión de alta amplitud que se producirían de otro modo como resultado del evento de cortocircuito desequilibrado.

En otra realización del método según el segundo aspecto de la invención, el evento de cortocircuito desequilibrado detectado es al menos uno de un evento de cortocircuito bifásico, un evento de cortocircuito monofásico a masa, y un evento de cortocircuito multifásico a masa.

En otra realización del método según el segundo aspecto de la invención, la turbina eólica incluye además una carga resistiva configurada para acoplarse selectivamente al generador para consumir la electricidad producida por el generador cuando se produce un fallo. Además, el controlador está configurado adicionalmente para detectar un fallo de tensión y acoplar la carga resistiva al generador en respuesta a la detección del fallo de tensión y determinar que el fallo de tensión detectado está provocado por el evento de cortocircuito desequilibrado. El cortocircuito equilibrado creado por el interruptor de cortocircuito puede provocar un cortocircuito a través de la carga resistiva.

### Breve descripción de los dibujos

La invención se entenderá mejor con referencia a la descripción detallada cuando se considera junto con los ejemplos no limitativos y los dibujos adjuntos.

La figura 1 muestra una estructura general de una turbina eólica.

La figura 2 muestra un diagrama de cuadros funcional del interior de una porción de góndola de la turbina eólica en la figura 1.

La figura 3 muestra una vista detallada de un generador y un interruptor de cortocircuito en la porción de góndola de la turbina eólica en un primer momento.

La figura 4 muestra una vista detallada del generador y del interruptor de cortocircuito en un segundo momento.

La figura 5 muestra un gráfico que ilustra la respuesta de par de torsión del generador después de un evento de cortocircuito desequilibrado, según una realización de la invención.

La figura 6 muestra un diagrama de flujo que representa un método de ejemplo para reducir un impacto del evento de cortocircuito desequilibrado en el generador.

La figura 7 muestra un perfil de descenso en rampa de velocidad de ejemplo cuando se produce un evento de cortocircuito bifásico.

La figura 8 muestra una respuesta de par de torsión de ejemplo del generador cuando se aplica una carga resistiva durante el perfil de descenso en rampa de velocidad de la figura 7.

La figura 9 muestra una primera vista ampliada del gráfico mostrado en la figura 8.

La figura 10 muestra una segunda vista ampliada del gráfico mostrado en la figura 8.

La figura 11 muestra una respuesta de par de torsión de ejemplo del generador cuando no se aplica una carga resistiva durante el perfil de descenso en rampa de velocidad de la figura 7.

La figura 12 muestra una primera vista ampliada del gráfico mostrado en la figura 11.

La figura 13 muestra una segunda vista ampliada del gráfico mostrado en la figura 11.

### Descripción detallada de la invención

Lo siguiente es una descripción detallada de realizaciones de la invención representadas en los dibujos adjuntos. Las realizaciones son ejemplos y se presentan en un detalle tal como para comunicar claramente la invención. Sin embargo, no se pretende que la cantidad de detalle ofrecida limite las variaciones previstas de las realizaciones; sino por el contrario, la intención es cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que se encuentren dentro del espíritu y alcance de la presente invención como se define en las reivindicaciones adjuntas.

Además, en diversas realizaciones la invención proporciona numerosas ventajas con respecto a la técnica anterior. Sin embargo, aunque realizaciones de la invención pueden lograr ventajas con respecto a otras posibles soluciones y/o con respecto a la técnica anterior, el hecho de si se logra o no una ventaja particular mediante una realización

dada no es limitativo de la invención. Por tanto, los siguientes aspectos, características, realizaciones y ventajas son meramente ilustrativos y no se consideran elementos o limitaciones de las reivindicaciones adjuntas excepto cuando se mencionen explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones. Asimismo, la referencia a “la invención” no se interpretará como una generalización de cualquier objeto inventivo dado a conocer en el presente documento y no se considerará como un elemento o limitación de las reivindicaciones adjuntas, excepto cuando se mencione explícitamente en una(s) reivindicación/reivindicaciones.

Los métodos y los sistemas de ejemplo descritos en el presente documento pueden usarse en una turbina eólica para reducir las oscilaciones de par de torsión no deseadas creadas por arcos o cortocircuitos desequilibrados en un generador de la turbina eólica. Según una realización, se implementa un disyuntor trifásico en un convertidor del lado de red de distribución de la turbina eólica y, cuando se detecta un cortocircuito desequilibrado, se activa el disyuntor trifásico para emular un cortocircuito trifásico equilibrado.

La figura 1 ilustra un generador de turbina eólica (WTG) de ejemplo (también denominado en el presente documento “turbina eólica”) 100 según una realización. Como se ilustra en la figura 1, el WTG 100 incluye una torre 110, una góndola 120 y un rotor 130. En una realización, el WTG 100 puede ser una turbina eólica instalada en tierra. Sin embargo, las realizaciones de la invención no se limitan sólo a la turbina eólica instalada en tierra. En realizaciones alternativas, la turbina eólica 100 puede ser una turbina eólica en alta mar ubicada sobre una masa de agua tal como, por ejemplo, un lago, un océano o similar. La torre 110 de una turbina eólica en alta mar de este tipo se instala o bien en el fondo del mar o bien en plataformas estabilizadas en o sobre el nivel del mar.

La torre 110 del WTG 100 puede estar configurada para elevar la góndola 120 y el rotor 130 hasta una altura en la que el rotor 130 puede recibir un flujo de aire fuerte, menos turbulento y generalmente sin obstrucciones. La altura de la torre 110 puede ser cualquier altura razonable, y debe considerar la longitud de las palas de turbina eólica que se extienden desde el rotor 130. La torre 110 puede fabricarse de cualquier tipo de material, por ejemplo, acero, hormigón o similar. En algunas realizaciones la torre 110 puede fabricarse de un material monolítico. Sin embargo, en realizaciones alternativas, la torre 110 puede incluir una pluralidad de secciones. En algunas realizaciones de la invención, la torre 110 puede ser una torre de celosía. Por consiguiente, la torre 110 puede incluir perfiles de acero soldados.

El rotor 130 puede incluir un buje de rotor (denominado a continuación en el presente documento simplemente el “buje”) 132 y al menos una pala 140 (en la figura 1 se muestran tres palas 140 de este tipo). El buje de rotor 132 puede estar configurado para acoplar la al menos una pala 140 a un árbol (no mostrado). En una realización, las palas 140 pueden tener un perfil aerodinámico tal que, a velocidades del viento predefinidas, las palas 140 experimentan una sustentación, haciendo así que las palas roten radialmente alrededor del buje. El buje 132 puede comprender además mecanismos (no mostrados) para ajustar el paso de la pala 140 para aumentar o reducir la cantidad de energía eólica captada por la pala 140. El ajuste de paso ajusta el ángulo al que el viento incide en la pala 140. Sin embargo, en determinadas realizaciones los mecanismos de ajuste de paso pueden omitirse y, como consecuencia, el paso de la palas 140 no puede ajustarse tales realizaciones.

El buje 132 rota normalmente alrededor de un eje sustancialmente horizontal a lo largo de un árbol de accionamiento (no mostrado) que se extiende desde el buje 132 a la góndola 120. El árbol de accionamiento está habitualmente acoplado a uno o más componentes en la góndola 120, que están configurados para convertir la energía de rotación del árbol en energía eléctrica.

Aunque el WTG 100 mostrado en la figura 1 tiene tres palas 140, debe observarse que un WTG puede tener un número diferente de palas. Es habitual encontrar WTG que tienen de dos a cuatro palas. El WTG 100 mostrado en la figura 1 es una turbina eólica de eje horizontal (HAWT) ya que el rotor 130 rota alrededor de un eje horizontal. Debe observarse que el rotor 130 puede rotar alrededor de un eje vertical. Un WTG de este tipo cuyo rotor rota alrededor del eje vertical se conoce como turbina eólica de eje vertical (VAWT). Las realizaciones de WTG descritas a continuación no se limitan a HAWT que tienen 3 palas. Pueden implementarse como HAWT y VAWT, que tienen cualquier número de palas 140 en el rotor 130.

En la góndola 120 están ubicados uno o más controladores 160 usados para controlar diversos aspectos del WTG 100 (también denominados en el presente documento “el controlador” por brevedad). Por ejemplo, el uno o más controladores 160 reciben datos de los diversos sensores y controlan aspectos tales como la velocidad de rotor, el ángulo de paso de pala, el nivel de salida de potencia, etc. Además, el uno o más controladores 160 pueden incluir o tener acceso a uno o más dispositivos de memoria en los que se almacenan datos de referencia, tales como tablas de consulta, datos de modelos de clima y parques eólicos, y similares. Al menos algunos del uno o más controladores 160 también pueden estar ubicados fuera de la góndola 120, tal como en la torre 110 o en otra estructura cerca del WTG 100. El uno o más controladores 160 pueden implementarse usando conjuntos de circuitos que incluyen hardware, software codificado en medios legibles por ordenador incluyendo medios programables y no programables, o cualquier combinación de los anteriores.

La figura 2 es una ilustración esquemática que muestra los componentes ubicados en el interior de la góndola 120 para el WTG mostrado en la figura 1. El rotor 130 está conectado en la parte delantera de la góndola 120 a un árbol de accionamiento de baja velocidad principal, que se recibe en una caja de engranajes 220. La caja de engranajes

220 está conectada, a su vez, a un generador eléctrico 240 a través de un árbol de accionamiento de alta velocidad secundario. El generador 240 es un generador polifásico que recibe una entrada de par de torsión desde el rotor 130 y produce electricidad multifásica en múltiples salidas, correspondiendo cada salida a una fase diferente. En el funcionamiento normal, la electricidad producida por el generador 240 se pasa a un convertidor de potencia eléctrico 250 y posteriormente a una salida 260 para su conexión a la red de distribución o la red de distribución eléctrica local. Sin embargo, en el caso de un cortocircuito desequilibrado un punto de interruptor entre el generador 240 y el convertidor 250 puede crear un cortocircuito equilibrado para reducir las oscilaciones de par de torsión que resultarían de otro modo del cortocircuito desequilibrado. El punto de interruptor puede implementarse como un interruptor de cortocircuito 230, como se muestra. En una realización de ejemplo el generador 240 es un generador síncrono de imán permanente. Sin embargo, pueden usarse en su lugar otros tipos de generadores polifásicos. Además, en una realización, el convertidor 250 es un convertidor a escala completa, pero puede usarse en su lugar un convertidor que realiza sólo una conversión parcial de la potencia generada.

El controlador 160 del WTG 100 determina y proporciona un nivel de referencia de paso a un actuador de paso 280 y determina y proporciona al convertidor 250 un nivel de referencia de potencia que designa un nivel de potencia que va a producirse por el generador 240. Estos niveles de referencia se determinan mediante algoritmos de control internos y/o tablas en el controlador 160.

El valor de referencia de paso es el ángulo que se requiere que formen las palas de rotor con respecto al viento incidente, y el valor se ajusta para reflejar los cambios en la velocidad del viento incidente. El ángulo de paso de las palas afecta a la velocidad de punta de las palas de la turbina giratoria, y es la función del actuador de paso 202 controlar de forma constante las palas según el ángulo de paso recibido desde el controlador 160. El ajuste constante en las palas de rotor del ángulo de paso garantiza o bien que la turbina eólica genera una potencia óptima o bien que, cuando la velocidad del viento es demasiado alta, puede reducirse la potencia nominal de la turbina eólica para entrar en un modo seguro.

Debe observarse que la ilustración mostrada en la figura 2 representa sólo una de muchas realizaciones de ejemplo que se contemplan. Por ejemplo, en otra realización de ejemplo, puede omitirse la caja de engranajes 220. Tales realizaciones se denominan realizaciones de turbina eólica de accionamiento directo o sin engranajes. Además, o alternativamente, el generador 240 puede diseñarse o controlarse de modo que su salida se encuentra a la frecuencia de la red de distribución y el convertidor 250 puede omitirse o sustituirse por otro componente que realiza funciones secundarias, tales como control de potencia reactiva y/o acondicionamiento de señales.

La figura 3 muestra una vista detallada del generador 220 y el interruptor de cortocircuito 230 cuando se produce un evento de cortocircuito bifásico en el generador. (Un evento de cortocircuito bifásico es sólo un ejemplo de un evento de cortocircuito desequilibrado que puede detectarse y mitigarse. Otros eventos de cortocircuitos desequilibrados incluyen un evento de cortocircuito monofásico a masa y un evento de cortocircuito multifásico a masa.) El controlador 160 no identifica inmediatamente un fallo como equilibrado o desequilibrado. Por tanto, la figura 4 muestra otra vista detallada del generador 220 y del convertidor 250 un momento después, después de que se haya identificado el fallo como un evento de cortocircuito bifásico y el controlador 160 haya ordenado al interruptor de cortocircuito 230 crear un cortocircuito equilibrado en el generador.

En la realización de ejemplo mostrada en las figuras 3 y 4, el interruptor de cortocircuito 230 incluye una pluralidad de interruptores 232, 234 y 236. Los interruptores 232, 234 y 236 pueden incluir interruptores de tiristor, tales como interruptores de tiristor conmutado por compuerta integrada (IGCT) y/o pueden incluir otros interruptores de un tipo que está clasificado para alta potencia. Cada uno de los interruptores está acoplado entre un par diferente de patas de fase del generador 220 para cortocircuitar de forma selectiva las patas de fase y crear un cortocircuito equilibrado en el generador. En una realización cada uno de los interruptores 232, 234, 236 puede controlarse de forma individual de modo que, si se desea, sólo uno (o sólo dos) de los interruptores está(n) cerrado(s) mientras los otros permanecen abiertos, mientras en otras realizaciones los interruptores se activan y desactivan simultáneamente, por ejemplo, mediante un interruptor unidireccional. Además, debido a que sólo se necesitan dos interruptores para cortocircuitar el conjunto de tres salidas juntas, en determinadas realizaciones puede omitirse uno de los interruptores 232, 234, 236. Sin embargo, para garantizar la reducción de corrientes transitorias pueden utilizarse en su lugar tres interruptores, como se muestra. Además, en la realización de ejemplo mostrada, el generador 220 es un generador trifásico con tres conductores de salida, portando cada conductor de salida una señal de potencia eléctrica con una fase diferente de las otras. Sin embargo, se contemplan otras realizaciones, tales como un generador con más de tres fases y, en tales realizaciones, el interruptor de cortocircuito 230 puede tener un número correspondientemente mayor de interruptores.

Cuando se produce un cortocircuito desequilibrado, como se representa gráficamente mediante la flecha 310, el controlador 160 identificará inicialmente el cortocircuito desequilibrado como un fallo de tensión general (por ejemplo, por medio de sensores acoplados para detectar niveles de tensión en la red de distribución), sin identificar si el fallo se ha producido en la red de distribución, en el generador o en otro lugar. El controlador 160 iniciará inmediatamente (por ejemplo, aproximadamente 120 ms después de producirse el fallo) un apagado de la turbina eólica, por ejemplo, haciendo que el convertidor 250 se desconecte de la red de distribución, aplicando una carga resistiva, haciendo que las palas 140 del rotor 130 ajusten el paso fuera del viento, y tomando cualquier otra medida que facilite un apagado de la turbina eólica 100. Como consecuencia, la velocidad del generador seguirá

generalmente un perfil en rampa de velocidad tal como el mostrado en la figura 7.

En un segundo momento mostrado en la figura 4 (por ejemplo, aproximadamente 1 segundo después de que la turbina eólica inicie el apagado), el controlador 160 identifica que el fallo es un cortocircuito bifásico y cortocircuita al menos una fase del generador para crear un cortocircuito equilibrado (representado gráficamente en la figura 4 mediante la flecha 410) en el generador. El cortocircuito equilibrado hace que al menos parte de la corriente producida por el generador 220 evite la carga resistiva, que está dentro del, o acoplada directa o indirectamente al, convertidor 250. El cortocircuito equilibrado puede crearse activando uno o más de los interruptores 232, 234, 236 en el interruptor de cortocircuito 230. Como resultado del cortocircuito equilibrado creado mediante el interruptor de cortocircuito 230, la respuesta de par de torsión del generador 220 se vuelve igual a una respuesta de par de torsión de cortocircuito trifásico normal y se evitan oscilaciones de par de torsión de alta amplitud asociadas con el evento de cortocircuito bifásico. La figura 5 muestra una respuesta de par de torsión del generador 220 como resultado del procedimiento de fijación de cortocircuito trifásico descrito anteriormente.

El controlador 160 puede identificar el fallo como un cortocircuito desequilibrado de diferentes maneras. Por ejemplo, se puede usar un desequilibrio sustancial del flujo de corriente a través de la carga resistiva y/o los niveles de tensión en el enlace de CC para indicar que es probable que se haya producido un evento de cortocircuito desequilibrado. Tales condiciones pueden detectarse usando sensores de tensión y/o corriente (no mostrados) que monitorizan las salidas del generador 220. Además, un sensor de velocidad del generador y acelerómetros en la turbina eólica también pueden proporcionar información que es indicativa de un cortocircuito desequilibrado.

En una realización, el cortocircuito equilibrado se crea inmediatamente después de la detección del cortocircuito desequilibrado para evitar cualquier posible daño debido a oscilaciones de par de torsión. Sin embargo, en otra realización, el cortocircuito equilibrado se crea gradualmente.

La transición gradual a un cortocircuito equilibrado se realiza, por ejemplo, activando y desactivando los interruptores en el interruptor de cortocircuito 230 repetidamente en una sucesión rápida (por ejemplo, a una frecuencia de hasta 2 kHz) durante un breve periodo de tiempo (por ejemplo, desde 0,1 segundos hasta 10 segundos). Además, para hacer que la transición a un cortocircuito equilibrado sea gradual y con un límite controlado de consumo de potencia de cortocircuito, puede usarse un ciclo de trabajo de conexión/desconexión ajustable en el que la porción activada del ciclo de trabajo (es decir, la porción que hace que se cierre un interruptor de cortocircuito) es inicialmente mucho más corta que la porción desactivada y cambia gradualmente a lo largo de un periodo de tiempo (por ejemplo, desde 0,1 segundos hasta 10 segundos) para llegar a ser mucho más larga que la porción desactivada. El ciclo de trabajo se ajusta para garantizar la transición gradual de cortocircuito desequilibrado a cortocircuito trifásico equilibrado y también para evitar superar una zona de funcionamiento segura de los interruptores en el interruptor de cortocircuito 230. Para facilitar la transición gradual a un cortocircuito equilibrado (o por otras razones) los interruptores 232, 234 y 236 usados en el interruptor de cortocircuito 230 pueden ser de un tipo que facilita la conmutación de alta velocidad. Por ejemplo, uno o más de los interruptores 232, 234 y 236 pueden ser interruptores de transistor bipolar de compuerta aislada (IGBT) o algún otro tipo de interruptor activado por compuerta.

La figura 6 muestra un método 600 de ejemplo para controlar una turbina eólica, tal como la turbina eólica 100. El método 600 incluye una primera etapa 610 en la que se detecta un fallo de tensión. En la turbina eólica 100 de ejemplo descrita anteriormente, el controlador 160 puede llevar a cabo la etapa 610 junto con sensores (no mostrados) que detectan niveles de tensión en una salida de la turbina eólica 100. A continuación, en la etapa 620, se acopla una carga resistiva a una salida del generador en respuesta a la detección del fallo de tensión. Por ejemplo, en la turbina eólica 100, el controlador 160 puede provocar que se cierre un interruptor en el convertidor 250 para derivar corriente a la carga resistiva en respuesta a la detección del fallo de tensión. En la etapa siguiente, la etapa 630, se determina que el fallo de tensión detectado está provocado por un evento de cortocircuito desequilibrado en el generador. El evento de cortocircuito desequilibrado detectado puede ser un evento de cortocircuito bifásico, un evento de cortocircuito monofásico a masa o un evento de cortocircuito multifásico a masa. En la turbina eólica 100, el controlador 160 puede determinar que el fallo de tensión está provocado por un cortocircuito desequilibrado, por ejemplo, tomando lecturas de un sensor de corriente acoplado a la carga resistiva y determinando que los niveles de corriente a través de la carga resistiva 320 están desequilibrados.

En la etapa final mostrada, la etapa 640, se cortocircuita la carga resistiva para crear un cortocircuito equilibrado en el generador. Por ejemplo, el controlador 160 puede provocar que el interruptor de cortocircuito 230 cortocircuite al menos una fase del generador 220. En una realización de ejemplo, esto se puede lograr haciendo que el interruptor de cortocircuito 230 cortocircuite una trayectoria de circuito entre la al menos una fase y al menos otra fase en las salidas del generador. Además, el cortocircuito equilibrado puede crearse gradualmente, por ejemplo, aplicando y eliminando un cortocircuito entre cada pata de fase del interruptor de cortocircuito 230 repetidamente en una sucesión rápida y, opcionalmente, usando un ciclo de trabajo de activación/desactivación ajustable que realiza la transición de principalmente desactivado (circuito abierto) a principalmente activado (cortocircuito).

El método anterior 600 es sólo un método de ejemplo que se contempla. De hecho, en otros métodos de ejemplo, determinadas etapas del método 600 pueden omitirse o sustituirse por otras etapas. Además o alternativamente, pueden añadirse etapas adicionales al método de ejemplo 600. Por ejemplo, pueden realizarse etapas adicionales asociadas con el control de paso de pala en respuesta a la detección de un fallo de tensión.

Como se ha demostrado anteriormente, se pueden usar los métodos y sistemas de ejemplo descritos en el presente documento para reducir el impacto de un cortocircuito desequilibrado en un generador de una turbina eólica para que no sea peor que el impacto de un cortocircuito equilibrado en el generador.



**REIVINDICACIONES**

1. Método de reducción de un impacto de un evento de cortocircuito desequilibrado en una turbina eólica (100), incluyendo la turbina eólica (100) un generador de imán permanente polifásico (240) que tiene una pluralidad de patas de fase, un convertidor (250) que convierte la potencia eléctrica producida por el generador (240) para usarla en una red de distribución de potencia, y un interruptor de cortocircuito (230) entre el generador (240) y el convertidor (250), incluyendo el interruptor de cortocircuito (230) una pluralidad de interruptores (232, 234, 236) cada uno de los cuales está acoplado entre un par diferente de las patas de fase, comprendiendo el método:

5

10 detectar (610) un evento de cortocircuito desequilibrado (310) en el generador (240) de la turbina eólica (100); y

15 en respuesta a la detección del evento de cortocircuito desequilibrado, controlar unos seleccionados de los interruptores (232, 234, 236) con el fin de cortocircuitar (630) unas respectivas de las patas de fase del generador en el interruptor de cortocircuito (230) para crear un cortocircuito equilibrado en el generador (240).
2. Método según la reivindicación 1, en el que el evento de cortocircuito desequilibrado detectado es al menos uno de un evento de cortocircuito bifásico, un evento de cortocircuito monofásico a masa, y un evento de cortocircuito multifásico a masa.

20
3. Método según la reivindicación 1, que comprende además:

25 detectar (610) un fallo de tensión; y

30 acoplar (620) una carga resistiva a una salida del generador (240) en respuesta a la detección del fallo de tensión,

en el que detectar el cortocircuito desequilibrado incluye determinar (630) que el fallo de tensión detectado está provocado por el evento de cortocircuito desequilibrado en el generador (240), y

en el que cortocircuitar (630) la al menos una fase del generador incluye cortocircuitar la carga resistiva.
4. Método según la reivindicación 1, en el que cortocircuitar la al menos una fase del generador incluye cortocircuitar una trayectoria de circuito en el punto de interruptor (230) entre la al menos una fase y al menos otra fase.

35
5. Método según la reivindicación 1, en el que cortocircuitar la al menos una fase del generador para crear el cortocircuito equilibrado se realiza gradualmente aplicando y eliminando el cortocircuito repetidamente en una sucesión rápida.

40
6. Turbina eólica (100) con protección frente a cortocircuito desequilibrado, comprendiendo la turbina eólica:

45 un rotor (130) que incluye una o más palas (140) que hacen que el rotor (130) rote en respuesta a fuerzas eólicas;

un generador de imán permanente polifásico (240) que tiene una pluralidad de patas de fase, y que recibe una entrada de par de torsión desde el rotor (130) y produce potencia eléctrica multifásica;

50 un convertidor (250) configurado para recibir la potencia eléctrica producida por el generador (240) y para convertir la potencia eléctrica para usarla en una red de distribución de potencia;

un interruptor de cortocircuito (230) dispuesto entre el generador y el convertidor y configurado para crear un cortocircuito equilibrado en el generador cuando se activa, en la que el interruptor de cortocircuito (230) comprende una pluralidad de interruptores (232, 234, 236), y en la que cada uno de la pluralidad de interruptores (232, 234, 236) está acoplado entre un par diferente de patas de fase del generador (240) para cortocircuitar de forma selectiva dichas patas de fase;

55

uno o más sensores que proporcionan información indicativa de un evento de cortocircuito desequilibrado; y

60 un controlador configurado para recibir datos del uno o más sensores para detectar el evento de cortocircuito desequilibrado (310) y, en respuesta a la detección del cortocircuito desequilibrado, configurado para hacer que unos seleccionados de los interruptores de cortocircuito (232, 234, 236) cortocircuiten unas respectivas de las patas de fase para crear un cortocircuito equilibrado en el generador (240).

65

7. Turbina eólica según la reivindicación 6, en la que el evento de cortocircuito desequilibrado detectado es al menos uno de un evento de cortocircuito bifásico, un evento de cortocircuito monofásico a masa, y un evento de cortocircuito multifásico a masa.
- 5
8. Turbina eólica según la reivindicación 6, que comprende además:
- 10 una carga resistiva configurada para acoplarse selectivamente al generador para consumir la electricidad producida por el generador cuando se produce un fallo,
- en la que el controlador está configurado además para:
- 15 detectar un fallo de tensión y acoplar la carga resistiva al generador (240) en respuesta a la detección del fallo de tensión; y
- determinar que el fallo de tensión detectado está provocado por el evento de cortocircuito desequilibrado,
- 20 en la que el cortocircuito equilibrado creado por el interruptor de cortocircuito provoca un cortocircuito a través de la carga resistiva.

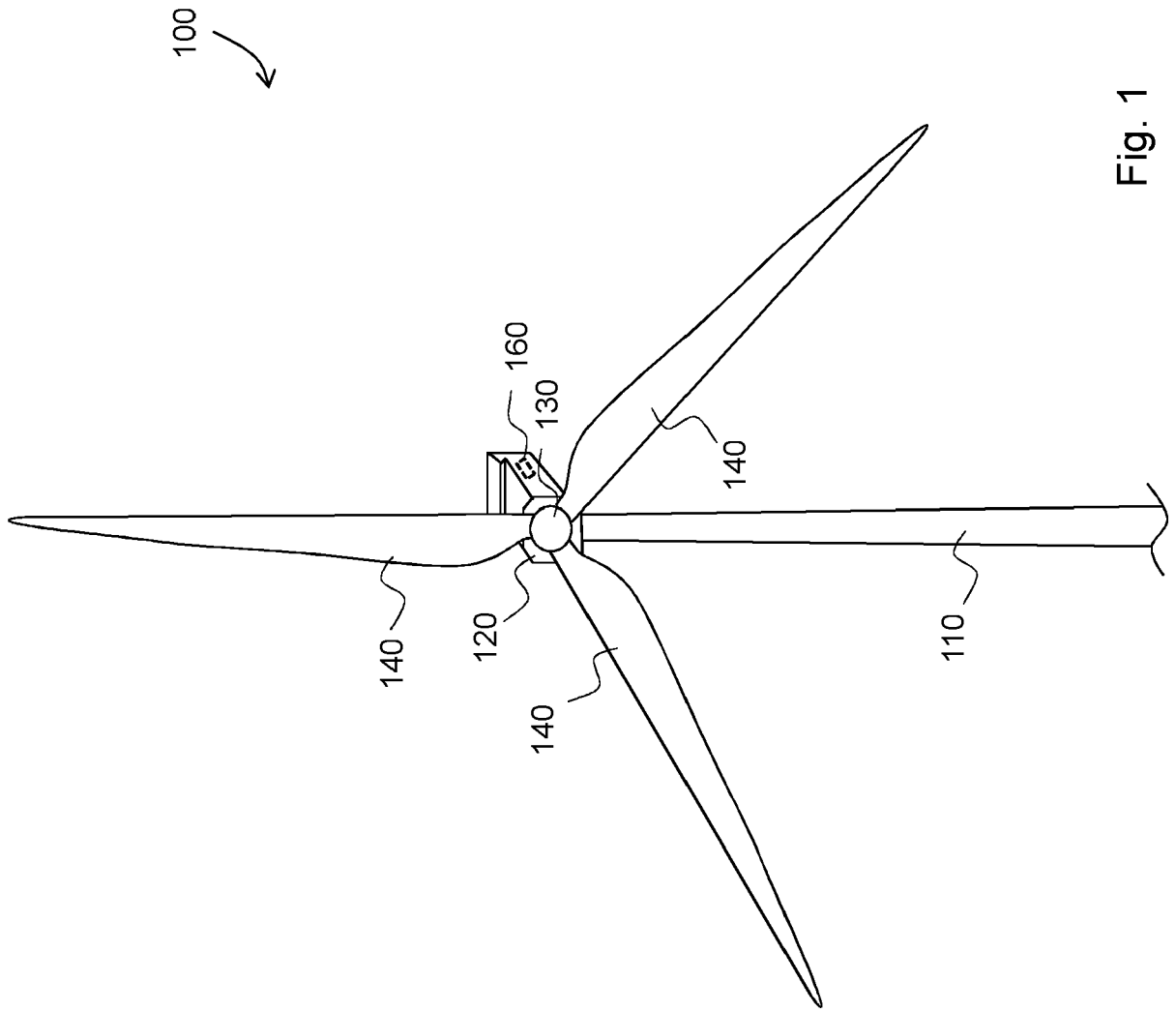


Fig. 1

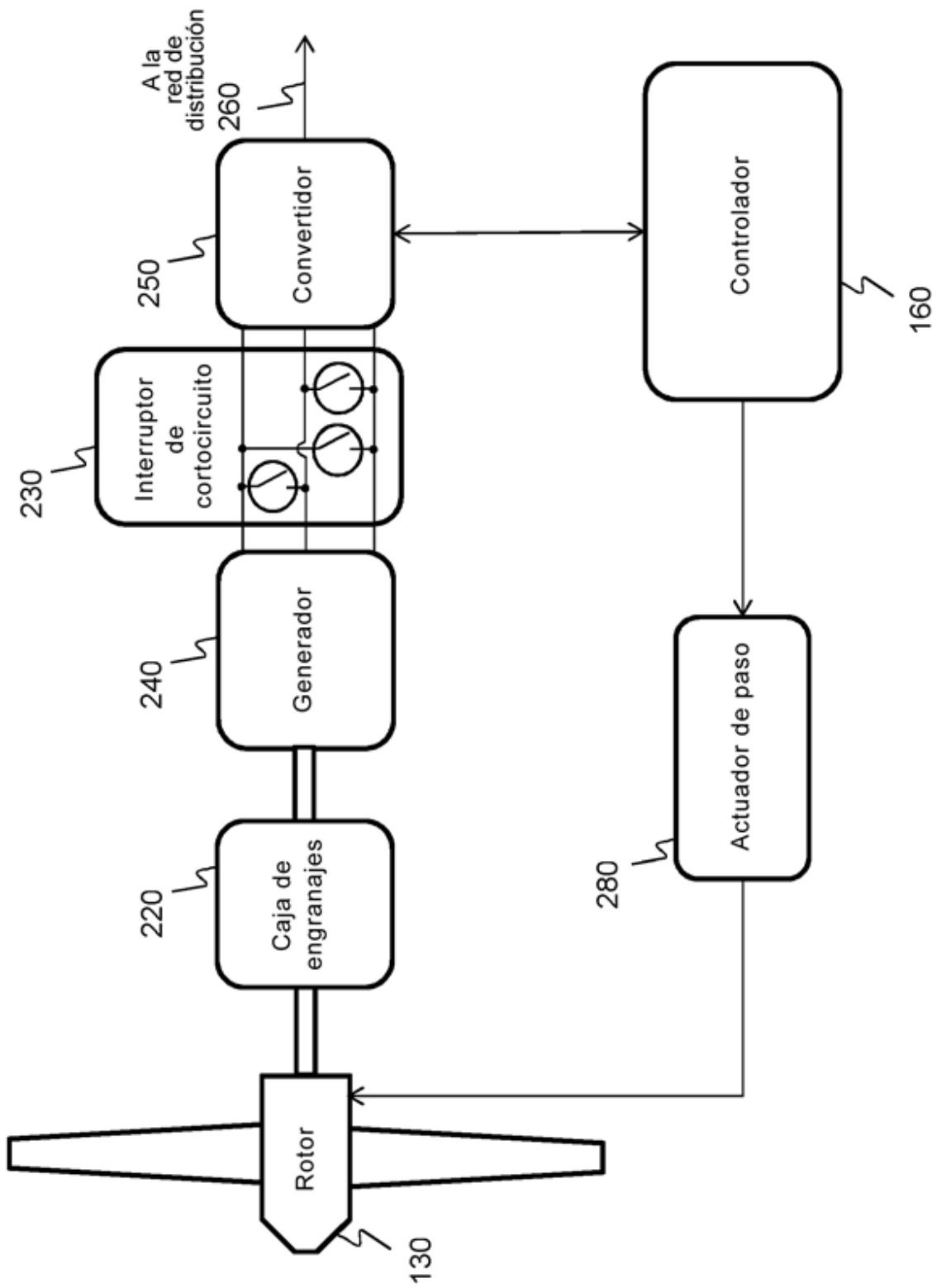


Fig. 2

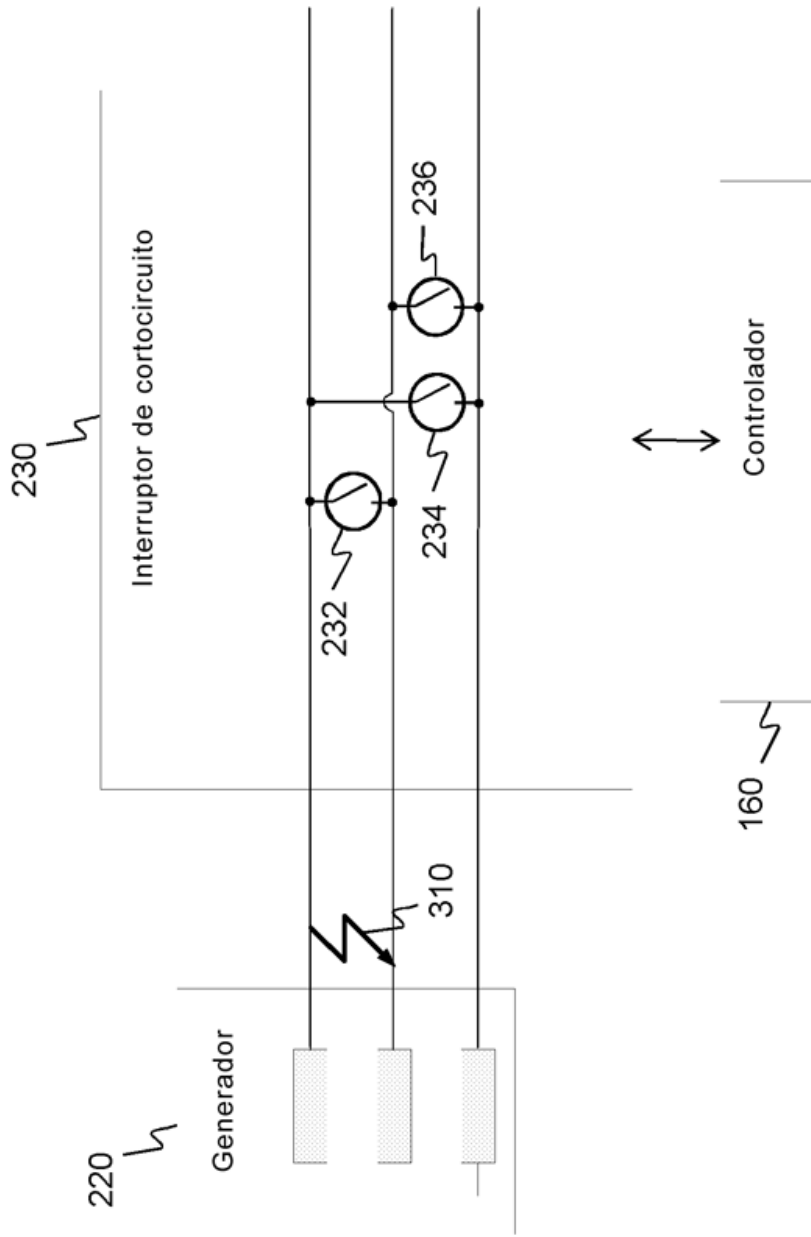


Fig. 3

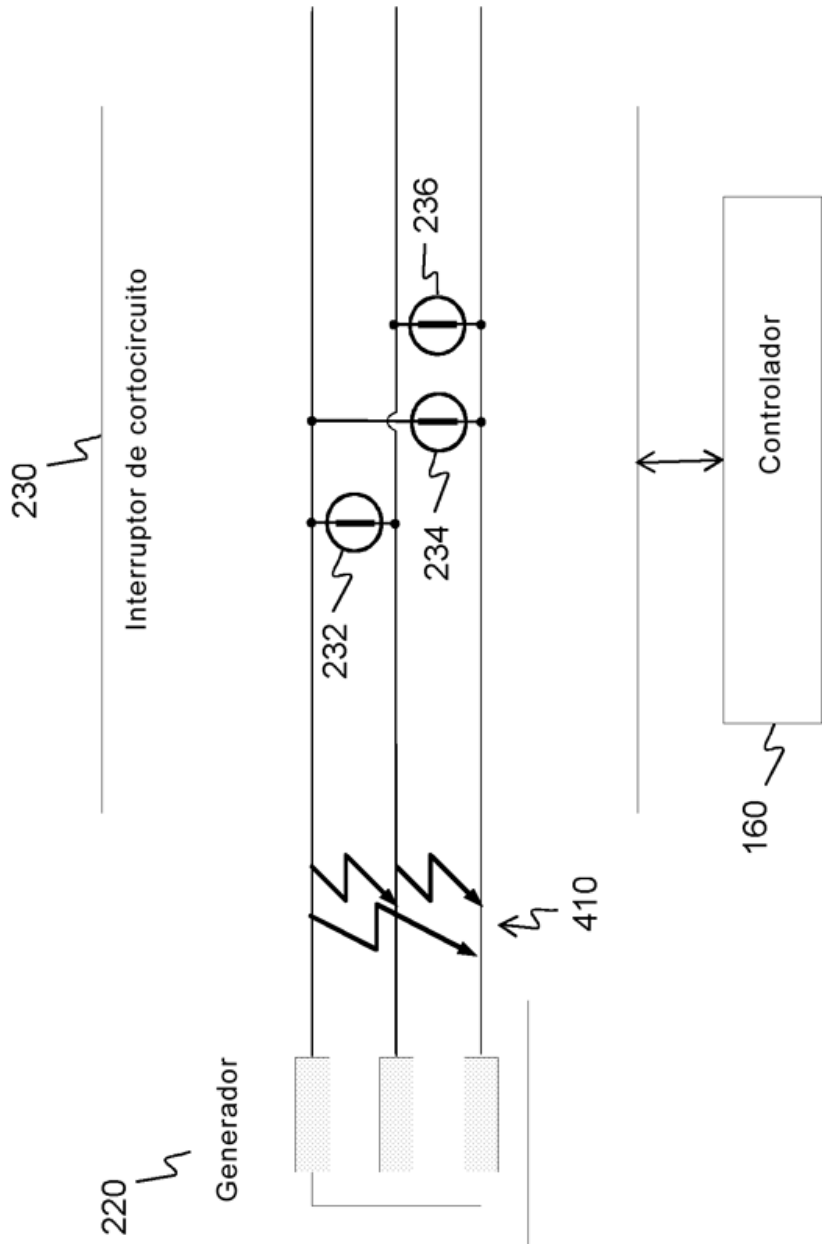


Fig. 4

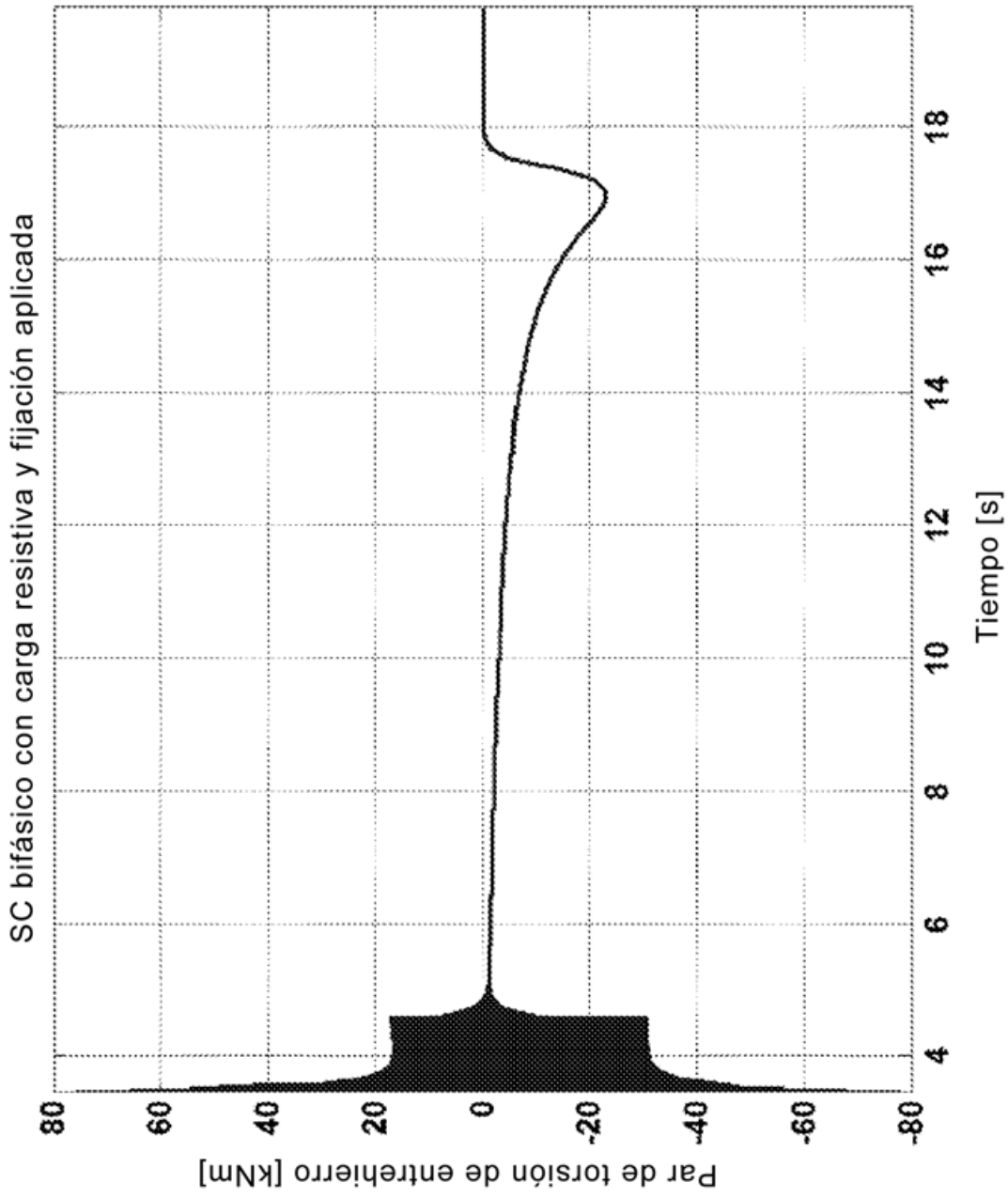


Fig. 5

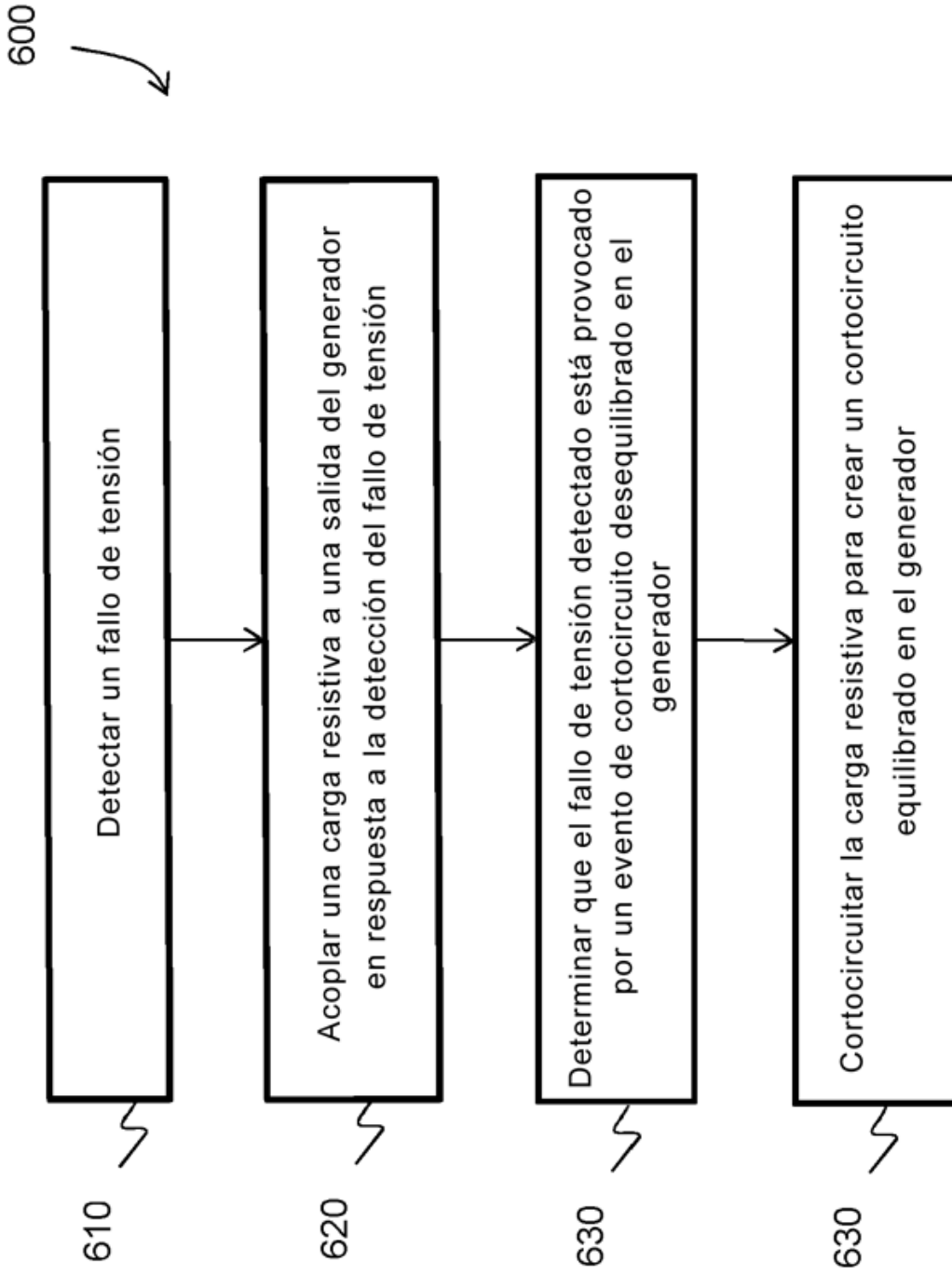


Fig. 6



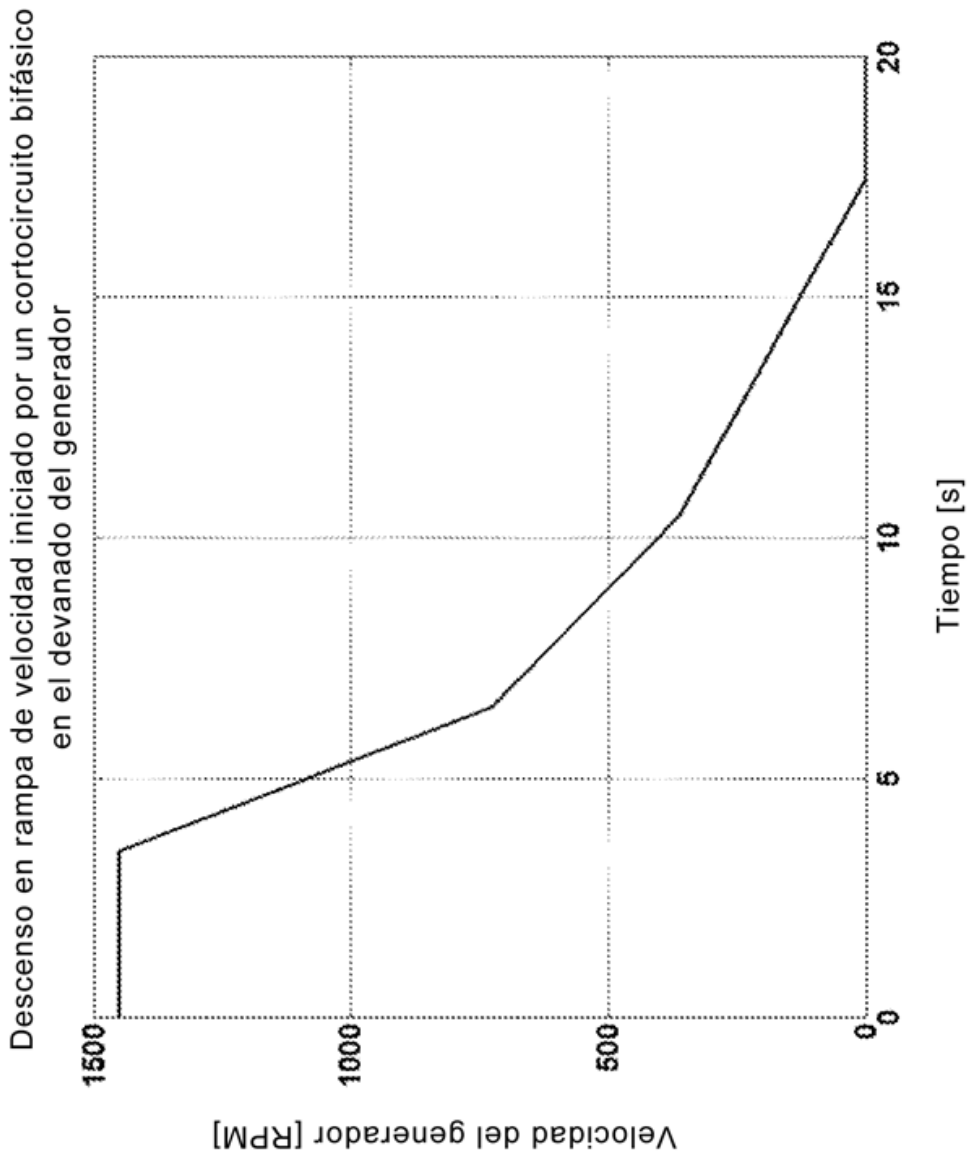


Fig. 7

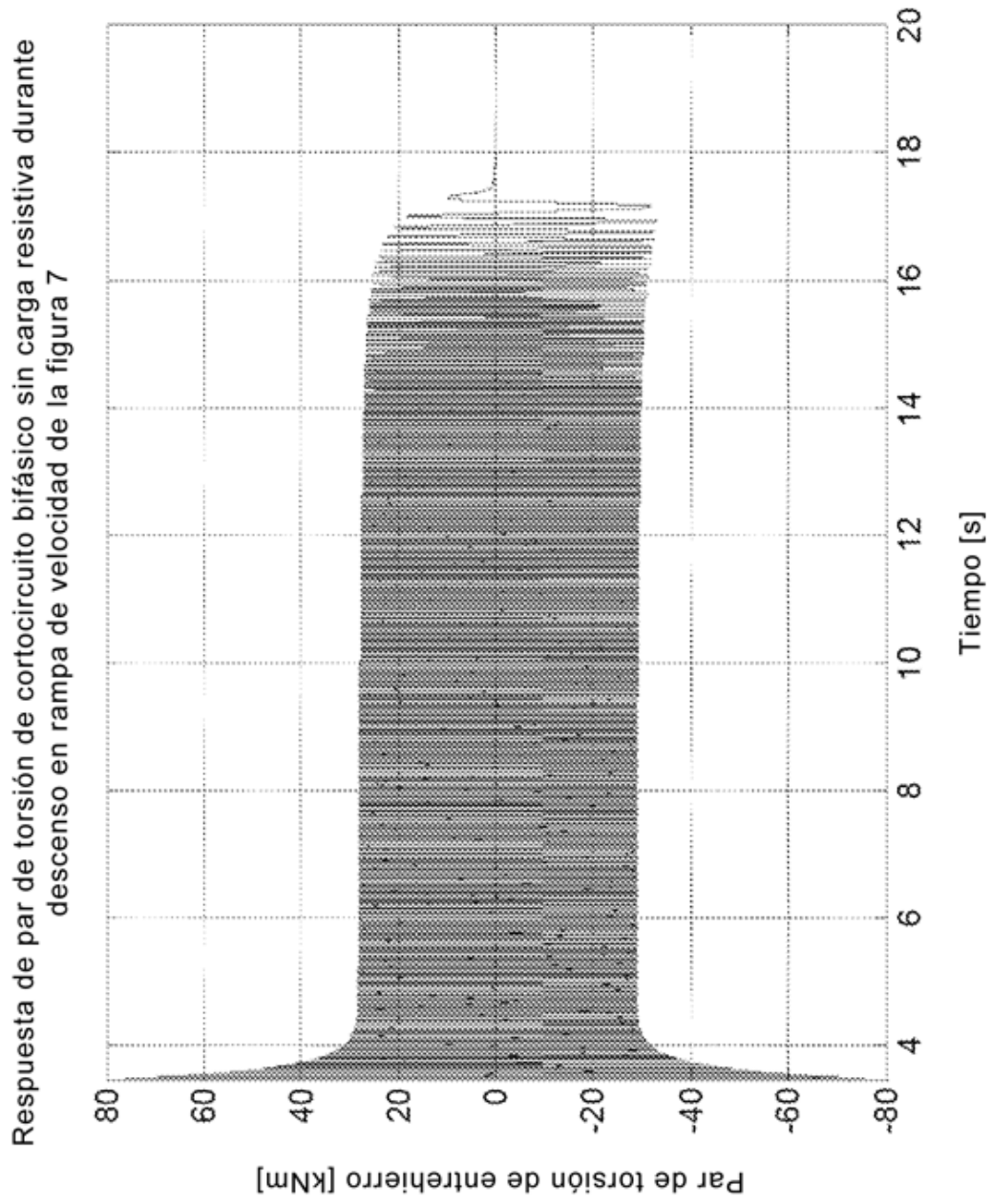


Fig. 8

Primera vista ampliada de la fig.8

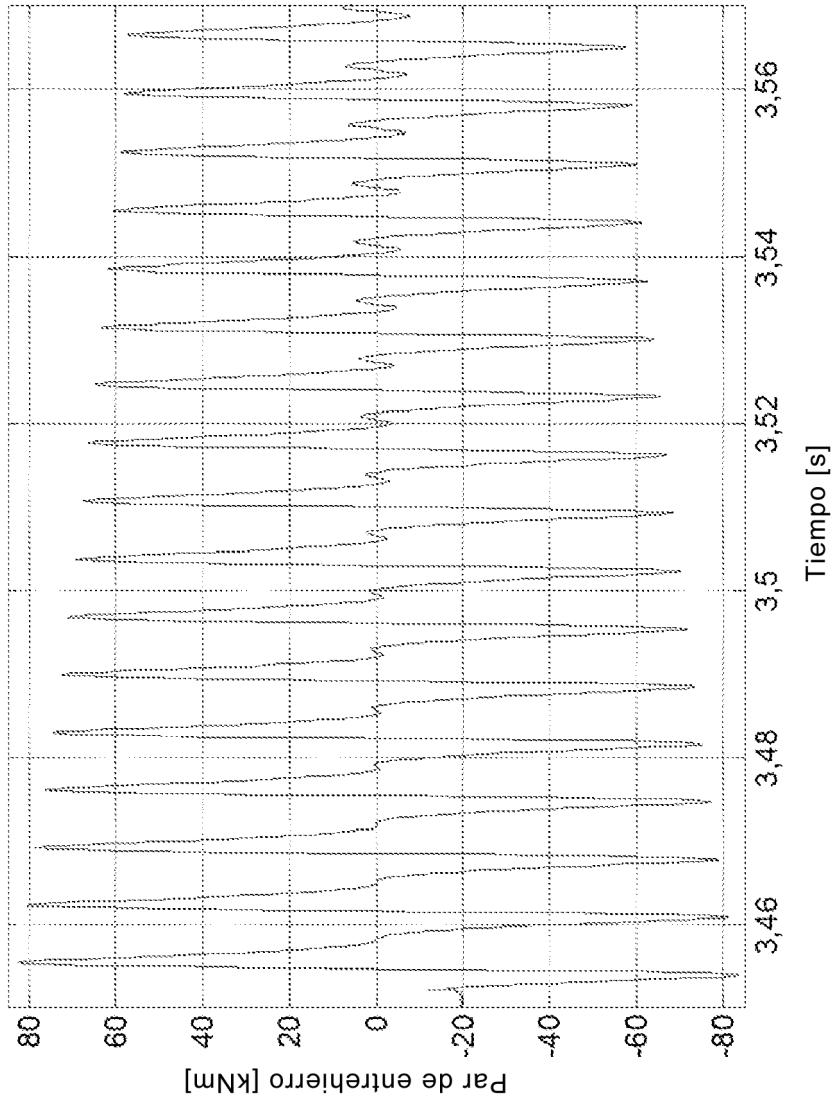


Fig. 9

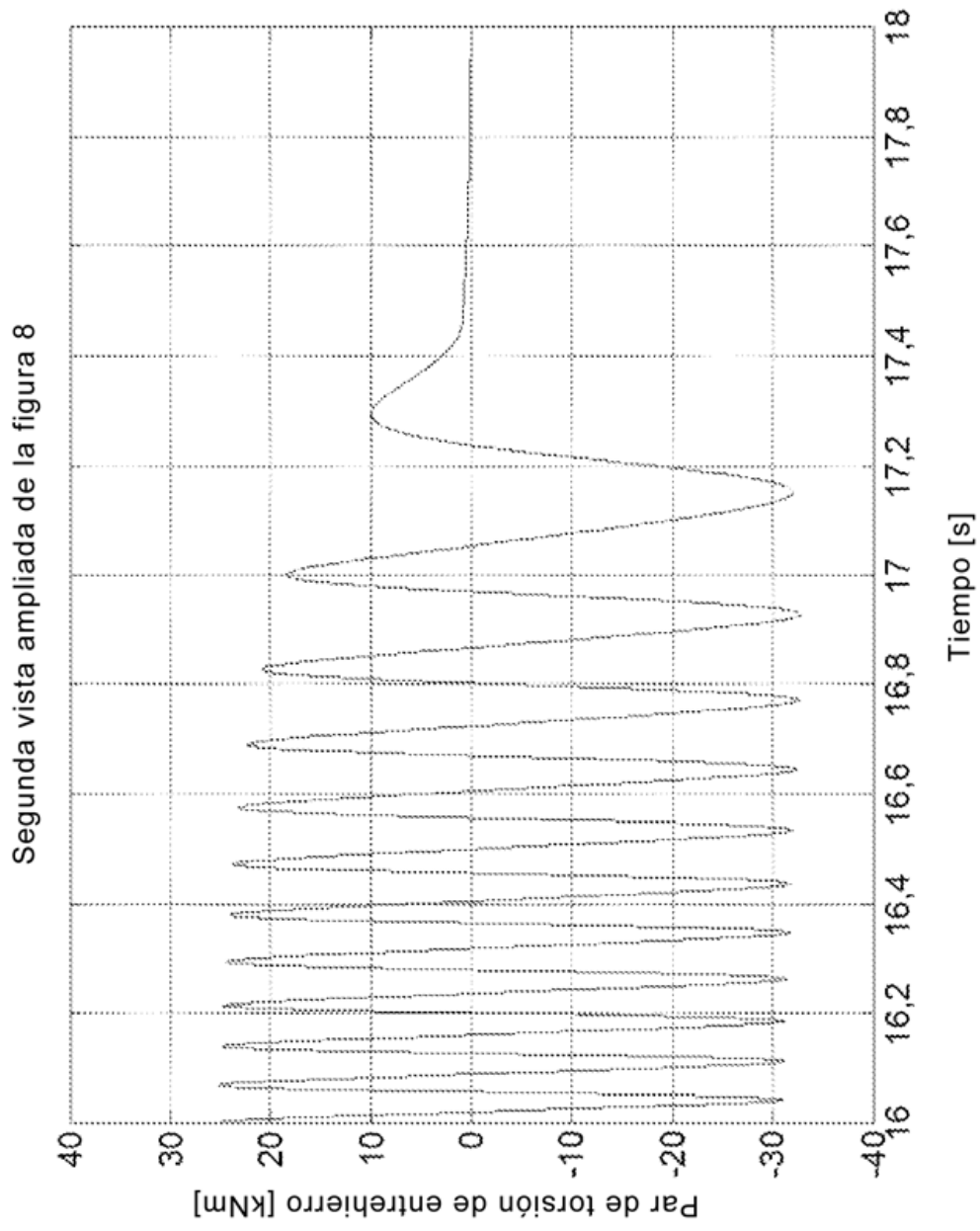


Fig. 10

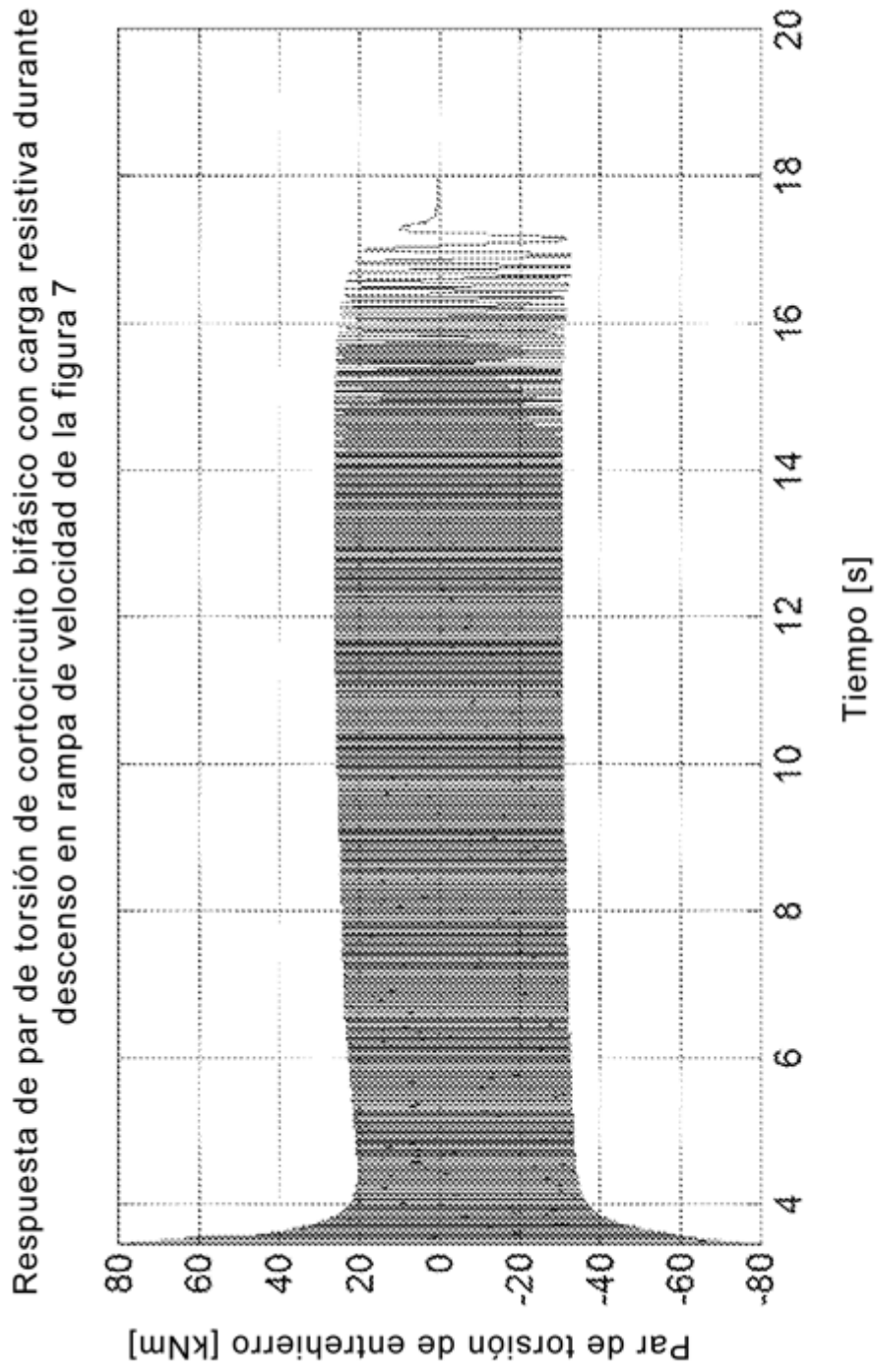


Fig. 11

Primera vista ampliada del gráfico de la figura 11

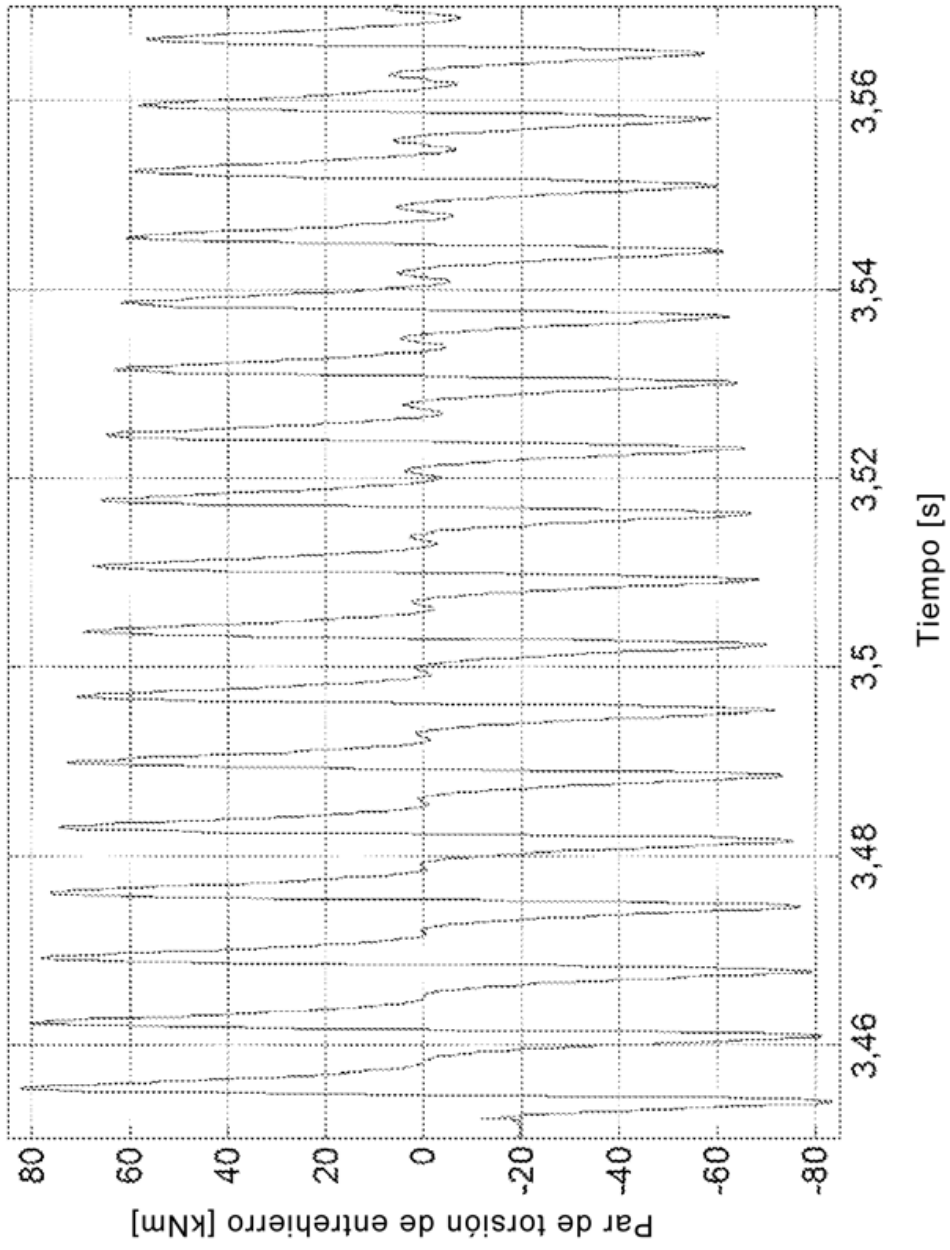


Fig. 12

Segunda vista ampliada del gráfico de la figura 11

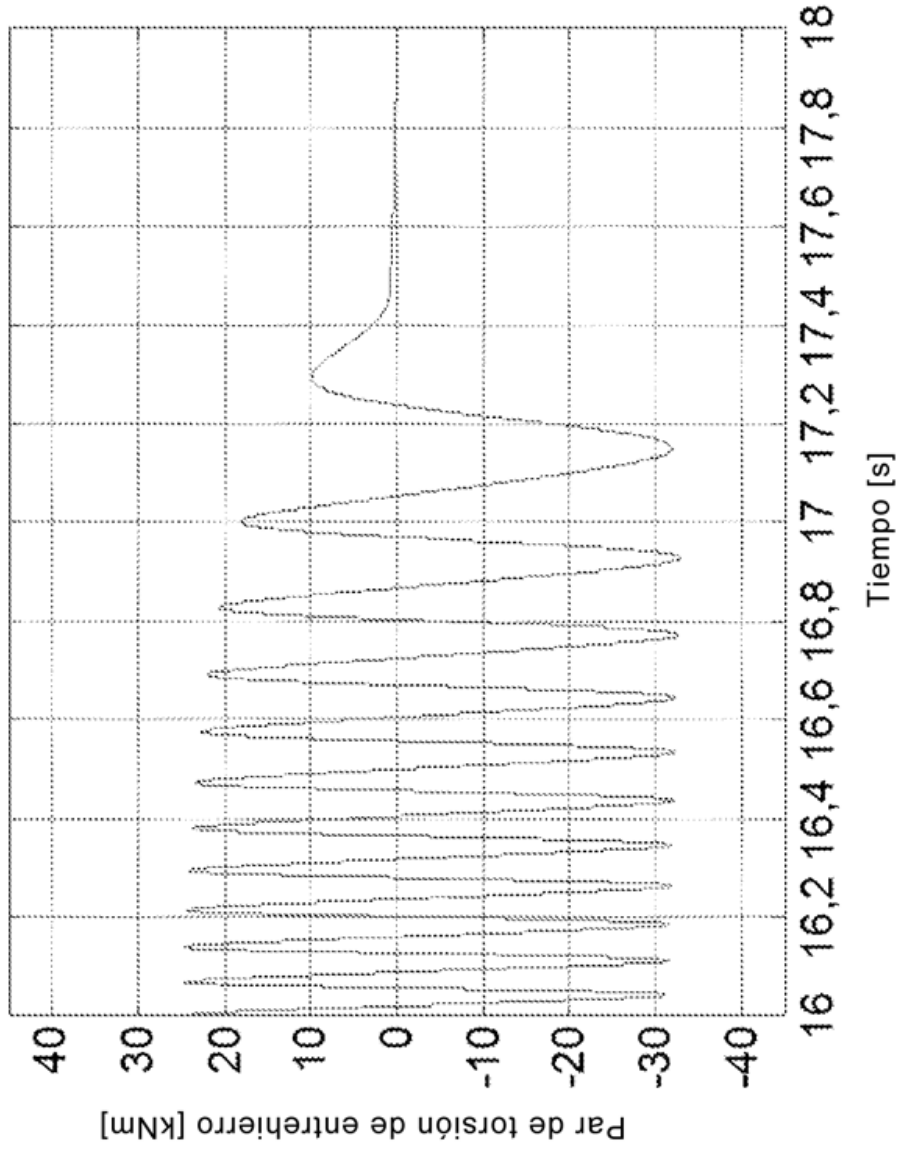


Fig. 13