

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 613 869**

51 Int. Cl.:

**H02P 21/00** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

**H02P 9/42** (2006.01)

**H02P 21/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.01.2011 PCT/EP2011/051049**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.08.2011 WO2011092193**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.01.2011 E 11701812 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.12.2016 EP 2529462**

54 Título: **Método para la emulación de una máquina síncrona**

30 Prioridad:

**26.01.2010 US 298386 P**  
**26.01.2010 DK 201000060**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**26.05.2017**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**TARNOWSKI, GERMÁN CLAUDIO**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 613 869 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

Método para la emulación de una máquina síncrona

### Campo de la invención

5 La presente invención se refiere a una metodología de sistema de control para convertidores de fuente de tensión (VSC). En particular, el sistema de control emula una respuesta inherente de una máquina síncrona conectada a redes de distribución porque reproduce los mecanismos de estabilidad favorables presentes en un generador síncrono a la vez que se mantiene la posibilidad de seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activas y/o reactivas generadas.

### 10 Antecedentes de la invención

El documento "Virtual Synchronous Machine" de Hans-Peter Beck & Ralf Hesse; Proceedings Electrical Power Quality and Utilization - EPQU 2007, 9ª internacional, 9-11 de octubre de 2007, y el documento WO 2009/022198 representan la técnica anterior disponible. Hans-Peter *et al.* aplican el término máquina síncrona virtual (VISMA), mientras que el documento WO 2009/022198 usa el término Conditioning Device for Energy Supply Networks. Este último se basa en la tecnología de inversores actual en la que es posible especificar las propiedades del controlador de tal manera que actúe como una máquina síncrona conectada a una red eléctrica.

15 La VISMA se basa en el modelo matemático dinámico de dos ejes completo de una máquina síncrona excitada eléctricamente. Este modelo dinámico se describe completamente mediante los parámetros eléctricos del eje d-q del estator, el excitador y el amortiguador, así como mediante el acoplamiento magnético y la inercia de masa de un rotor virtual. La total analogía con la máquina síncrona se establece basándose en valores virtuales de par y tensión de excitación. Debido a la analogía con una máquina síncrona, el funcionamiento de la red convencional es posible en paralelo con máquinas síncronas convencionales.

20 En la práctica, la VISMA mide básicamente las tensiones en bornes en el punto de conexión con la red y entonces calcula en tiempo real las corrientes equivalentes de una máquina síncrona. Entonces, las corrientes de la máquina calculadas son los valores de referencia para un controlador de corriente que está controlando las corrientes inyectadas en la red por medio de un inversor. El inversor siempre debe poder alimentar a la red el valor de corriente calculado con el modelo de máquina, de otro modo la VISMA pierde sus propiedades lineales.

25 Para controlar la VISMA en analogía con la máquina síncrona, el árbol virtual se dota de un valor de par virtual para transferir la potencia activa a la red. Para cambiar la potencia activa transferida, debe realizarse un cambio en el par virtual. Entonces, la variación de potencia activa seguirá la dinámica del rotor simulado (oscilaciones de rotor). El árbol virtual se estabiliza en un nuevo ángulo, estando asociado dicho ángulo con una dinámica lenta y un rebasamiento en la potencia activa.

Además se proporciona una excitación virtual que puede usarse para el control de la tensión en bornes. Es necesaria capacidad de computación suficiente para construir el modelo de máquina en tiempo real.

30 Un objeto de la presente invención es proporcionar un modo más rápido y más sencillo para emular una máquina síncrona a la vez que se mantiene la posibilidad de seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activas y/o reactivas generadas.

35 El documento WO 2010/000664 da a conocer un método para emular el comportamiento de una fuente de energía eléctrica conectada operativamente a una red de distribución eléctrica en respuesta a eventos relacionados con la red según el preámbulo de la reivindicación 1.

### 40 Descripción de la invención

En general, la presente invención se refiere al campo de las fuentes de energía eléctrica que se interconectan con la red de distribución eléctrica a través de convertidores electrónicos de energía, por ejemplo, sistemas de almacenamiento de energía, fotovoltaicos solares o de energía eólica. En particular, la presente invención se refiere a técnicas y metodologías específicas, de modo que convertidores electrónicos de energía pueden estabilizar la red de distribución eléctrica durante condiciones de régimen transitorio y para proporcionar mecanismos de estabilidad similares que están presentes de manera inherente en generadores síncronos eléctricos.

45 Los convertidores electrónicos de energía, tales como los VSC, conectados a una red de distribución eléctrica se diseñan normalmente para proporcionar potencia activa y reactiva a la red de distribución eléctrica, estando las potencias desacopladas y siendo independientes de la frecuencia del sistema y de la tensión en bornes. Una ventaja de los convertidores electrónicos de energía es la capacidad de seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activas y reactivas generadas.

50 Los generadores síncronos aplicados normalmente en redes eléctricas tienen una capacidad inherente para soportar

la frecuencia y la tensión de redes de distribución durante regímenes transitorios, tales como el fallo repentino en la generación de energía, defectos en línea o grandes variaciones de carga. Varios mecanismos de estabilidad se proporcionan de manera inherente por generadores síncronos, tales como respuesta inercial, respuesta de tensión, par de sincronización, amortiguación de oscilaciones de potencia y otros.

- 5 En una red eléctrica en la que el número de fuentes de electricidad interconectadas con el convertidor está aumentando constantemente, los mecanismos necesarios para la estabilidad de la red eléctrica disminuyen a medida que se reduce la cantidad relativa de generadores síncronos que provocan problemas de estabilidad a la red eléctrica.

- 10 La presente invención se refiere a una metodología de sistema de control para VSC que emula la respuesta inherente a la máquina síncrona incluyendo los mecanismos de estabilidad favorables para el soporte de red. Además, la máquina síncrona conserva la ventaja asociada con los convertidores electrónicos de energía, concretamente seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activas y/o reactivas generadas.

- 15 Además, los sistemas de generador síncrono interconectados a una red de distribución eléctrica con convertidores de energía (tal como turbinas eólicas de velocidad variable con convertidores totales, generadores fotovoltaicos solares o dispositivos de almacenamiento de energía) tendrán el mismo comportamiento inherente que los generadores síncronos convencionales: por ejemplo reacción inercial inherente automática (lo que es importante para la estabilidad de la red eléctrica), participación del control de frecuencia, reparto de carga automática, amortiguación de red eléctrica, funcionamiento autónomo/paralelo automático.

- 20 Las siguientes ventajas están asociadas con la emulación de una máquina síncrona:

- Cambio de salida de potencia activa inherente automático debido a (y en proporción a) una magnitud de tensión y/o cambio de ángulo en el punto de conexión. Lo mismo se aplica a la salida de potencia reactiva.

- Posibilidad de conectar el VSC en paralelo con una red eléctrica, con otros VSC o con generadores síncronos convencionales del mismo modo que una máquina síncrona convencional.

- 25 - Reacción inercial inherente automática (emulación de inercia) como variación de salida de potencia activa del mismo modo que una máquina síncrona (no es necesaria medición de frecuencia de la red).

- Posibilidad de ajustar la inercia emulada deseada: de manera estática o dinámica, local o remota, independiente o coordinada con otros dispositivos VSC.

- Reparto de carga inherente automática entre otros VSC y/o otros generadores síncronos convencionales.

- 30 - No hay necesidad de bucle de enganche de fase (PLL) para el sistema de control de VSC, lo que evita varios problemas durante el funcionamiento especial requerido de VSC conectados a la red, tal como el funcionamiento en caso de huecos de tensión.

- Capacidades de control de frecuencia de red: Posibilidad de coordinación de control de frecuencia con máquinas síncronas convencionales u otros VSC en paralelo.

- 35 - Posibilidad de ir a funcionamiento autónomo y resincronización adicional con otros VSC o generadores síncronos.

- Posibilidad de añadir funcionalidades adicionales como generador síncrono convencional tales como "amortiguación" y "potencia de sincronización" para la estabilidad de la red eléctrica.

- Posibilidad de ajustar el sistema de control para proporcionar una respuesta dinámica deseada.

- 40 - Puede realizarse modificación en los parámetros emulados para obtener un buen ajuste de la red eléctrica, lo que es imposible en una máquina síncrona dada.

- Posibilidad de tener estrategias de control de la máquina síncrona convencional tales como control de tensión, frecuencia, potencia activa y reactiva.

- Sistema de control híbrido: Combinar metodología de control vectorial desacoplado rápido para control P y Q con mecanismos de respuesta de máquina síncrona para determinar la estabilidad de la red.

- 45 - Los dispositivos STATCOM actuales pueden modificarse con esta nueva funcionalidad, haciendo posible que funcione como un sistema de almacenamiento de energía y que se comporte como una máquina síncrona convencional cuando sea necesario.

- 50 El objeto y las ventajas mencionadas anteriormente se logran proporcionando, en un primer aspecto, un método para emular el comportamiento de una fuente de energía eléctrica conectada operativamente a una red de distribución eléctrica en respuesta a eventos relacionados con la red, comprendiendo el método la etapa de calcular

uno o más escenarios de respuesta de dicha fuente de energía eléctrica en relación con uno o más parámetros eléctricos seleccionados en el que dicha fuente de energía eléctrica se modela de tal manera que se comporta esencialmente como una máquina síncrona.

5 Puede considerarse que el método según el primer aspecto de la presente invención tiene las siguientes características principales: Respuesta de potencia activa y reactiva inherente automática a eventos de la red de distribución eléctrica, respuesta inercial para desequilibrios de potencia activa en la red de distribución eléctrica, es decir estabilidad de frecuencia, soporte de tensión dinámica de régimen transitorio (estabilidad de tensión), amortiguación de oscilaciones de potencia activa y control de potencia activa/reactiva desacoplado rápido. Además, el método según la presente invención puede programarse libremente para el comportamiento dinámico deseado para un soporte de red apropiado.

El término "fuente de energía eléctrica" debe entenderse ampliamente. Por tanto, este término puede cubrir cualquier instalación técnica que puede generar energía eléctrica, tal como por ejemplo una instalación de energía eólica implementada como por ejemplo una turbina eólica individual o un grupo/pluralidad de turbinas eólicas que forman una planta de energía eólica.

15 La máquina síncrona puede comprender uno o más generadores síncronos.

Uno de los parámetros seleccionados puede implicar una respuesta de potencia activa a eventos de red de distribución eléctrica, una respuesta de potencia reactiva a eventos de red de distribución eléctrica y/o respuesta inercial a desequilibrios de potencia activa en la red de distribución eléctrica. Además, uno de los parámetros seleccionados puede implicar respuesta de tensión y/o amortiguación de oscilaciones de potencia activa.

20 En un segundo aspecto, la presente invención se refiere a un producto de programa informático para llevar a cabo el método según el primer aspecto de la presente invención cuando dicho producto de programa informático se ejecuta en un ordenador.

25 En un tercer aspecto, la presente invención se refiere a un método para emular el comportamiento de una fuente de energía eléctrica conectada operativamente a una red de distribución eléctrica en respuesta a eventos relacionados con la red, comprendiendo el método las etapas de

- implementar un modelo de simulación en el que dicha fuente de energía eléctrica se modela de tal manera que se comporta esencialmente como una máquina síncrona, y

- calcular uno o más escenarios de respuesta de dicha fuente de energía eléctrica en relación con uno o más parámetros eléctricos seleccionados.

30 De nuevo, el término "fuente de energía eléctrica" debe entenderse ampliamente. Por tanto, este término puede cubrir cualquier instalación técnica que puede generar energía eléctrica, tal como por ejemplo una instalación de energía eólica implementada como por ejemplo una turbina eólica individual o un grupo/pluralidad de turbinas eólicas que forman una planta de energía eólica.

35 Uno de los parámetros seleccionados puede seleccionarse de un grupo que consiste en: una respuesta de potencia activa a eventos de red de distribución eléctrica, una respuesta de potencia reactiva a eventos de red de distribución eléctrica, respuesta inercial a desequilibrios de potencia activa en la red de distribución eléctrica, respuesta de tensión y amortiguación de oscilaciones de potencia activa.

En un cuarto y final aspecto, la presente invención se refiere a un producto de programa informático para llevar a cabo el método según el tercer aspecto cuando dicho producto de programa informático se ejecuta en un ordenador.

#### 40 **Breve descripción de la invención**

La presente invención se explicará ahora en detalle adicional con referencia a las figuras adjuntas, en las que

la figura 1 muestra un diagrama de bloques de la invención,

45 la figura 2 ilustra la variación de las componentes dinámicas de las tensiones de VSC  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$  debida a un evento de red de distribución eléctrica reflejada como la variación en las tensiones  $V'$  de la red de distribución eléctrica y/o las corrientes  $I'$  de VSC,

la figura 3 ilustra variaciones rápidas de las componentes estáticas de las tensiones de VSC  $E_{ds}$  y  $E_{qs}$  debidas a cambios de punto de referencia en la potencia activa y/o reactiva manipulando variables algebraicas,

la figura 4 muestra la reacción de potencia reactiva (salida) debida a una conexión de carga inductiva en paralelo con generadores síncronos en una red de distribución eléctrica débil,

50 la figura 5 muestra la salida de reacción de potencia activa (línea B) debida a una conexión de carga resistiva en paralelo con generadores síncronos en una red de distribución eléctrica débil,

la figura 6 muestra los cambios desacoplados en las potencias activas (Pe) y reactivas (Qe) generadas tras un cambio de punto de referencia, estando conectado el VSC a una red de distribución eléctrica fuerte,

la figura 7, comparación de potencias activas que resultan de cambios de punto de referencia en la invención (línea B) frente a máquina síncrona convencional (línea A) donde se reflejan las oscilaciones de rotor,

- 5 la figura 8 ilustra el cálculo de las componentes dinámicas  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$  de d-q y el cálculo de las componentes estáticas Eds y Eqs de d-q y el punto de suma, y

la figura 9 ilustra un cálculo de ángulo de sistema de referencia rotatorio.

Aunque la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, se han mostrado realizaciones específicas a modo de ejemplos en los dibujos y se describirán en detalle en el presente documento. Debe entenderse, sin embargo, que la invención no pretende limitarse a las formas particulares dadas a conocer. Más bien, la invención va a cubrir todas las modificaciones, equivalentes y alternativas que se encuentran dentro del espíritu y el alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

- 10

### Descripción detallada de la invención

Se aplicará la siguiente nomenclatura en relación con la descripción detallada de la presente invención:

Configuración	entradas de algoritmos y parámetros predefinidos para programar la unidad de cálculo
d-q	sistema de referencia rotatorio único común con eje directo (d) y eje de cuadratura (q)
E	módulo de la tensión en bornes eficaz entre fases del VSC en frecuencia fundamental
E(t)	valor instantáneo de la tensión en bornes entre fases de VSC
$\bar{E}$	fase de la tensión en bornes entre fases del VSC en frecuencia fundamental
$\bar{E}'$	nueva tensión en bornes de VSC como resultado de un cambio con respecto a $\bar{E}$
Ed	componente calculada de la tensión $\bar{E}$ en el sistema de referencia de eje directo (d)
Eq	componente calculada de la tensión $\bar{E}$ en el sistema de referencia de eje de cuadratura (q)
Eds	componente estática calculada de Ed a partir de valores reales de Vd, Vq, Po y Qo.
Eqs	componente estática calculada de Eq a partir de valores reales de Vd, Vq, Po y Qo.
$\Delta E_d'$	componente dinámica de régimen transitorio calculada de Ed como resultado de cambios en Vd y/o Vq y/o Id y/o Iq
$\Delta E_q'$	componente dinámica de régimen transitorio calculada de Eq como resultado de cambios en Vd y/o Vq y/o Id y/o Iq
f	frecuencia eléctrica
I	módulo de la corriente en bornes eficaz del VSC en frecuencia fundamental
I(t)	valor instantáneo de la corriente de fase del VSC
$\bar{I}$	fase de la corriente en bornes del VSC en frecuencia fundamental
$\bar{I}'$	nueva corriente de bornes de VSC como resultado de un cambio con respecto a $\bar{I}$
Iabc	valores medidos instantáneos de corrientes en bornes de VSC trifásicas
Id	componente de la corriente de fase del VSC medida en el eje directo (d)
Iq	componente de la corriente de fase del VSC medida en el eje de cuadratura (q)
Modo	señal externa para indicar el modo de control como control Q o control V y control P o control f.
P	potencia activa
Po	potencia activa establecida como objetivo
Pe	potencia activa instantánea en el punto de conexión con la red (medida)
Q	potencia reactiva
Qo	potencia reactiva establecida como objetivo
Qe	potencia reactiva instantánea en el punto de conexión con la red (medida)
Ref Q/V	valores de referencia para Q y V Ref Q y V
Ref P/f	valores de referencia para P y f
SG	generador síncrono
V	módulo de la tensión eficaz en el punto de conexión con la red en frecuencia fundamental
$\bar{V}$	fase de la tensión en el punto de conexión con la red en frecuencia fundamental
$\bar{V}'$	nueva tensión en el punto de conexión con la red como resultado de un cambio con respecto a $\bar{V}$
Vd	componente de la tensión en el punto de conexión con la red medida en el eje directo (d)
Vq	componente de la tensión en el punto de conexión con la red medida en el eje de cuadratura (q)
Vdq	nomenclatura combinada para identificar Vd y Vq
VSC	Convertidor de fuente de tensión

Vabc	valores medidos instantáneos de tensiones trifásicas en el punto de conexión con la red
$\theta_e$	ángulo rotado instantáneo calculado del sistema de referencia d-q
$\delta$	ángulo entre fasores $\bar{E}$ y $\bar{V}$
$\delta'$	nuevo ángulo entre fasores $\bar{E}$ y $\bar{V}$ como resultado de un cambio en $\bar{E}$ y/o $\bar{V}$
$\omega_e$	velocidad de rotación del sistema de referencia d-q, que es equivalente a la frecuencia eléctrica en estado estacionario
R+jX	impedancia equivalente de la interfaz ajustable (3) con resistencia R y reactancia X

Tabla 1: Nomenclatura

- En términos funcionales la presente invención tiene como objetivo proporcionar un método para hacer funcionar y controlar un convertidor de fuente de tensión trifásico (VSC) conectado operativamente a una impedancia de interfaz de red o a un transformador, tal como un transformador ajustable, con el objeto de emular el comportamiento inherente de un generador síncrono convencional en lo que se refiere a variaciones inherentes instantáneas de salida de potencias activas y reactivas debidas a variaciones de tensión de red en magnitud y/o ángulo.
- Un modelo adecuado para implementar la presente invención se representa en el diagrama de bloques mostrado en la figura 1, en el que se configura una unidad de cálculo 1 para recibir las siguientes señales de entrada: Vabc, Iabc, Po, Qo y configuración. Además, la unidad de cálculo 1 proporciona las siguientes señales de salida: Ed, Eq,  $\theta_e$ , Pe,  $\omega_e$ , Qe y Vdq. Las señales de entrada y salida individuales se describirán en detalle adicional a continuación.
- La unidad de cálculo 1 proporciona las componentes de tensión Ed y Eq y el ángulo  $\theta_e$  del sistema de referencia interno de rotación para la unidad de VSC 5. Además, recibe señales del dispositivo de medición 4 y de la unidad de control 7, y puede configurarse con diferentes parámetros deseados.
- Internamente, la unidad de cálculo 1 contiene bloques de función para generar componentes estáticas 9 y componentes dinámicas de régimen transitorio 8 de Ed y Eq junto con el ángulo rotado instantáneo  $\theta_e$  del sistema de referencia d-q interno 10.
- La unidad de cálculo 1 también contiene un bloque de función 14 para descomponer las tensiones medidas Vabc en las componentes Vd y Vq y las corrientes medidas Iabc en las componentes Id e Iq en el sistema de referencia d-q. Además, la unidad de cálculo 1 contiene un bloque de función 11 para calcular la potencia activa instantánea Pe y la potencia reactiva instantánea Qe en el punto de conexión con la red.
- La unidad de cálculo 1 tiene una entrada de configuración con algoritmos y/o parámetros predefinidos para proporcionar el dispositivo con la respuesta estática y dinámica deseable. La entrada de configuración puede coordinarse con el diseño de la impedancia de interfaz 3. El valor de entrada de Po es una señal manipulada que puede usarse para el control de potencia activa o el control de frecuencia. El valor de entrada de Qo es una señal manipulada que puede usarse para el control de potencia reactiva o el control de tensión. Un cambio en Po o Qo produce un cambio instantáneo en la potencia activa o reactiva generada a partir de la unidad de VSC 5, respectivamente. La red de distribución eléctrica 2 es la red de energía a la que se conecta la unidad de VSC 5 a través de la impedancia de interfaz 3 y a la que se suministran o en la que se absorben la potencia activa Pe y la potencia reactiva Qe según las necesidades inherentes de la red de distribución eléctrica para estabilidad y soporte, y según las acciones de control.
- La impedancia de interfaz 3 está colocada en la trayectoria de energía entre la unidad de VSC 5 y la red de distribución eléctrica 2. Preferiblemente, la impedancia de interfaz puede ajustarse o diseñarse en coordinación con los parámetros y algoritmos configurados en la unidad de cálculo 1 con el fin de obtener una filtración de armónicos de tensión deseable y una salida de potencia activa y reactiva inherente deseada a partir la unidad de VSC 5 en respuesta a eventos de la red de distribución eléctrica 2.
- La unidad de medición 4 mide valores instantáneos de tensiones trifásicas y corrientes en el punto de conexión con la red de distribución eléctrica 2.
- La unidad de VSC 5 maneja las siguientes entradas a partir de la unidad de cálculo 1: Ed, Eq y  $\theta_e$ . Además, proporciona las siguientes salidas: Pe, Qe en forma de tensiones y corrientes.
- La unidad de VSC 5 incluye un inversor electrónico de potencia para generar tensiones trifásicas alternas, estando conectado el inversor operativamente a una fuente de tensión continua 6 y a la red de distribución eléctrica 2 a través de la impedancia de interfaz 3. La electrónica de potencia de conmutación con algoritmo apropiado genera tensión alterna trifásica  $\bar{E}$  a partir de las componentes calculadas Ed y Eq y el ángulo de sistema de referencia rotatorio calculado  $\theta_e$ .
- La fuente de energía de tensión directa 6 conectada a la unidad de VSC 5 puede suministrar o absorber potencias activas y reactivas a/de la unidad de VSC 5 y mantener el nivel de tensión CC dentro de un intervalo limitado.

- La unidad de control 7 recibe las siguientes entradas: Ref Q/V, Ref P/f, Modo Pe, f, Qe y V, y genera las siguientes salidas a la unidad de cálculo 1: Qo, Po. El sistema de control tal como se muestra en la figura 1 puede hacerse funcionar en cuatro modos de funcionamiento diferentes: 1) control de potencia activa; 2) control de frecuencia eléctrica; 3) control de potencia reactiva; 4) control de tensión. Manipula la entrada Po de la unidad de cálculo 1 para el control de potencia activa o el control de frecuencia, y la entrada Qo de la unidad de cálculo 1 para el control de potencia reactiva o el control de tensión.
- Los cálculos de las componentes de tensiones dinámicas de régimen transitorio,  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$ , de las tensiones  $E_d$  y  $E_q$ , respectivamente, para la unidad de VSC 5 se basan en valores reales de las tensiones  $V_d$  y  $V_q$  y las corrientes  $I_d$  e  $I_q$  en el punto de conexión con la red de distribución eléctrica 2.
- El calculador de componentes dinámicas 8 proporciona una variación dinámica de régimen transitorio de la tensión en bornes  $\bar{E}$  de la unidad de VSC 5 en respuesta a cambios en tensiones  $V_d$  y/o  $V_q$  y/o cambios en corrientes  $I_d$  y/o  $I_q$ . Las componentes dinámicas de régimen transitorio,  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$ , pueden calcularse con el fin de emular el comportamiento dinámico de la tensión interna de una máquina síncrona, o en un modo diferente según un comportamiento dinámico deseado de la tensión  $\bar{E}$  durante eventos de red. El calculador de componentes dinámicas 8 se comunica con el calculador de componentes estáticas 9 para potenciar la respuesta dinámica.
- Los cálculos de las componentes de tensiones estáticas,  $E_{ds}$  y  $E_{qs}$ , de las tensiones  $E_d$  y  $E_q$ , respectivamente, para la unidad de VSC 5 se basan en entradas externas del objetivo de potencia activa, Po, y el objetivo de potencia reactiva, Qo, y en las componentes de tensión real de la red de distribución eléctrica 2,  $V_d$  y  $V_q$ , expresadas en el sistema de referencia interno. El calculador de componentes estáticas 9 no tiene cálculos dinámicos y realiza un cálculo algebraico que permite cambios muy rápidos de potencias activas o reactivas generadas, Pe y Qe, a partir de la unidad de VSC 5 cambiando las componentes de  $E_d$  y  $E_q$  en respuesta a cambios desacoplados en Po y/o Qo. El calculador de componentes estáticas 9 se comunica con el calculador de componentes dinámicas 8 para potenciar la respuesta estática.
- El calculador de ángulo de sistema de referencia rotatorio 10 calcula el ángulo rotado instantáneo  $\theta_e$  del sistema de referencia interno con una dinámica que emula las oscilaciones de rotor de una máquina síncrona que incluye características de amortiguación. Este cálculo se basa en valores reales de potencia activa objetivo Po y potencia activa generada Pe. El cálculo de  $\theta_e$  puede programarse libremente para introducir un mecanismo de estabilidad como potencia de sincronización y respuesta inercial de manera similar a una máquina síncrona. El comportamiento dinámico de  $\theta_e$  puede incluir características de amortiguación programables que mejoran las oscilaciones de potencia activa para el soporte de red de distribución eléctrica (2). La unidad de medición de potencia activa y reactiva instantáneas 11 calcula los valores instantáneos trifásicos de las potencias activas y reactivas intercambiadas en el punto de conexión con la red de distribución eléctrica 2.
- La función de supervisión para limitación y protección 12 monitoriza y evalúa los límites de funcionamiento de la unidad de VSC 5. Lleva a cabo acciones de limitación sobre valores críticos dentro de la unidad de cálculo 1 y protege a la unidad de VSC 5 frente a acciones perjudiciales.
- El punto de suma 13 añade las componentes estáticas respectivas,  $E_{ds}$  y  $E_{qs}$ , del calculador 9 a las componentes dinámicas de régimen transitorio,  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$ , del calculador 8 para generar las componentes de tensión entradas  $E_d$  y  $E_q$  para la unidad de VSC 5.
- La unidad de transformación de eje del sistema de referencia interno 14 transforma los valores instantáneos trifásicos de tensiones y corrientes de la unidad de medición 4 en componentes respectivas de tensiones  $V_d$  y  $V_q$  y corrientes  $I_d$  e  $I_q$  representadas en un sistema de referencia de ejes d-q rotatorio arbitrario con un ángulo  $\theta_e$  facilitado por el calculador de ángulo de sistema de referencia rotatorio 10.
- Tal como ya se ha mencionado, la presente invención se refiere a una estrategia para hacer funcionar y controlar una unidad de VSC 5 trifásica con impedancia de interfaz de red 3. Un objetivo de la presente invención es emular el comportamiento inherente de un generador síncrono convencional para el soporte de la red de distribución eléctrica 2 en lo que se refiere a variaciones inherentes instantáneas de salida de potencias activas y/o reactivas debidas a variaciones de tensión de la red en magnitud y/o ángulo con la posibilidad de seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activas y/o reactivas generadas.
- La unidad de VSC 5 genera tensiones en bornes trifásicas equilibradas con un valor entre fases  $E(t)$ . En la frecuencia fundamental  $E(t)$  puede representarse como un fasor  $\bar{E}$ . Cuando la unidad de VSC 5 se sincroniza con una red de distribución eléctrica 2 con tensión  $\bar{V}$  a través de la impedancia de interfaz 3, el flujo de potencia activa Pe y potencia reactiva Qe en el punto de conexión con la red de distribución eléctrica 2 viene dado respectivamente por:

$$Pe = \frac{R}{R^2 + X^2} \cdot E \cdot V \cdot \cos(\delta) + \frac{X}{R^2 + X^2} \cdot E \cdot V \cdot \text{sen}(\delta) - \frac{R}{R^2 + X^2} \cdot V^2 \quad (1.1)$$

$$Qe = \frac{X}{R^2 + X^2} \cdot E \cdot V \cdot \cos(\delta) - \frac{R}{R^2 + X^2} \cdot E \cdot V \cdot \text{sen}(\delta) - \frac{X}{R^2 + X^2} \cdot V^2 \quad (1.2)$$

en las que el significado de las notaciones usadas en las ecuaciones puede encontrarse en la tabla 1 anterior.

5 La resistencia R de la impedancia de interfaz 3 puede diseñarse con un valor bajo. Por tanto, la resistencia R puede despreciarse para el análisis cualitativo, conduciendo a la siguiente expresión:

$$Pe \approx \frac{E \cdot V}{X} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (1.3)$$

$$Qe \approx \frac{E \cdot V}{X} \cdot \cos(\delta) - \frac{V^2}{X} \quad (1.4)$$

10 Cualquier evento en la red producirá un cambio en la magnitud de tensión de red V, o un cambio en el ángulo de fase de la tensión de red, lo que produce un cambio en el ángulo  $\delta$  entre  $\bar{E}$  y  $\bar{V}$ , o ambos tipos de cambios. De este modo, la potencia activa Pe y la potencia reactiva Qe de la unidad de VSC 5 cambiarán de acuerdo con el tipo de evento de red (cambio de V o cambio de  $\delta$  o ambos cambios) y con el valor de la impedancia de interfaz 3 R+jX, tal como se muestra en las ecuaciones (1.3) y (1.4), si la tensión  $\bar{E}$  de VSC permanece sin cambios y controlada.

15 Durante el evento de red, pueden realizarse acciones de estabilidad adicionales con el fin de proporcionar la respuesta de potencia activa Pe y potencia reactiva Qe deseadas para soportar la red de distribución eléctrica 2 controlando, en un modo dinámico, la magnitud y la fase de la tensión  $\bar{E}$  de VSC.

Para el control de VSC, se usa un sistema de referencia de ejes d-g rotatorio interno para generar el fasor  $\bar{E}$  de las componentes Ed y Eq dadas en el eje directo y el eje de cuadratura, respectivamente.

20 Con el fin de dotar a la unidad de VSC de mecanismos de estabilidad similares como un generador síncrono normal, se introducen respuestas dinámicas de régimen transitorio de tensión interna similar controlando la tensión  $\bar{E}$  de VSC según los cambios instantáneos en la tensión  $\bar{V}$  de la red y en las corrientes  $\bar{I}$  de VSC. Además, la dinámica para las oscilaciones de ángulo de tensión  $\delta$ , oscilaciones de potencia activa, respuesta inercial, potencia de sincronización y amortiguación también se introduce controlando el ángulo instantáneo  $\theta_e$  del sistema de referencia de ejes d-q rotatorio interno.

25 En la presente invención, el fasor  $\bar{E}$  se genera a partir de componentes dadas de Ed y Eq en el eje directo y el eje de cuadratura del sistema de referencia d-q rotatorio interno, respectivamente.

30 Durante los eventos de red, la respuesta de potencia activa/reactiva inherente (descrita por las ecuaciones 1.1 y 1.2) puede potenciarse adicionalmente añadiendo componentes de tensión dinámicas de régimen transitorio,  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$ , en referencias de tensiones en bornes, Ed y Eq, que se establecen mediante el algoritmo de cálculo 8 (véase la figura 1). El algoritmo de cálculo 8 toma los valores medidos instantáneos de  $\bar{V}$  e  $\bar{I}$  descompuestos en las componentes d-q y genera las componentes de tensión dinámicas de régimen transitorio  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$ .

35 La figura 2 muestra las componentes dinámicas de régimen transitorio  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$  que producen un cambio dinámico de régimen transitorio del fasor  $\bar{E}$ . El algoritmo de cálculo 8 puede programarse para generar las componentes de tensión dinámicas  $\Delta E_d'$  y  $\Delta E_q'$  para emular el comportamiento dinámico de la tensión interna de un generador síncrono, o puede programarse de diferente modos par proporcionar diferentes componentes dinámicas deseadas de la tensión en bornes  $\bar{E}$  de VSC cuando se experimentan variaciones de tensiones  $\bar{V}'$  y/o corrientes  $\bar{I}'$  de la red de distribución eléctrica con el fin de soportar la red de distribución eléctrica.

En la presente invención, puede controlarse el ángulo rotado instantáneo  $\theta_e$  del sistema de referencia d-q rotatorio interno con el fin de introducir la dinámica deseada en el ángulo  $\delta$  entre las tensiones  $\bar{E}$  y  $\bar{V}$ .

40 La respuesta de potencia activa inherente debida a eventos de red activa la emulación de oscilaciones de rotor y oscilaciones de potencia de manera similar a un generador síncrono comparando la potencia real Pe y el punto de

referencia Po. La dinámica de las oscilaciones de rotor del generador síncrono se emula como oscilaciones de ángulo del sistema de referencia d-q interno, lo que a su vez se refleja como oscilaciones de ángulo de tensión  $\delta$  y oscilaciones de potencia eléctrica Pe.

5 Para introducir respuesta inercial, la velocidad de rotación  $\omega_e$  del sistema de referencia d-q se acelera o desacelera según la diferencia entre la potencia activa real Pe y el punto de referencia Po y según un valor deseado de inercia que produce la oscilación de potencia activa deseada para la respuesta inercial. El valor de la inercia emulada puede programarse libremente. No son necesarias mediciones de la frecuencia de red.

10 Para introducir una componente de amortiguación de oscilación de potencia se añade un término en fase con desviación de  $\omega_e$  a la potencia activa generada Pe. Para introducir una componente de potencia de sincronización se añade un término en fase con oscilaciones de  $\delta$  a la potencia activa generada Pe.

Pueden usarse otros tipos de control para controlar el ángulo rotado instantáneo  $\theta_e$  de la referencia dq de rotación interna con el fin de introducir la respuesta deseada del VSC para la estabilidad de la red de distribución eléctrica y el control de Pe y Qe.

15 La figura 4 ilustra la respuesta de potencia reactiva Qe en una situación en la que el modelo según la invención se aplica a una red de distribución eléctrica débil que contiene generadores síncronos. La carga de la red de distribución eléctrica aumenta en una gran variación de carga inductiva. La respuesta de potencia reactiva se potencia mediante el control dinámico de la tensión  $\bar{E}$  de VSC.

20 La figura 5 ilustra (línea B) la respuesta de potencia activa Pe en una situación en la que el modelo según la invención se aplica a una red de distribución eléctrica débil que contiene generadores síncronos. La carga de la red de distribución eléctrica aumenta en una gran variación de carga resistiva. La respuesta de potencia activa se potencia mediante el control dinámico de la tensión  $\bar{E}$  de VSC y mediante la respuesta inercial, las oscilaciones de potencia y la amortiguación introducidas mediante el control dinámico del ángulo  $\theta_e$  del sistema de referencia d-q interno. La otra forma de onda (línea A) es una comparación con la salida proporcionada por dispositivos similares a los expuestos en Hans-Peter Beck y en el documento WO 2009/022198 donde la salida de convertidor se basa completamente en cálculos de variables de estado y seguimiento de punto de referencia de corriente de convertidor. La línea A muestra un retardo tras el evento de red y un aumento de velocidad limitado de la potencia activa.

25 Como la respuesta de potencia activa se establece en primer lugar mediante una condición de la tensión en bornes  $\bar{E}$  de VSC y la impedancia 3, el efecto es inherente y tiene lugar instantáneamente, lo que es diferente de lo que puede proporcionarse mediante los sistemas de la técnica anterior. Además, el cálculo de oscilación del ángulo de tensión incluye una componente de amortiguación que puede programarse adicionalmente según las necesidades de estabilidad de la red de distribución eléctrica. La oscilación del ángulo de tensión se calcula para proporcionar potencia de sincronización positiva y capacidades de amortiguación positivas a la red de distribución eléctrica.

30 Además, haciendo referencia de nuevo a la figura 1, la presente invención proporciona control de potencias activas y reactivas tal como se implementa normalmente con convertidores electrónicos de potencia. La invención proporciona la posibilidad de seguimiento rápido y desacoplado de puntos de referencia para potencias activa Pe y/o reactiva Qe generadas por medio de señales de Po y Qo manipuladas por los controladores 7. Los rápidos cambios en las potencias activas y/o reactivas generadas se realizan mediante cálculos algebraicos 9 de las componentes estáticas Eds y Eqs de las tensiones en bornes, Ed y Eq, de VSC en el sistema de referencia d-q arbitrario. Las nuevas componentes estáticas Eds y Eqs se calculan considerando los valores reales de las tensiones Vd y Vq de la red de distribución eléctrica y los valores manipulados Po y Qo de los controladores con el fin de obtener los cambios rápidos desacoplados deseados de potencia activa y/o reactiva. El bloque de cálculo de componentes estáticas 9 tiene el conjunto apropiado de ecuaciones algebraicas y parámetros para generar un cambio en las potencias activas Pe o reactivas Qe generadas manipulando Po o Qo, respectivamente.

45 El siguiente conjunto de ecuaciones algebraicas se implementa en el bloque 9 de la figura 1 para calcular las componentes estáticas Eds y Eqs apropiadas para una entrada deseada de objetivo de potencia activa Po y objetivo de potencia reactiva Qo:

$$Eds = \frac{K1}{Vd^2 + Vq^2} \cdot [(R1 \cdot Vd - X1 \cdot Vq) \cdot Po + (X1 \cdot Vd - R1 \cdot Vq) \cdot Qo] + (K2 \cdot Vd + K3) \quad (1.5)$$

$$Eqs = \frac{K4}{Vd^2 + Vq^2} \cdot [(X1 \cdot Vd - R1 \cdot Vq) \cdot Po - (R1 \cdot Vd - X1 \cdot Vq) \cdot Qo] + (K5 \cdot Vq + K6) \quad (1.6)$$

50 en las que R1 y X1 son valores estimados de resistencia y reactancia que se eligen en coordinación con el diseño de la impedancia de red 3, y K1, K2, K3, K4, K5 y K6 son constantes deseadas. No obstante, este conjunto de ecuaciones puede modificarse según respuestas deseadas del VSC.

La figura 3 muestra un cambio rápido en el fasor  $\overline{E}$  cambiando las componentes estáticas  $E_{ds}$  y  $E_{qs}$  de los cálculos algebraicos. El cambio en el fasor  $\overline{E}$  de este modo produce el cambio exacto en las potencias activas  $P_e$  y/o reactivas  $Q_e$ .

5 La figura 6 muestra la respuesta de la invención cuando se cambian los puntos de referencia de las potencias activas  $P_e$  y reactivas  $Q_e$  en una situación cuando la invención se conecta a una red de distribución eléctrica fuerte 2. Las respuestas en las potencias activas y reactivas están desacopladas.

Los valores manipulados de los controladores,  $P_o$  y  $Q_o$ , actúan de manera independiente sobre las potencias activas y reactivas del VSC.

10 Estos cambios rápidos y desacoplados presentan las mismas ventajas que los convertidores de energía con control de corrientes d-q desacopladas, pero no son posibles con generadores síncronos debido a su baja respuesta inherente a cambios de punto de referencia y potencias activas y reactivas acopladas de manera permanente (véase la figura 7). En la figura 7, la potencia reactiva está desacoplada (línea D) pero está acoplada inherentemente en una máquina síncrona (línea C). La invención expuesta en Hans-Peter Beck y en el documento WO 2009/022198 emula la línea A y la línea C y no puede proporcionar cambios rápidos de punto de referencia como la línea B y la línea D.

15 Se emplea una función de limitación y protección de supervisión 12 (véase la figura 1) para limitar las corrientes de VSC, las tensiones  $E_d$  y  $E_q$  de VSC, el ángulo de diferencia de tensión  $\delta$ , la potencia activa  $P_e$  o la potencia reactiva  $Q_e$  o una combinación de estos. Aunque en la figura 1 se muestra un único bloque 12, puede usarse más de una función de supervisión para realizar las funciones de limitación y protección. La función de limitación y protección es útil porque el VSC podría sobrecargarse cuando funciona cerca de la salida de potencia nominal y está  
20 produciéndose un evento de red. Los límites pueden ser límites absolutos, límites dependientes del tiempo, dependientes del estado de funcionamiento o una combinación de los mismos.

La figura 8 ilustra la estructura de bloques para el cálculo de las componentes de tensión interna  $E$  en el sistema de referencia d-q rotatorio. Las componentes estáticas de la tensión  $E$  se calculan con un algoritmo implementado en el bloque 9 de la figura 8. Este bloque contiene ecuaciones algebraicas expresadas en el eje directo y el de cuadratura d-q y se basan en las ecuaciones (1.5) y (1.6). Un algoritmo de este tipo recibe como entradas la tensión en bornes real  $V$  en el sistema de referencia d-q y los objetivos de tensión estática  $P_o$  y  $Q_o$  del controlador 7 (véase la figura 1). En 9 se incorpora un filtro para la tensión en bornes  $V$  para un mejor rendimiento. Las componentes dinámicas de régimen transitorio de la tensión interna  $E$  se calculan con un algoritmo implementado en el bloque 8 que contiene las ecuaciones de tensión dinámica expresadas en el eje directo y el de cuadratura d-q. Las ecuaciones dinámicas emulan de un modo adecuado un comportamiento de tensión deseado de manera similar a una máquina síncrona en lo que se refiere al régimen transitorio de tensión. Un algoritmo de este tipo recibe como entradas la tensión en bornes real  $V$  en el sistema de referencia d-q y las corrientes en bornes reales  $I$  en el sistema de referencia d-q. Las componentes estáticas y dinámicas de la tensión interna  $E$  se añaden en el bloque 13 mediante un algoritmo de suma adecuado.

35 Los bloques 8 y 9 se comunican entre sí a través del canal de comunicación 15 que facilita indicadores y/o valores numéricos para un mejor rendimiento estático y dinámico de la invención durante diferentes eventos de red y de control. Los algoritmos implementados en los bloques 8 y 9 pueden modificarse o programarse fácilmente a través de la configuración de entrada con el fin de proporcionar diferentes respuestas deseadas sobre los componentes de la tensión interna  $E$ .

40 La figura 9 ilustra la estructura de bloques 10 para el cálculo del ángulo rotado instantáneo  $\theta_e$  y la velocidad  $\omega_e$  del sistema de referencia d-q rotatorio interno. El cálculo se realiza con un algoritmo matemático que emula el comportamiento del rotor del generador síncrono, tal como respuesta inercial, amortiguación de oscilaciones de potencia y potencia de sincronización. La respuesta se refleja en el ángulo instantáneo  $\theta_e$  y la velocidad  $\omega_e$  del sistema de referencia d-q rotatorio interno. Las entradas para el cálculo son el objetivo de potencia activa estática  $P_o$  y la salida de potencia activa real  $P_e$ . El algoritmo matemático respectivo puede modificarse o programarse fácilmente a través de la configuración de entrada para proporcionar diferentes respuestas deseadas sobre el ángulo instantáneo  $\theta_e$  y/o la velocidad  $\omega_e$ .

**REIVINDICACIONES**

1. Método para emular el comportamiento de una fuente de energía eléctrica (6) conectada operativamente a una red de distribución eléctrica (2) en respuesta a eventos relacionados con la red, comprendiendo el método la etapa de calcular uno o más escenarios de respuesta de dicha fuente de energía eléctrica (6) en relación con uno o más parámetros eléctricos seleccionados cuando dicha fuente de energía eléctrica se modela tal que se comporta como una máquina síncrona,
- 5
- caracterizado porque el cálculo de uno o más escenarios de respuesta comprende una etapa de calcular una componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje directo ( $E_d$ ) y una componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje de cuadratura ( $E_q$ ), en un sistema de referencia rotatorio d-q, en el que la etapa de calcular la componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje directo ( $E_d$ ) y la componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje de cuadratura ( $E_q$ ), comprende cálculos de
- 10
- una componente de tensión estática de la componente de tensión interna en el eje directo ( $E_{ds}$ ) y una componente de tensión estática de la componente de tensión interna en el eje de cuadratura ( $E_{qs}$ ), respectivamente, en el que los cálculos de las componentes de tensiones estáticas ( $E_{ds}$ ,  $E_{qs}$ ), de las tensiones ( $E_d$ ,  $E_q$ ), respectivamente, se basan en entradas externas del objetivo de potencia activa ( $P_o$ ) y el objetivo de potencia reactiva ( $Q_o$ ) y componentes de tensión real ( $V_d$ ,  $V_q$ ) de la red de distribución eléctrica (2), y
- 15
- una componente de tensión dinámica de la componente de tensión interna en el eje directo ( $\Delta E_d'$ ) y una componente de tensión dinámica de la componente de tensión interna en el eje de cuadratura ( $\Delta E_q'$ ), respectivamente, en el que los cálculos de las componentes de tensiones dinámicas de régimen transitorio ( $\Delta E_d'$ ,  $\Delta E_q'$ ), de las tensiones ( $E_d$ ,  $E_q$ ), respectivamente, se basan en valores reales de tensiones ( $V_d$ ,  $V_q$ ) y corrientes ( $I_d$ ,  $I_q$ ) en el punto de conexión con la red de distribución eléctrica (2)
- 20
- en el que la componente de tensión estática de la componente de tensión interna en el eje directo ( $E_{ds}$ ) se añade a la componente de tensión dinámica de la componente de tensión interna en el eje directo ( $\Delta E_d'$ ) para formar la componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje directo ( $E_d$ ), y en el que la componente de tensión estática de la componente de tensión interna en el eje de cuadratura ( $E_{qs}$ ) se añade a la componente de tensión dinámica de la componente de tensión interna en el eje de cuadratura ( $\Delta E_q'$ ) para formar la componente de tensión interna en el sistema de referencia de eje de cuadratura ( $E_q$ ).
- 25
2. Método según la reivindicación 1, en el que la fuente de energía eléctrica comprende una instalación de energía eólica, tal como una turbina eólica individual o una planta de turbinas eólicas que comprende una pluralidad de turbinas eólicas.
- 30
3. Método según la reivindicación 1 ó 2, en el que la máquina síncrona comprende un generador síncrono.
4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en el que uno de los parámetros seleccionados se selecciona de un grupo que consiste en: una respuesta de potencia activa a eventos de red de distribución eléctrica, una respuesta de potencia reactiva a eventos de red de distribución eléctrica, respuesta inercial a desequilibrios de potencia activa en la red de distribución eléctrica, respuesta de tensión y amortiguación de oscilaciones de potencia activa.
- 35
5. Producto de programa informático para llevar a cabo el método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores cuando dicho producto de programa informático se ejecuta en un ordenador.
- 40

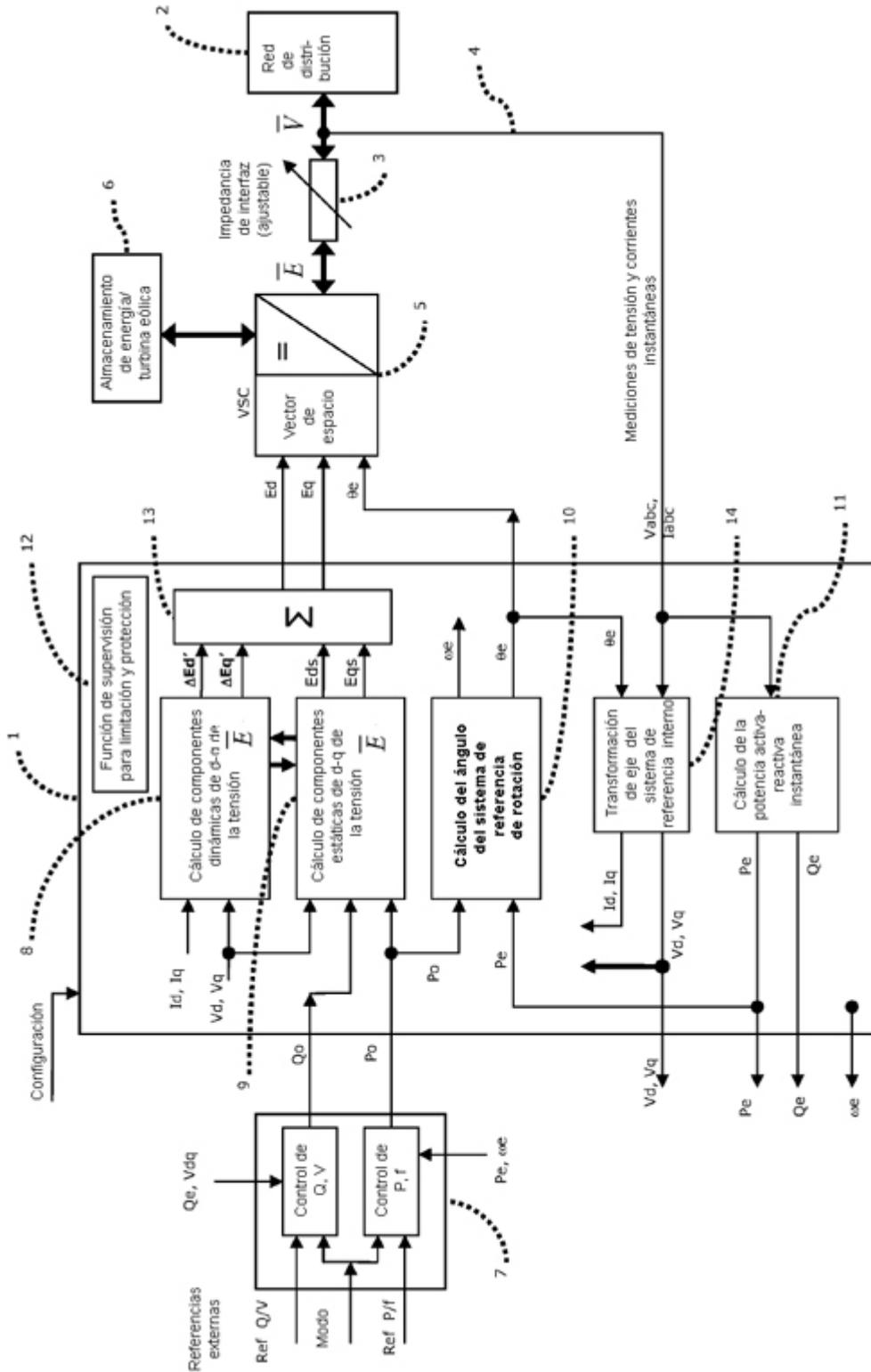


Fig. 1

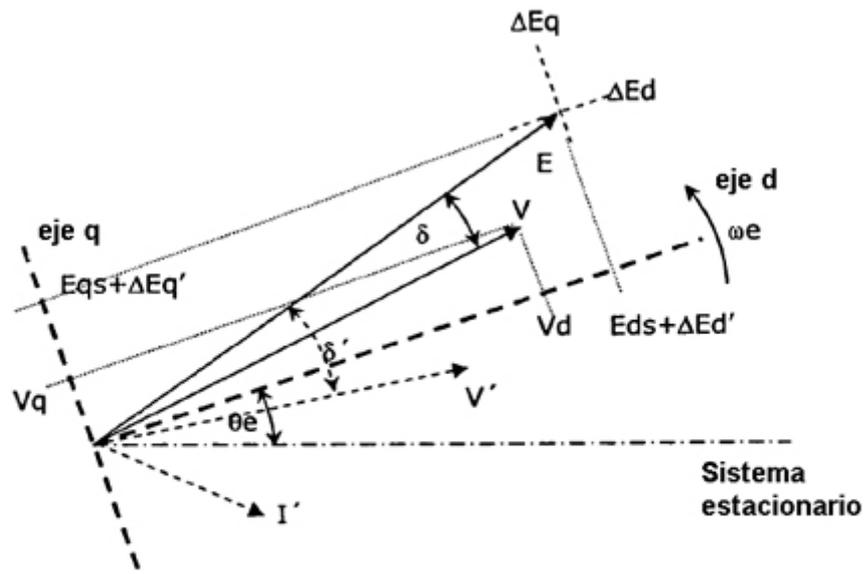


Fig. 2

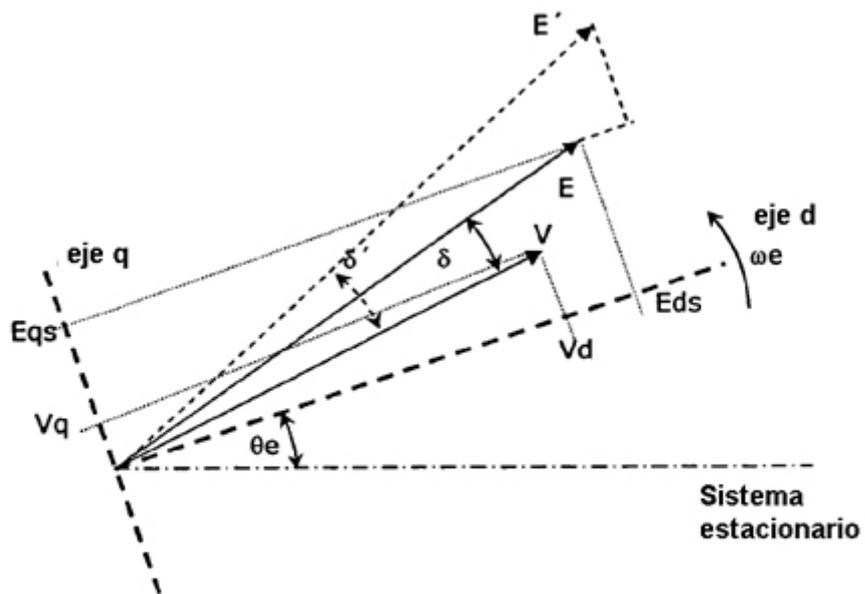


Fig. 3

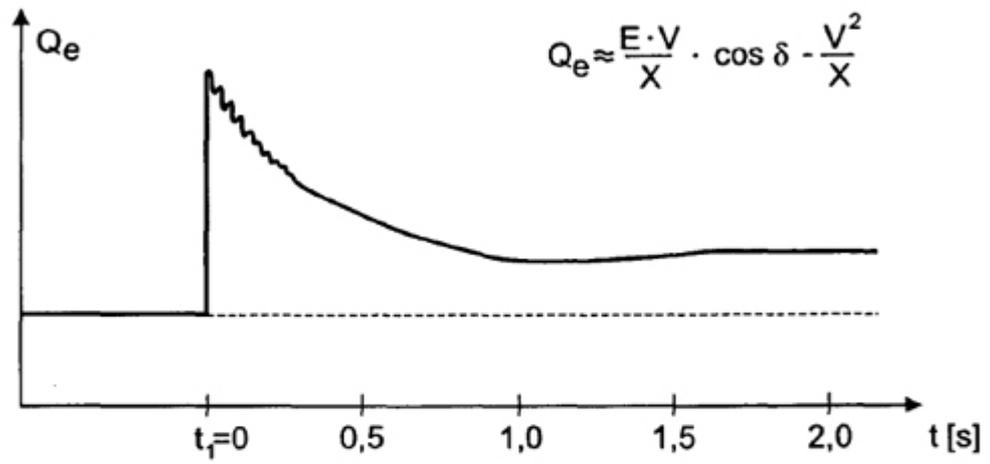


Fig. 4

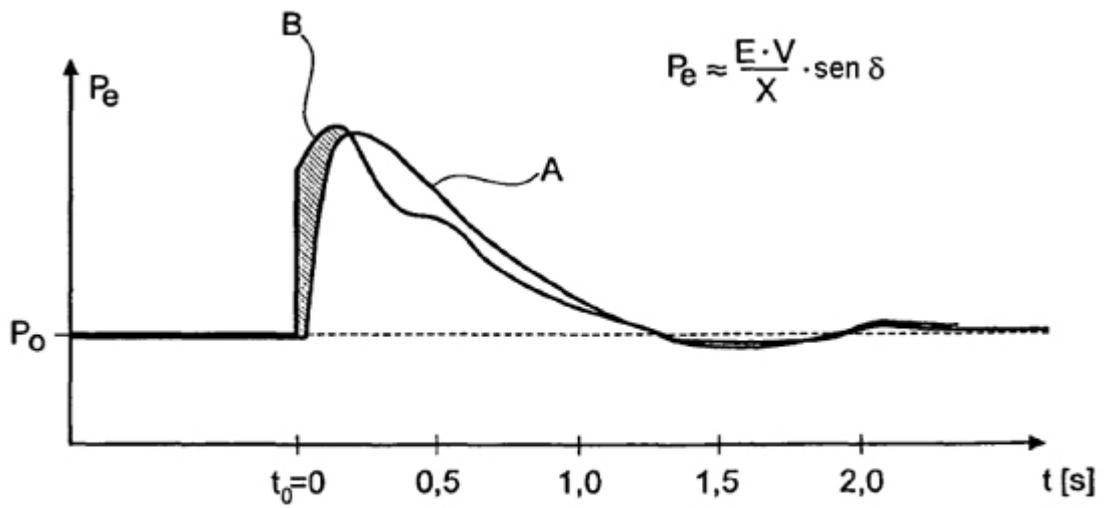


Fig. 5

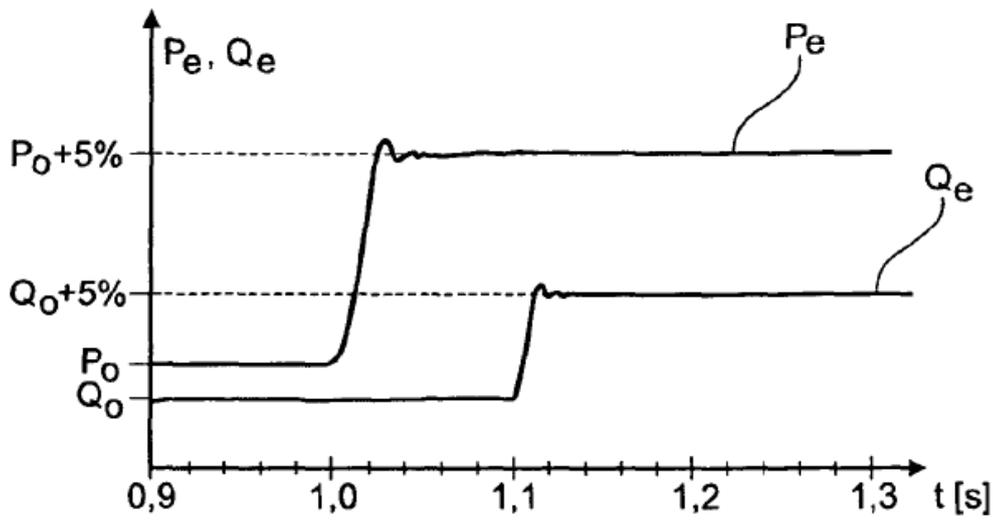


Fig. 6

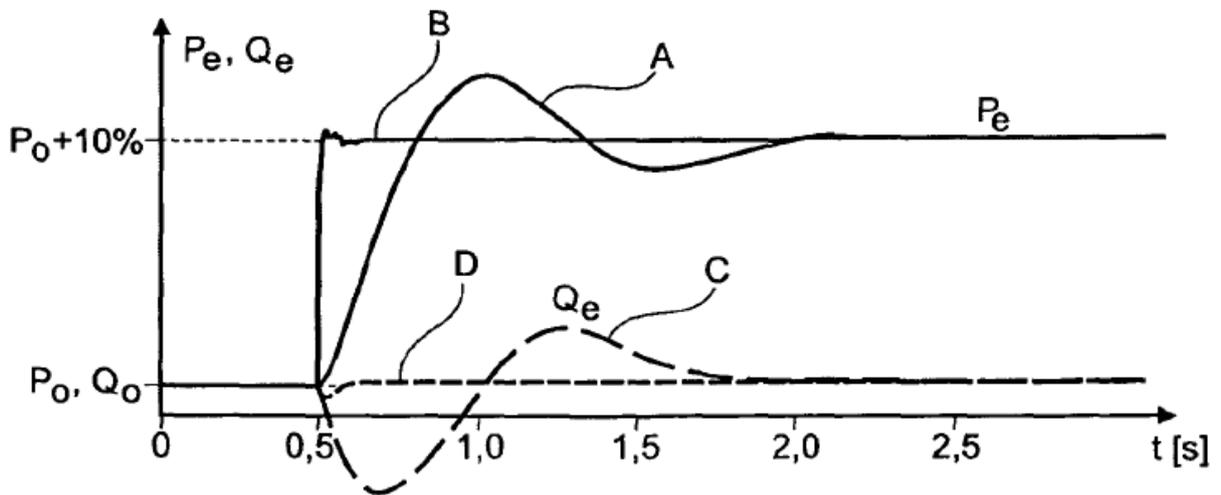


Fig. 7

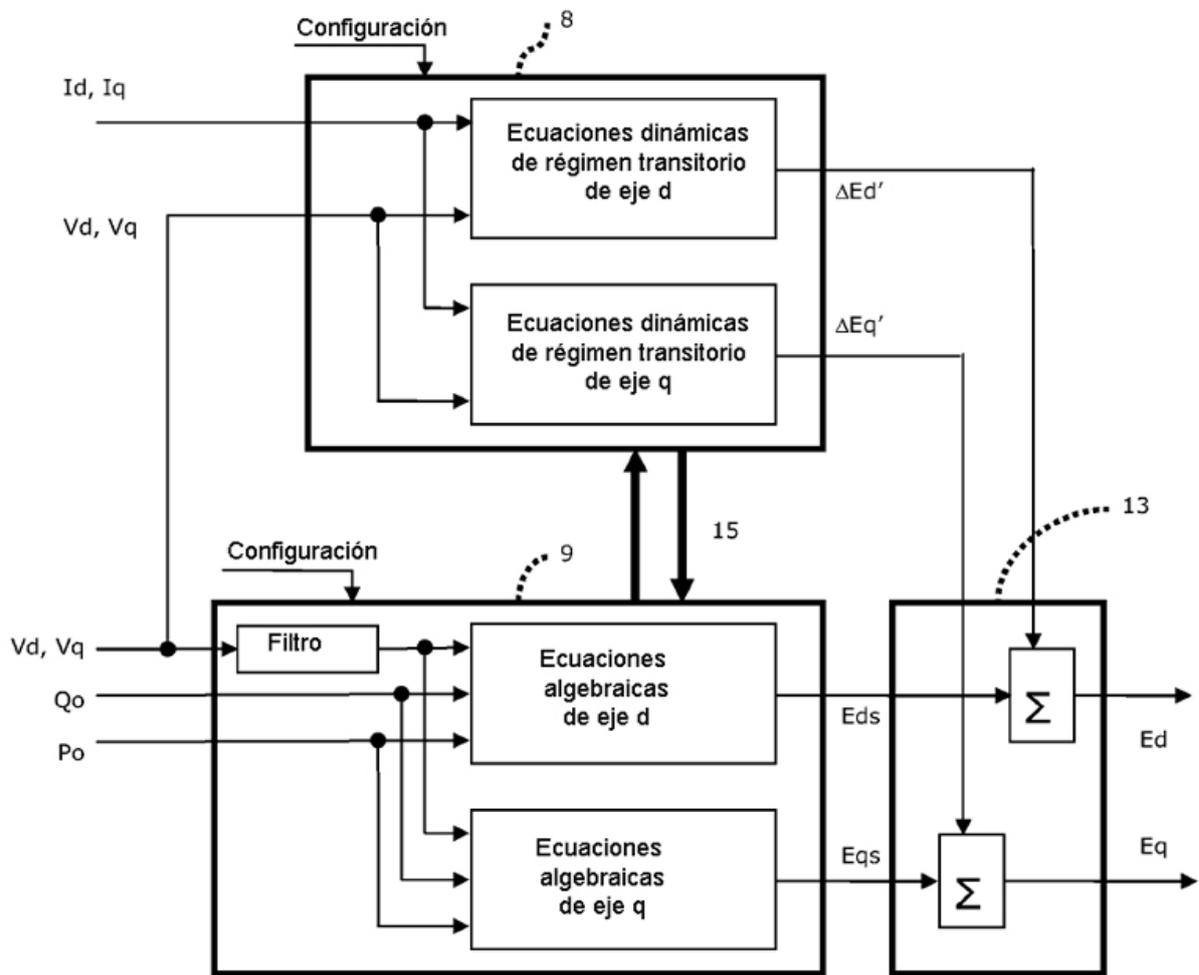


Fig. 8

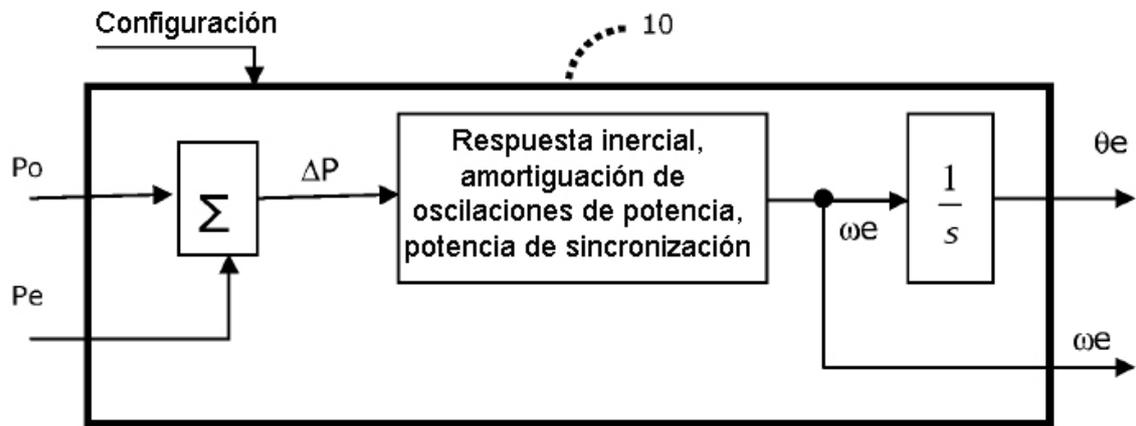


Fig. 9