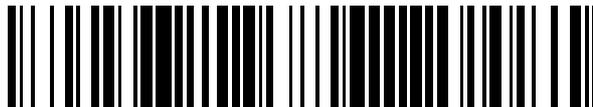


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 370 357**

51 Int. Cl.:

H02J 3/36 (2006.01)

H02M 5/458 (2006.01)

H02M 7/797 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07765412 .7**

96 Fecha de presentación: **14.06.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **2036181**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.03.2009**

54 Título: **SISTEMA HVDC Y MÉTODO PARA CONTROLAR UN CONVERTIDOR DE FUENTE DE TENSIÓN EN UN SISTEMA HVDC.**

30 Prioridad:
30.06.2006 US 817352 P

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
14.12.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
14.12.2011

73 Titular/es:
**ABB TECHNOLOGY AG
AFFOLTERNSTRASSE 44
8050 ZÜRICH, CH**

72 Inventor/es:
JIANG-HAFNER, YING

74 Agente: **Carvajal y Urquijo, Isabel**

ES 2 370 357 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

Sistema HVDC y método para controlar un convertidor de fuente de tensión en un sistema HVDC

Campo técnico

5 La presente invención hace referencia a un método para controlar el convertidor de fuente de tensión en un sistema de corriente continua de alta tensión (HVDC, por sus siglas en inglés) y a un sistema HVDC.

Antecedentes de la invención

Un sistema HVDC comprende una primera y segunda estaciones convertidoras, cada una de las cuales contiene un convertidor de fuente de tensión (VSC, por sus siglas en inglés) para transferir energía eléctrica de una primera red de corriente alterna (CA) a una segunda red de CA.

10 Los convertidores de fuente de tensión (VSC) no sólo se utilizan para sistemas de corriente continua de alta tensión (HVDC) sino también, por ejemplo, como compensadores estáticos de reactivos (SVC, por sus siglas en inglés). En la aplicación HVDC, el convertidor de fuente de tensión se encuentra conectado entre un enlace de corriente continua (CC) y una red de CA; y en la aplicación como compensador estático de reactivos, el convertidor de fuente de tensión se encuentra conectado entre una fuente de tensión continua y una red de CA. En ambas aplicaciones, el
15 convertidor de fuente de tensión debe poder generar una tensión de CA de la misma frecuencia que la de la red de CA. El flujo de potencia activa y reactiva a través del convertidor es controlado mediante la modulación de la amplitud y la posición de fase, respectivamente, de la tensión de CA generada por el convertidor de fuente de tensión con respecto a la tensión de la red de CA.

20 En particular, el convertidor de fuente de tensión equipado con transistores conectados en serie (IGBT, del inglés "Insulated Gate Bipolar Transistor" (transistor bipolar de puerta aislada)) ha hecho posible la utilización de este tipo de convertidores para tensiones comparativamente altas. Se utiliza modulación por ancho de pulsos (PWM) para el control de la tensión de CA generada que permite un control muy rápido de la tensión.

25 A partir de US 6400585 ya se conoce un sistema de control para el control de tensión de una estación convertidora en un sistema HVDC. El propósito del sistema de control es mantener la tensión de un enlace de corriente continua dentro de límites seguros de funcionamiento incluso en condiciones de tensión anormales.

30 El sistema HVDC conocido comprende una primera y segunda estaciones convertidoras, cada una de las cuales contiene un convertidor de fuente de tensión conectado entre un enlace de CC y una red de CA en cada lado del enlace de CC. Un sistema de control de corriente para la estación convertidora tiene medios de control del flujo de potencia activa entre el enlace de CC y la red de CA influenciando el desplazamiento de fase entre la tensión de barra en la red de CA y la tensión puente del convertidor de fuente de tensión. Los términos tensión de barra y tensión puente se explican más abajo. El sistema de control comprende medios para la generación de una señal de orden de cambio de fase en respuesta a una indicación de una condición de tensión anormal en el enlace de CC, y medios para influenciar la posición de fase de la tensión puente en respuesta a dicha señal de orden de cambio de fase, para
35 garantizar que el desplazamiento de fase entre la tensión de puente y la tensión de barra resulte en un flujo de potencia activa del enlace de CC a la red de CA. Un medio de bucle enganchado en fase (PLL, por sus siglas en inglés) garantiza que el sistema de control de la estación convertidora funcione en sincronismo con la posición de fase de la tensión de barra de la red de CA.

40 El flujo de potencia activa en el enlace de CC debe balancearse. Esto significa que la potencia activa que sale del enlace debe ser igual a la potencia recibida por el enlace. Cualquier diferencia puede hacer que la tensión de CC aumente o disminuya rápidamente. Para lograr este balance de potencia una de las estaciones convertidoras controla la tensión de CC. La otra estación convertidora puede controlar el flujo de potencia activa del enlace de CC mediante el control de la tensión de CC de manera correspondiente. Habitualmente la estación convertidora en subida controla la tensión de CC y la estación convertidora de bajada controla el flujo de potencia activa.

45 A partir de "An electromagnetic transient simulation model for voltage sourced converter based HVDC transmission" (Un modelo de simulación electromagnética transitoria para convertidores de fuente de tensión basado en transmisión de HVDC) de Qahraman et al, Conferencia canadiense de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Informática, Cataratas del Niágara, Ontario, Canadá, 2-5 de mayo de 2004, vol. 2, páginas 1063-1066, ISBN: 0-7803-8253-6, se conoce el control individual de la potencia activa y reactiva en un convertidor de fuente de tensión, donde controladores integrales proporcionales actúan sobre errores de potencia real y reactiva para generar la magnitud y fase respectivamente de las referencias de tensión a un controlador interno por PWM.

50 Restaurar la electricidad después de un corte de electricidad en un gran área de una red de CA o red de distribución de CA puede ser difícil. Es necesario restablecer en la línea una pluralidad de centrales eléctricas. Normalmente, esto se hace con la ayuda de la energía eléctrica del resto de la red. En caso de falta de electricidad en la red, se hace necesario realizar el denominado arranque en negro para el arranque de la red eléctrica.

5 Para realizar un arranque en negro, algunas centrales eléctricas normalmente están equipadas con pequeños generadores diesel que pueden utilizarse para arrancar generadores más grandes con muchos megavatios de capacidad, que a su vez pueden utilizarse para arrancar los generadores principales de la central eléctrica. Las plantas generadoras que utilizan turbinas de vapor requieren potencia de servicio de la central de hasta el 10% de su capacidad para las bombas de agua de alimentación de calderas, ventiladores de tiro forzado de calderas o para la preparación de combustible. Sin embargo, es poco rentable proporcionar tanta capacidad de emergencia a cada central, por lo cual debe proporcionarse potencia para arranques en negro mediante redes de transmisión eléctrica de otras centrales.

Una secuencia típica de arranque en negro basada en un escenario real puede ser la siguiente:

- Una batería arranca un pequeño generador diesel instalado en una central hidroeléctrica.
- 10 • La potencia eléctrica generada por el generador diesel se utiliza para poner operativa la central hidroeléctrica.
- Se proporciona energía eléctrica a líneas de transmisión principales entre la central hidroeléctrica y otras áreas.
- La potencia eléctrica de la presa hidroeléctrica se utiliza para arrancar una de las centrales eléctricas térmicas (de carbón).
- La potencia eléctrica de la central de base se utiliza para reiniciar todas las demás centrales eléctricas en el sistema incluyendo las centrales nucleares.
- 15 • Finalmente, la potencia eléctrica se vuelve a suministrar a la red de distribución eléctrica general y se envía a los consumidores.

20 Restaurar la electricidad después de un corte no es un proceso sencillo. Pequeñas perturbaciones se producen continuamente mientras el sistema se encuentra deficitario y frágil durante el proceso de restauración, y la red experimentará diferentes condiciones, desde una red caída en una variedad de condiciones de red débiles a una red de CA normal fuerte. Para mantener la estabilidad de la frecuencia y tensión durante el proceso de restauración, se necesita un plan de restauración del sistema general coordinado.

25 A partir de "Einfluss der Liberalisierung auf die Versorgungssicherheit in den Stromnetzen bzw. Regelungserfordernisse durch die Behörden", publicado como Gutachten_Glavitsch.pdf en <http://www.versorgungssicherheit.at/download>, se conoce por ejemplo que la restauración de electricidad en una red de CA caída debe realizarse mediante la identificación de áreas autónomas en la red que puedan alimentar una red local y mediante la conexión gradual posterior de otras áreas de red.

30 Cuando se conecta un convertidor a una red isla con sólo generación, por ejemplo una central eólica, o sólo consumo, o la mezcla de ambos, será muy difícil predecir la potencia activa y la potencia reactiva. Por lo tanto, será difícil determinar una potencia activa deseada P_{ref} y una potencia reactiva deseada Q_{ref} y será poco práctico controlarlas.

Cuando se conecta un convertidor a una red eléctrica de CA caída, es decir, sin suministro eléctrico en absoluto, el sistema de control antes descrito conocido no funcionará porque no hay tensión de CA para sincronizar para el PLL, y el control de corriente no funcionará porque la corriente se determina naturalmente por la carga conectada.

35 Si se conecta un convertidor a una red eléctrica de CA muy débil, es decir, la potencia del corto circuito existente en la red es aproximadamente la misma o menor a la potencia del convertidor, es muy difícil para el sistema de control conocido antes descrito mantener la estabilidad, ya que la red de CA débil proporciona una tensión de barra de CA más oscilante, que lleva a la oscilación del PLL y control de corriente ya que ambos sistemas utilizan la tensión de barra de CA como entrada.

40 A partir de WO 03/026118 A1, se conoce el hecho de que el convertidor de fuente de tensión puede utilizarse para alimentar una red de tensión alterna caída o débil. No se divulga cómo se logra esto.

Resumen de la invención

45 Un primer objeto de la invención consiste en proporcionar un método y un sistema para controlar un convertidor de fuente de tensión en un enlace HVDC que permita una energización más estable de una red de CA caída. Un segundo objeto es encontrar un método para el arranque en negro de una red de CA, donde el método se base en el método de control de un convertidor de fuente de tensión.

El primer objeto se logra mediante un método según la reivindicación 1 y un sistema según la reivindicación 11. El segundo objeto se logra mediante un método según la reivindicación 9. En las reivindicaciones dependientes se describen realizaciones preferentes.

50 Según la invención, la energización de una red de CA caída se logra mediante el control de la frecuencia y amplitud de tensión de la tensión de CA generada por un convertidor de fuente de tensión para operar el convertidor de fuente de tensión como un generador de fuente de tensión independientemente de las condiciones en una red de CA conectada. En cambio, el sistema de control de convertidor conocido controla la corriente del convertidor de fuente de

tensión y reacciona en el estado operativo de la red de CA, como se describe con anterioridad. El control de frecuencia y tensión pueden estabilizar la tensión y la frecuencia de la tensión de CA generada, es decir, para mejorar la fuerza de la red de CA débil.

5 Un sistema HVDC que conecta dos redes de CA y comprende dos convertidores de fuente de tensión es capaz cuando se encuentra controlado según la invención para proporcionar un arranque en negro cuando cualquiera de las dos redes de CA experimenta un corte de energía eléctrica.

10 Una de las dos estaciones convertidoras, la que se encuentra conectada a una red de CA con suministro eléctrico y en funcionamiento, mantendrá la tensión de CC del sistema HVDC en su valor nominal. Según el segundo aspecto de la invención, la otra de las dos estaciones convertidoras, que está conectada a una red de CA sin suministro de energía eléctrica, crea una tensión de CA con una frecuencia y amplitud predeterminadas. La tensión de CA creada se utiliza después para activar las líneas de transmisión de la red de CA, donde la red de CA está conectada a otras centrales eléctricas. Mediante tal soporte de energía eléctrica de CA de la estación convertidora HVDC pueden arrancar las centrales eléctricas. La red se restablece de manera gradual mediante el reinicio de más centrales eléctricas y la conexión de más cargas.

15 Un sistema HVDC que contenga convertidores de fuente de tensión equipados con el control según la presente invención hará que el proceso de la restauración de la energía eléctrica sea más fácil y sin problemas. A diferencia de las unidades de generación que tienen inercia e involucran un control de potencia mecánico, el VSC equipado con el control según la invención puede hacerse muy rápido, ya que no existe inercia. Debido al control rápido, el VSC funciona como control de potencia que mantiene el equilibrio de potencia eléctrica entre la generación y el consumo, es decir, el convertidor funciona como un rectificador que suministra potencia eléctrica de la red de CA al lado de CC cuando la generación de potencia eléctrica es superior al consumo de potencia eléctrica, y el convertidor funciona como un inversor que suministra potencia eléctrica del lado de CC a la red de CA cuando la generación de potencia eléctrica es inferior al consumo de potencia eléctrica. De este modo, los puntos fundamentales que deben considerarse tradicionalmente en el proceso de arranque en negro y restauración de una red se vuelven menos importantes, lo que hace que la restauración de la red sea mucho más sencilla.

20 En una realización de la invención, se proporciona un control de retroalimentación de tensión con una función de caída de tensión adaptativa, que proporciona control de la tensión de CA generada por el convertidor de fuente de tensión y al mismo tiempo proporciona una potencia reactiva apropiada que comparte entre las otras fuentes de potencia reactiva en la red de CA conectada, tal como dispositivos reguladores de tensión. Por lo tanto, la función de caída de tensión adaptativa mantiene la amplitud de tensión de CA en un punto de conexión común entre el convertidor de fuente de tensión y la red de CA muy rígido bajo condiciones operativas diferentes, desde una carga pasiva por un sistema de CA débil con poca generación a un sistema de CA fuerte con todas las generaciones reiniciadas.

30 En otra realización de la invención, un medio de bucle enganchado en fase (PLL) comprende medios generadores de señal para generar una señal que representa la frecuencia deseada y el ángulo de fase de la tensión de CA a ser generada por el convertidor de fuente de tensión, según el orden de frecuencia y potencia activa deseada de modo tal que la frecuencia de la red de CA conectada se mantenga casi constante. Los medios generadores de señal funcionan como una función de caída de frecuencia adaptativa, de manera correspondiente. Se necesita una pequeña variación de la frecuencia para lograr una buena compartición de cargas entre las otras unidades generadoras en la red de CA conectada. La función de caída de frecuencia adaptativa hace posible controlar la frecuencia casi constante excepto por la pequeña variación necesaria para lograr una buena compartición de cargas entre las otras unidades generadoras.

Otras realizaciones ventajosas de la invención serán evidentes a partir de la descripción de realizaciones preferentes de la invención y las reivindicaciones adjuntas.

45 La simulación de una restauración de una red ha demostrado que con equipos de control según la invención, se obtienen un tensión de CA y frecuencia estables bajo diferentes condiciones de red de CA, comenzándose con una carga pasiva por un sistema de CA débil con poca generación eléctrica y transformándose en un sistema de CA fuerte con toda la generación de energía eléctrica reiniciada.

Breve descripción de los dibujos

50 La presente invención se explicará en mayor detalle mediante la descripción de realizaciones con referencia a los dibujos adjuntos, que son todos esquemáticos y en la forma de diagramas de una sola línea y diagramas de bloque, respectivamente, y en donde:

La figura 1 es un diagrama de bloque esquemático de una sola línea de un sistema de transmisión de corriente de alta tensión como se conoce en el arte previo,

55 La figura 2 es una realización del equipo de control para un convertidor de fuente de tensión del sistema de transmisión del arte previo según la figura 1,

La figura 3 es una parte detallada del equipo de control del arte previo según la figura 2,

La figura 4 es una realización del equipo de control del convertidor según la invención,

La figura 5 es una realización de medios de control de tensión de CA de un equipo de control del convertidor según la invención,

5 La figura 6A es una realización de un medio de bucle enganchado en fase del equipo de control del convertidor según una realización de la invención y

La figura 6B ilustra una forma de onda de una señal de salida del medio de bucle enganchado en fase que representa la frecuencia y el ángulo de fase deseados en un punto de conexión.

Descripción de realizaciones

10 Los diagramas de bloque que se describirán a continuación pueden verse como diagramas de flujo de señal y diagramas de bloque del equipo de control. Las funciones a realizar por los bloques que se muestran en los diagramas de bloque pueden implementarse en piezas aplicables mediante técnica analógica y/o digital en circuitos cableados, pero preferentemente como programas en un microprocesador. Se entenderá que aunque los bloques que se muestran se mencionan como elementos, filtros, dispositivos, etc., han de interpretarse, en particular si sus funciones se implementan como software para un microprocesador, como medios para lograr la función deseada. De este modo, según sea el caso, la expresión "señal" también puede interpretarse como un valor generado por un programa informático y aparecer sólo como tal. A continuación sólo se proporcionan descripciones funcionales de los bloques ya que estas funciones pueden implementarse de maneras conocidas por los expertos en el arte.

15 Las variables que aparecen en el equipo de control mostradas en las figuras, en particular representantes de tensiones y corrientes, se muestran en forma vectorial para ilustrar su carácter multifase. Las unidades vectoriales se designan con un guión en la parte superior (\vec{x}).

Las partes que son similares a otras y aparecen en más de una figura se designan con los mismos números en las diferentes figuras.

20 Se omiten ocasionalmente líneas de conexión entre valores medidos y bloques y entre bloques para no sobrecargar las figuras innecesariamente. Sin embargo, debe entenderse que las variables respectivas que aparecen en las entradas de algunos bloques se suministran desde los bloques o unidades de medición donde se generan.

25 La figura 1 muestra en forma de diagrama de bloque esquemático de una sola línea un sistema de transmisión de corriente de alta tensión como se conoce en el arte previo. Una primera estación convertidora STN1 y una segunda estación convertidora STN2 están conectadas una a la otra mediante un enlace de corriente continua que tiene dos polos conductores W1 y W2 respectivamente. Normalmente, los polos conductores son cables pero también pueden comprender, al menos en parte, líneas aéreas. Cada estación convertidora STN1 y STN2 tiene equipos condensadores, C1 y C2, respectivamente, conectados entre los polos conductores W1 y W2, y cada estación convertidora STN1 y STN2 comprende un convertidor de fuente de tensión CON1 y CON2, respectivamente. Cada convertidor CON1 y CON2 comprende válvulas semiconductoras que comprenden un puente convertidor de 2 niveles o un puente convertidor de 3 niveles. Las válvulas semiconductoras comprenden derivaciones de elementos semiconductores de encendido/apagado de compuertas, por ejemplo transistores de potencia del llamado tipo IGBT, y diodos en conexión anti-paralela con estos elementos.

30 Cada convertidor se encuentra conectado a través de un inductor de fase PI1 y PI2, respectivamente, a una red eléctrica de corriente alterna trifásica respectiva N1 y N2. Aunque no se muestra en la figura, se conoce en el arte que los convertidores pueden conectarse a la red trifásica N1 o N2 mediante transformadores, en cuyo caso los inductores de fase PI1 o PI2 para algunos casos pueden omitirse. El equipo de filtrado F1 y F2, respectivamente, se encuentra conectado en conexión de derivación en puntos de conexión entre el inductor de fase PI1 o PI2 respectivo y la red trifásica N1 o N2 respectiva.

35 La tensión de CA de la red de corriente alterna N1 en el punto de conexión del filtro F1 se designa como UL1 y se mide con un dispositivo de medición M1. Esta tensión UL1 a continuación se denomina tensión de barra de la red de corriente alterna N1. La tensión de CA establecida por el convertidor CON1 se designa UV1 y a continuación se designa tensión puente del convertidor CON1. La corriente alterna en el convertidor CON1 se designa I1 y se mide con un dispositivo de medición M3. De manera similar, la tensión de CA en el punto de conexión del filtro F2 se designa como UL2 y se mide con un dispositivo de medición M4, y la corriente alterna en el convertidor CON2 se designa I2 y se mide con un dispositivo de medición M6. La tensión de CA en el punto de conexión del filtro F2 a continuación se denomina tensión de barra de la red de corriente alterna N2. La tensión de CA establecida por el convertidor CON2 se designa UV2 y a continuación se denomina tensión puente del convertidor CON2.

40 La tensión de CC a través del equipo de condensador C1 se designa Ud1 y la tensión de CC a través del equipo de condensador C2 se designa Ud2. Estas tensiones se miden con dispositivos de medición M7 y M8, respectivamente, que sólo se muestran simbólicamente.

La primera estación convertidora STN1 comprende un equipo de control CTRL1 y la segunda estación convertidora STN2 comprende un equipo de control CTRL2, usualmente de un tipo similar al equipo de control CTRL1, para la generación de series de órdenes de encendido/apagado, FP1 y FP2 respectivamente, a las válvulas semiconductoras del convertidor de fuente de tensión CON1 o CON2 respectivo según un patrón predeterminado de modulación por ancho de pulsos (PWM).

Las estaciones convertidoras STN1 y STN2 pueden operar en cuatro modos diferentes, control de tensión de CC, control de potencia activa, control de tensión de CA o control de potencia reactiva. Usualmente, una de las estaciones convertidoras, por ejemplo la primera STN1, opera bajo el control de tensión de CC para el control de tensión del enlace de corriente continua, mientras que la segunda estación convertidora STN2 opera bajo el control de potencia activa o control de tensión de CA o control de potencia reactiva. Los modos de operación se fijan manualmente por un operador o, en ciertas condiciones, automáticamente mediante un sistema de control secuencial que no se muestra.

La figura 2 muestra una realización de un equipo de control del arte previo, que representa tanto el equipo de control CTRL1 y el equipo de control CTRL2, donde los índices 1 y 2 se omiten por motivos de simplicidad.

El equipo de control CTRL comprende un controlador de tensión de CC 21, un controlador de tensión de CA 22, medios selectores SW1 y SW2, un sistema de control de corriente de convertidor IREG, una unidad de modulación por ancho de pulsos 23 y una unidad lógica de conmutación 24.

Un valor real de la tensión de CC medida Ud a través del equipo condensador respectivo (C1 o C2) y un valor de referencia de tensión UdR de ésta se suministran a un elemento de formación de diferencia 25, cuya salida se suministra al controlador de tensión de CC 21.

Un valor real de la tensión de barra respectivo medido UL y un valor de referencia de tensión ULR de éste se suministran a un elemento de formación de diferencia 26, cuya salida se suministra al controlador de tensión de CA 22.

Primeros medios selectores SW1 se suministran con la señal de salida del controlador de tensión de CC 21 y un valor de referencia Pref para el flujo de potencia activa a través del convertidor. Los primeros medios selectores SW1 producen dependiendo de una señal de modo MD1 una señal pR que es la señal de salida del controlador de tensión de CC 21 o el valor de referencia Pref.

Segundos medios selectores SW2 se suministran con la señal de salida del controlador de tensión de CA 22 y un valor de referencia Qref para el flujo de potencia reactiva a través del convertidor. Los segundos medios selectores SW2 producen dependiendo de una señal de modo MD2 una señal qR que es la señal de salida del controlador de tensión de CA 22 o el valor de referencia Qref.

Los controladores de tensión de CA y CC 21 y 22 tienen por ejemplo una característica integradora proporcional. Los valores de referencia Pref y Qref pueden estar formados de manera convencional como salidas de controladores (no se muestran) para el flujo de potencia activa y reactiva, respectivamente.

Las señales de salida pR y qR de los primeros y segundos medios selectores SW1 y SW2 se suministran al sistema de control de corriente de convertidor IREG. El sistema de control de corriente IREG proporciona un bucle de retroalimentación de control de corriente de CA, que, según un vector de referencia de corriente suministrada formado según las señales de salida pR y qR de los medios de conmutación SW1 y SW2 y en una señal de sincronización de referencia de fase, genera una plantilla de referencia de tensión en la forma de un vector de referencia de tensión

$\overline{UV}^{abc} R$. Este vector de referencia de tensión $\overline{UV}^{abc} R$ representa la referencia de tensión para la tensión puente UV1 y UV2 del convertidor respectivo CON1 o CON2. Con las fases de la red de corriente alterna trifásica designadas como a, b y c, el índice superior abc del vector hace referencia a las tensiones de tres fases del convertidor, y el vector tiene los componentes UV \overline{R}^a , UV \overline{R}^b y UV \overline{R}^c .

El sistema de control de corriente de convertidor IREG también se suministra con el valor real I de la corriente alterna al convertidor y con el valor nominal f0 de la frecuencia de la red de AC N1 o N2, que usualmente es 50 ó 60 Hz.

El vector de referencia de tensión $\overline{UV}^{abc} R$ se suministra a la unidad de modulación por ancho de pulsos 23 que determina los instantes de tiempo ta, tb y tc para la comunicación de las válvulas en la fase a, b y c respectiva del convertidor CON1 o CON2 y la unidad de lógica de conmutación 24 genera, según esto, una serie de órdenes de encendido/apagado, FPa, FPb y PFc, suministradas a las válvulas semiconductoras.

Preferentemente, el sistema de control de corriente de convertidor IREG se implementa como software que se ejecuta en un microprocesador como sistema de control de muestreo.

Por razones prácticas, es decir para facilitar los cálculos, el sistema de control de corriente de convertidor IREG opera de manera convencional, donde las unidades de tres fases, es decir tensiones y corrientes de la red de corriente alterna, se transforman y expresan en un plano de referencia dq de dos fases giratorio, al cual se llega a través de una

transformación a un plano de referencia $\alpha\beta$ de dos fases fijo. Las unidades de tres fases de la red de corriente alterna se transformarán de este modo en cantidades de corriente continua que pueden procesarse con técnicas del sistema de control conocidas per se.

5 Con las fases de la red de corriente alterna trifásica designadas como a, b y c, el sistema trifásico se indica como el sistema abc. En el siguiente texto y en las figuras, el plano de referencia se indica, donde corresponde, como un índice superior (por ejemplo \bar{x}^{dq}).

La figura 3 ilustra la estructura básica de un sistema de control de corriente de convertidor IREG según el arte previo. El sistema de control de corriente se implementa como un sistema de control de muestreo con un tiempo de muestra T_s .

10 Con fines de simplicidad, se muestran todas las variables en forma de vector, pero debe entenderse que el procesamiento de señal de ellas se realiza en los componentes del vector respectivo en una forma conocida per se. Dado que los sistemas de control de corriente son similares para ambos equipos de control CTRL1 y CTRL2, se omiten, con fines de simplicidad, los índices 1 y 2 como índice en las variables respectivas a describirse más abajo.

15 El sistema de control de corriente de convertidor IREG según la figura 3 comprende una unidad de cálculo de orden de corriente 41, un controlador de corriente 42, un primer elemento de transformación 43, un segundo elemento de transformación 44, un primer elemento bucle enganchado en fase (PLL) 46 y una primera unidad de cálculo 48.

El sistema de control de corriente de convertidor IREG recibe señales p_R y q_R , generadas como se explica con anterioridad con referencia a la figura 2. Las señales p_R y q_R se suministran a la unidad de cálculo de orden de corriente 41, que según éstas calcula y produce valores de referencia para la corriente alterna en el convertidor. Los

20 valores de referencia se expresan en el plano de referencia dq como i_R^d e i_R^q respectivamente, que se muestran en la figura como un vector de referencia de corriente $\bar{i}_R^{dq} = i_R^d + j i_R^q$. El cálculo se realiza según las relaciones conocidas per se.

$$p_R = UL^d I_R^d + UL^q I_R^q \quad (1a)$$

$$q_R = -(UL^d I_R^q - UL^q I_R^d) \quad (1b)$$

25 donde las tensiones UL^d y UL^q representan los componentes d- y q- respectivamente, de la tensión de barra UL, medida en la red de CA, y transformada al plano de referencia dq.

Los valores de referencia de corriente $i_R^d + j i_R^q$ pueden limitarse según las condiciones operativas especificadas para el sistema de transmisión antes del procesamiento posterior.

30 Cabe destacar que en un plano de referencia dq que gira en sincronismo con la tensión de barra UL como se describe con anterioridad con respecto al PLL, el componente UL^q de la tensión de barra UL se convierte en cero. Por lo tanto se deriva de las expresiones (1a) y (1b) que el componente d i_R^d del valor de referencia de corriente \bar{i}_R^{dq} se convierte en un valor de referencia para la potencia activa y el componente q i_R^q , un valor de referencia para la potencia reactiva.

35 El valor real I de la corriente alterna se mide en la red de CA en el convertidor y se transforma al plano de referencia dq como un vector de corriente real \bar{i}^{dq} .

El controlador de corriente 42 se suministra con el vector de referencia de corriente \bar{i}_R^{dq} , el vector de corriente real \bar{i}^{dq} , y con un valor promedio $\frac{UL}{m}$ de la tensión de barra UL transformada al plano de referencia dq. El controlador de corriente 42 produce según ello una señal de salida designada \bar{u}_R^{dq} , que es el vector de referencia de tensión para la tensión puente del convertidor en el plano de referencia dq.

El vector de referencia de tensión alterna \overline{UV}^{dq}_R se suministra a un primer elemento de transformación 43, que transforma el vector al plano de referencia $\alpha\beta$. La salida del primer elemento de transformación 43 se suministra al segundo elemento de transformación 44, que transforma el vector suministrado al plano de referencia abc como un vector \overline{UV}^{abc}_R . Este vector es el vector de referencia de la tensión puente para el convertidor, que tiene como componentes valores de referencia de tensión para las tres fases respectivas del sistema de corriente alterna.

El vector de referencia de tensión puente \overline{UV}^{abc}_R se suministra a una unidad de modulación por ancho de pulsos 23 como se describe con anterioridad con referencia a la figura 2.

El primer elemento de transformación 43 realiza en una forma conocida per se la transformación $\overline{UV}^{dq}_R = \overline{UV}^{abc}_R \cdot e^{-j\xi}$, con el ángulo de transformación $\xi = \omega t$, la frecuencia giratoria ω de la red de CA y el tiempo t .

Una señal de ángulo de transformación, que en la figura se designa con ξ se genera de manera convencional por el elemento bucle enganchado en fase (PLL) 46, según el valor nominal f_0 de la frecuencia de la red de CA, y en la posición de fase de la tensión de barra UL, transformada al plano de referencia $\alpha\beta$, y después se suministra al primer elemento de transformación 43.

La señal ξ puede concebirse como una señal de sincronización de referencia de fase, a continuación indicada brevemente como una señal de sincronización o señal de ángulo de fase. Tiene el objeto de sincronizar el plano de referencia dq giratorio con el sistema abc de tensión de barra y representa un ángulo eléctrico que aumenta linealmente con el tiempo con una tasa de tiempo proporcional a la frecuencia real de la red de CA. Al menos bajo ciertas condiciones de estabilidad la señal de sincronización ξ se sincroniza y se coloca en fase con la posición de fase de la tensión de barra UL de la red de CA. Después, el plano de referencia dq giratorio se sincroniza y mantiene sincronizado con el sistema abc trifásico y en particular con la tensión de barra UL. Bajo estas condiciones, el componente q de UL^q de la tensión de barra UL se convierte en cero.

Una realización del equipo de control del convertidor según la invención se muestra en la figura 4. Comparado con la realización conocida de un equipo con el descrito con referencia a las figuras 2 y 3, el control de potencia activa, tensión de CC, potencia reactiva y de tensión de CA a través de la CA se reemplaza por un control de tensión de CA y un nuevo medio de bucle enganchado en fase. El elemento de generación de tensión 51 genera la tensión de referencia de convertidor \overline{UV}^{dq}_{ord} , es decir, el valor de referencia para la tensión puente del convertidor en el plano de referencia dq, mediante la utilización de salidas de un medio de control de tensión de CA UACREG y un medio de bucle enganchado en fase PLL_IN.

La tensión de referencia de convertidor generada \overline{UV}^{dq}_{ord} con las salidas del medio de bucle enganchado en fase PLL_IN, que incluye las señales de la frecuencia deseada f_{ord} y del ángulo de fase deseado ξ_{ord} de la tensión puente UV y el período de muestreo Ts_{ord} , se suministran a un elemento de PWM 52. Los expertos en el arte comprenderán fácilmente que el elemento de PWM 52 puede implementarse como se muestra en las figuras 2 y 3, o puede implementarse de otra manera según el método de modulación seleccionado.

La figura 5 muestra una realización de la unidad de control de tensión de CA UACREG que se muestra en la figura 4. La potencia reactiva medida Q en la barra de conexión a la red de CA, N1 o N2 en la figura 1, se suministra al elemento de selección 62 a través de la unidad de filtro 61. El elemento de selección 62 selecciona según el valor de la señal de entrada una constante preestablecida y genera una señal ΔU_{ref} que es proporcional a la constante seleccionada y la señal de entrada. Las constantes preestablecidas, conocidas como inclinación, realizarán una compartición de carga reactiva automática entre la estación convertidora y los otros dispositivos reguladores de tensión. Las constantes preestablecidas normalmente son valores de 0.01 a 0.1. Se selecciona un valor más alto si la señal de entrada es mayor para evitar corrientes de sobrecarga y obtener un buen control de tensión de CA. Un primer elemento de adición 63 se suministra con la salida del elemento de selección 62 y con la tensión de referencia de CA preseleccionado ULR. El primer elemento de adición 63 produce la referencia de tensión de CA real y la suministra a un segundo elemento de adición 64. Otra señal de entrada al segundo elemento de adición 64 es la amplitud de tensión de CA medida UL en la barra de conexión provista a través de una unidad de filtrado 57. La salida del segundo elemento de adición 64 se suministra a un regulador 65, que puede ser de tipo PI, es decir, que incluya una parte proporcional y una parte de integración. El regulador 65 produce una parte de corrección de tensión. Esta parte de corrección se agrega con la tensión de referencia de CA preestablecida ULR para formar una orden de amplitud de tensión UMR.

La figura 6A muestra una realización del elemento de bucle enganchado en fase PLL_IN según la figura 4. Una unidad generadora de ángulo de fase 71 genera según la frecuencia deseada f_{ord} de la tensión puente UV y en el período de muestreo Ts_{ord} un ángulo de fase deseado ξ_{ord} de la tensión puente UV, cuya forma de onda se ilustra

5 en la figura 6B. La frecuencia deseada, que también es la frecuencia real de la red de CA conectada, es la suma de la frecuencia de referencia predeterminada f_0 y una parte de corrección de frecuencia, y resulta de un tercer elemento de adición 75. Un elemento de selección 77 selecciona según el valor de la señal de entrada una constante preestablecida y genera una señal que es proporcional a la constante seleccionada y la señal de entrada. Las constantes preestablecidas, conocidas como caída, realizarán una compartición de carga activa automática entre la estación convertidora y otras unidades generadoras de energía eléctrica. Las constantes preestablecidas normalmente son valores de 0.01 a 0.1. Se selecciona un valor más alto si la señal de entrada es mayor para evitar corrientes de sobrecarga y obtener un buen control de frecuencia. La señal de entrada del elemento de selección 77 es la potencia activa medida P que se proporciona a través de una unidad de filtrado 72. El período de muestreo Ts_ord se determina mediante

$$Ts_ord = (2 \cdot p \cdot f)^{-1}$$

donde p es un número preseleccionado que depende de la frecuencia de conmutación.

15 Como se describe más arriba, en el sistema de control conocido la señal de salida ξ del PLL representa el sincronismo entre el PLL y el voltaje de barra medido UL . En otras palabras, la señal ξ representa el ángulo de fase y la frecuencia de la tensión de red de CA. Como resultado de este sincronismo, el plano de referencia dq también rota en sincronismo con la tensión de barra UL , lo que resulta en que el componente q de UL^q de la tensión de barra UL se convierte en cero y el componente d de UL^d de la tensión de barra UL es igual a la amplitud de la tensión de barra. Cabe destacar que este sincronismo se realiza mediante un control de retroalimentación. En la invención, en lugar de utilizar un control de retroalimentación, se realiza un sincronismo entre la señal ξ_ord de PLL_IN y la tensión de barra en el elemento generador de tensión 51 (figura 4) mediante el ajuste del componente q de UL^q de la tensión de barra en cero y el componente d de UL^d de la tensión de barra en el orden de amplitud de tensión UMR , es decir,

$$\overline{UL}_{ord}^{dq} = UMR + j \cdot 0 \quad (2)$$

Además, la tensión de referencia de convertidor en el plano de referencia dq se obtiene como,

$$\overline{UV}_{ord}^{dq} = \overline{UL}_{ord}^{dq} + \Delta \overline{U}^{dq} \quad (3)$$

25 donde $\Delta \overline{U}^{dq}$ es la caída de tensión prevista a través de la inductancia, y se obtiene utilizando el componente dq de la corriente medida \overline{I}^{abc} incluyendo un proceso de filtrado.

La tensión de referencia de convertidor \overline{UV}_{ord}^{dq} en el método de control y sistema según la invención corresponde al vector de referencia de tensión \overline{UV}_{R}^{dq} en el arte previo, con referencia a la figura 3. De manera similar, las señales ξ_ord , f_ord y Ts_ord según la invención corresponden a las señales ξ , f y Ts en el arte previo, respectivamente. Tan pronto como esas señales se producen, puede implementarse la generación de orden de conmutación para válvulas de control.

35 En una realización de la invención, el convertidor de fuente de tensión puede estar equipado con el modo de control conocido en el arte previo llamado un primer modo de control, es decir, control de tensión de CC/potencia activa y de tensión de CA/potencia reactiva a través del control de corriente de CA, y el modo de control según la invención llamado un segundo modo de control, es decir, control de tensión de CC directo y de frecuencia. Se agrega un conmutador de software o hardware para seleccionar el modo de control deseado.

En un sistema de transmisión HVDC o recíproco, sólo uno de los convertidores de fuente de tensión puede estar equipado con el control según la invención. En este caso, el otro convertidor utilizará el control conocido en el arte previo para controlar la tensión de CC del sistema HVDC.

REIVINDICACIONES

1. Método de control de un sistema HVDC que conecta dos redes de CA, donde el sistema HVDC comprende dos estaciones convertidoras (STN1; STN2), cada una de las cuales tiene un convertidor de fuente de tensión (CON1; CON2), **caracterizado porque** una de las dos redes de CA se encuentra sin suministro eléctrico y la otra de las dos redes de CA se encuentra funcionando, el método comprende:

- 5 • operar el convertidor de fuente de tensión de una de las dos estaciones convertidoras que está conectada a una red de CA sin suministro de energía eléctrica como un generador de fuente de tensión para generar un tensión de CA, indicado como tensión puente (UV1; UV2), con la frecuencia deseada (f_ord) y amplitud de tensión deseada (\overline{UV}_{ord}) utilizando un control de frecuencia y tensión de CA directo controlando la frecuencia y amplitud de la tensión de CA generada,
- 10 • controlar la otra de las dos estaciones convertidoras conectada con la red de CA en funcionamiento para mantener la tensión de CC del sistema HVDC en su valor nominal.

2. Método según la reivindicación 1, en donde en la estación convertidora conectada a la red de CA sin suministro de energía eléctrica se realiza un sincronismo entre un ángulo de fase deseado (ξ_{ord}) de la tensión puente y una tensión de CA de la red de CA conectada, indicada como tensión de barra (UL1, UL2).

- 15 3. Método según la reivindicación 2, en donde el sincronismo se realiza mediante el ajuste de un componente q de la tensión de barra a cero y un componente d de la tensión de barra en el orden de amplitud de tensión (UMR), de modo tal que un valor de referencia para la tensión puente en un plano de referencia dq se convierta en:

$$\overline{UV}_{ord}^{dq} = UMR + j \cdot 0 + \overline{\Delta U}^{dq} ,$$

donde \overline{UV}_{ord}^{dq} es el valor de referencia para la tensión puente en un plano de referencia dq, UMR es el orden de amplitud de tensión y $\overline{\Delta U}^{dq}$ es una caída de tensión prevista.

- 20 4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde la amplitud de tensión de la tensión puente se controla a través de un control de retroalimentación de tensión (UACREG) que comprende una función de caída de tensión adaptativa (62), la función de caída de tensión adaptativa reacciona sobre una potencia reactiva (Q) medida en un punto de conexión a la red de CA sin suministro de energía eléctrica (N1; N2).

- 25 5. Método según la reivindicación 4, en donde la función de caída de tensión adaptativa (62) incrementa una señal de referencia de tensión de CA (ULR) con potencia reactiva en aumento (Q).

- 30 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde la frecuencia se controla a través de un bucle enganchado en fase (PLL_IN), el bucle enganchado en fase (PLL_IN) comprende una función de caída de frecuencia adaptativa (77), la función de caída de frecuencia adaptativa (77) reacciona sobre una potencia activa (P) medida en un punto de conexión a la red de CA sin suministro de energía eléctrica (N1; N2).

7. Método según la reivindicación 6, en donde la función de caída de frecuencia adaptativa (77) aumenta una señal de referencia de frecuencia (f0) con potencia activa en aumento (P).

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde el método sólo se aplica después de la detección de que la red de CA conectada (N1; N2) se encuentra sin suministro de energía eléctrica.

- 35 9. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en donde el método se aplica para el arranque en negro de la red de CA sin suministro de energía eléctrica, donde la red de CA sin suministro de energía eléctrica se conecta a través del sistema HVDC a una de las al menos dos centrales eléctricas de CA y donde la red de CA sin suministro de energía eléctrica se encuentra conectada a través de líneas de transmisión a otra de las al menos dos centrales eléctricas de CA, el método comprende:

- 40 • utilizar la tensión puente creada (UV1, UV2) para activar las líneas de transmisión conectadas a la otra de las, al menos dos, centrales eléctricas de CA;
- arrancar la otra de las, al menos dos, centrales eléctricas de CA.

- 45 10. Método según la reivindicación 9, en donde la red de CA sin suministro de energía eléctrica se encuentra conectada a más de dos centrales eléctricas de CA y a al menos una carga y donde esta red de CA se restablece de manera gradual mediante el arranque del resto de las centrales eléctricas de CA después del arranque de la otra de las, al menos dos, centrales eléctricas de CA y mediante la posterior conexión de la al menos una carga.

11. Sistema HVDC que conecta dos redes de CA, donde el sistema HVDC comprende dos estaciones convertidoras (STN1; STN2), cada una de las cuales tiene un convertidor de fuente de tensión (CON1; CON2) y una unidad de control (CTRL1; CTRL 2), **caracterizado porque** una de las dos redes de CA se encuentra sin suministro eléctrico y la otra de las dos redes de CA funciona,

- 5
- donde la unidad de control de una de las dos estaciones convertidoras que se encuentra conectada a una red de CA sin suministro de energía eléctrica opera el convertidor de fuente de tensión correspondiente como un generador de fuente de tensión para generar un tensión de CA, indicado como tensión puente (UV1; UV2), con la frecuencia deseada (f_{ord}) y amplitud de tensión deseada (\overline{UV}_{ord}) utilizando un control de frecuencia y tensión de CA directo controlando la frecuencia y amplitud de la tensión de CA generada,
- 10
- donde la unidad de control de la otra de las dos estaciones convertidoras conectada con la red de CA en funcionamiento controla el convertidor de fuente de tensión correspondiente para mantener la tensión de CC del sistema HVDC en su valor nominal.

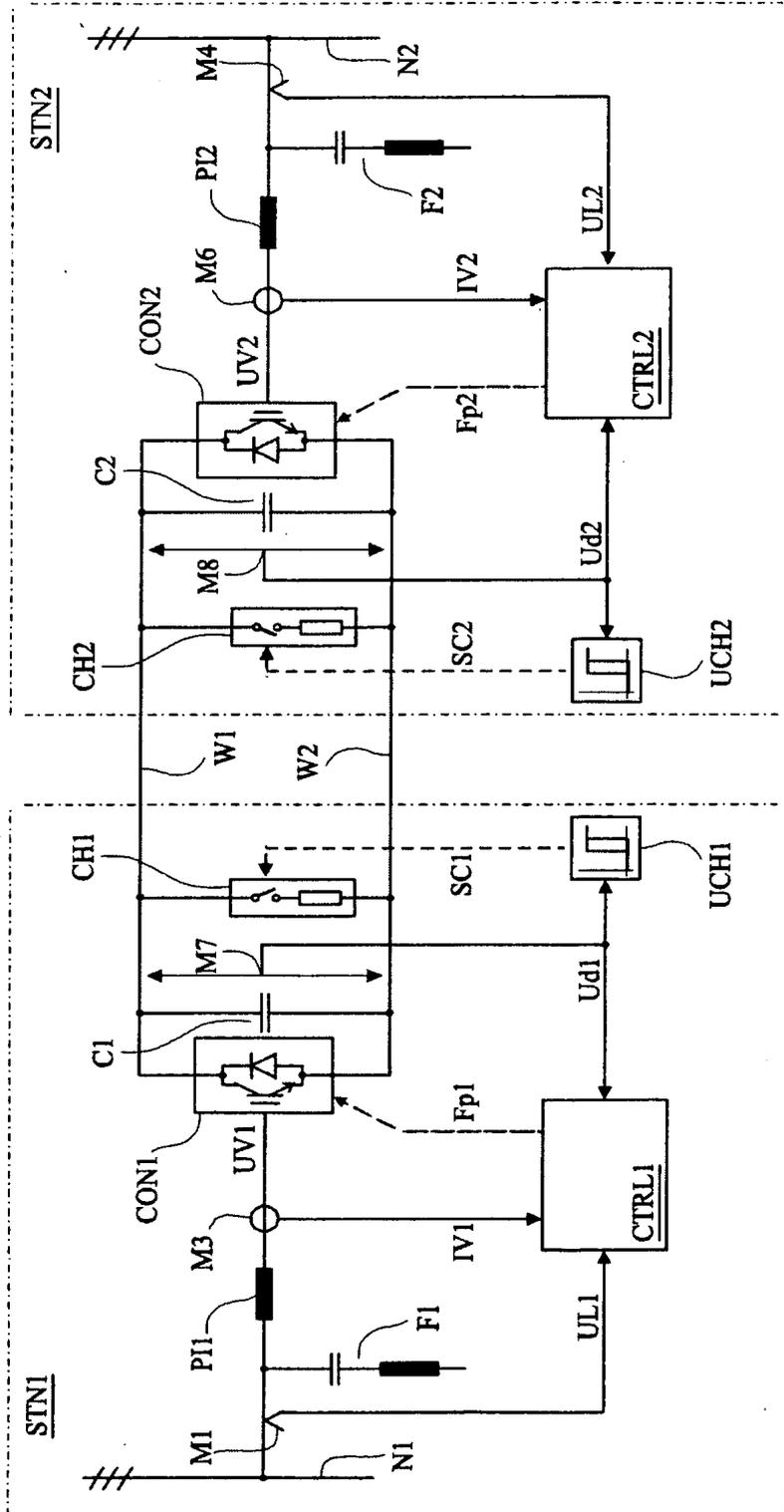


FIG. 1

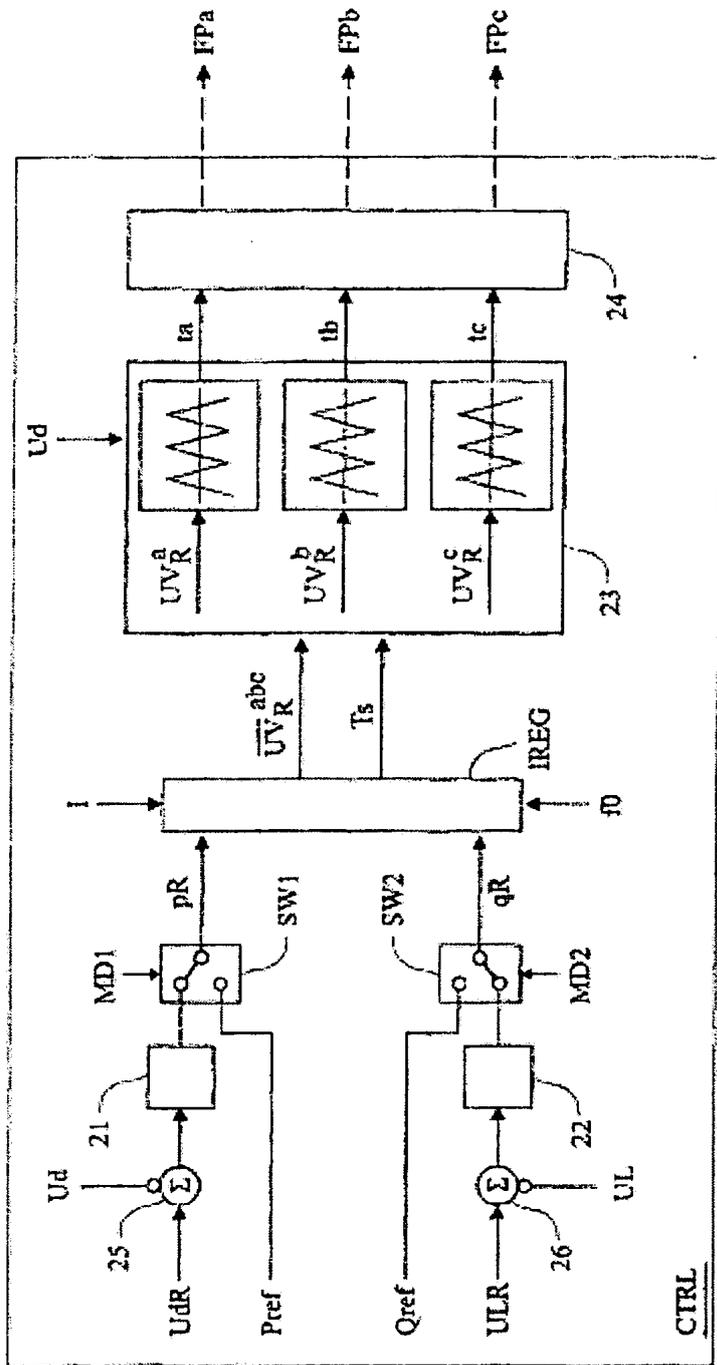


FIG. 2

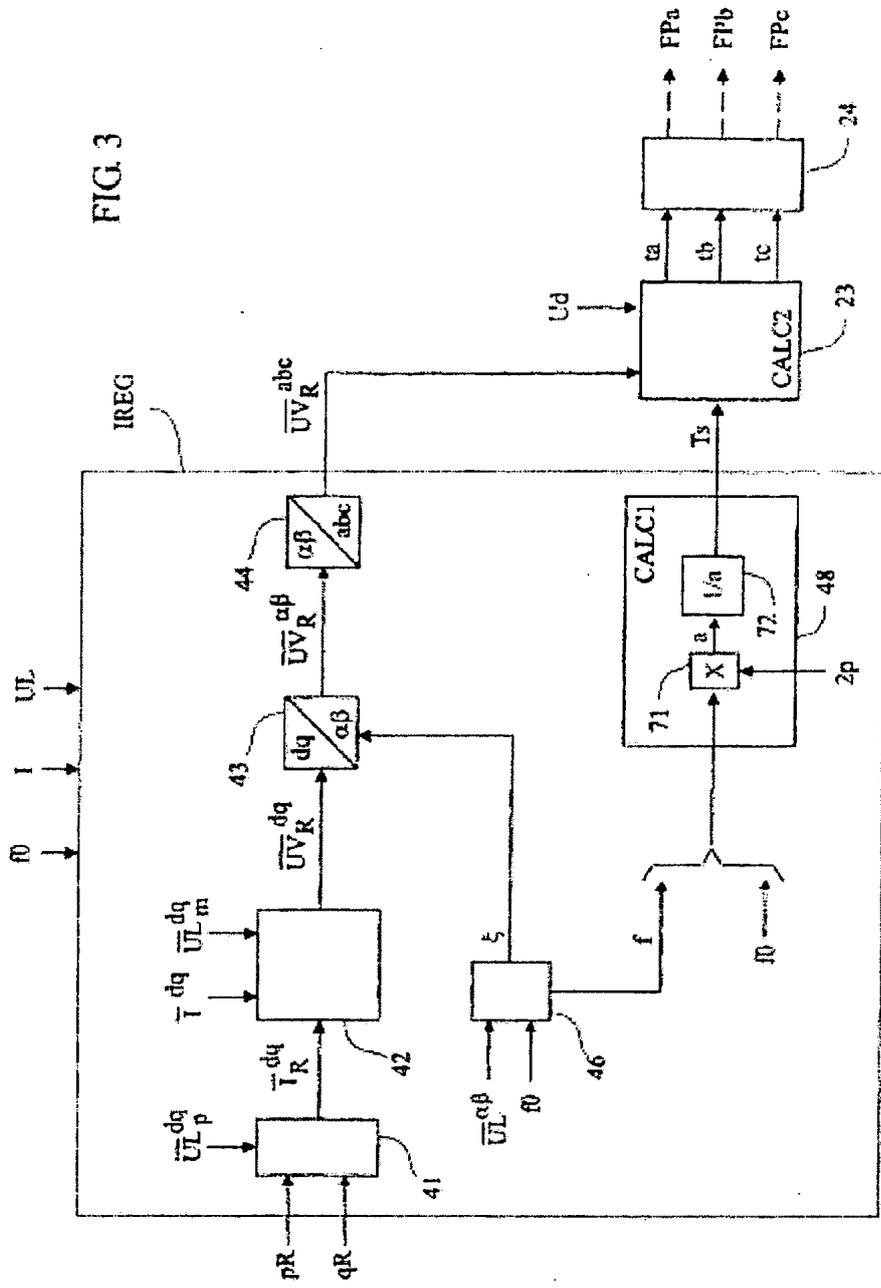


FIG. 3

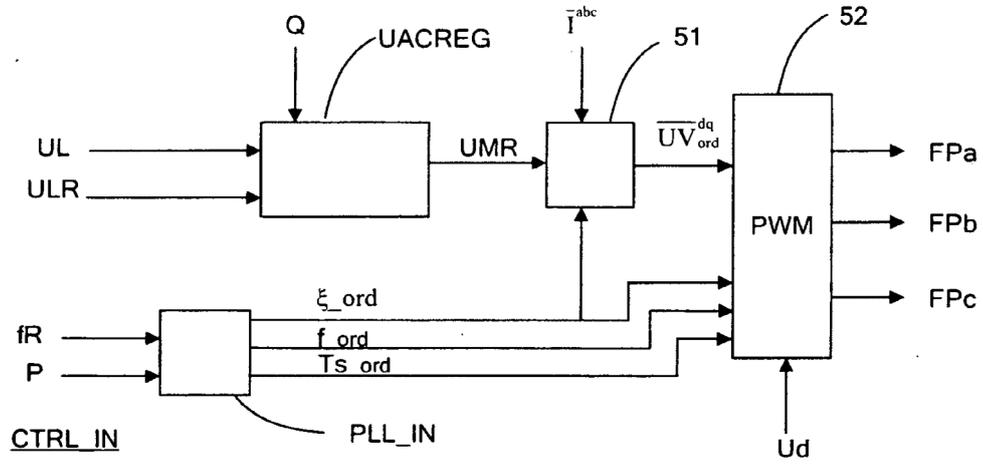


FIG. 4

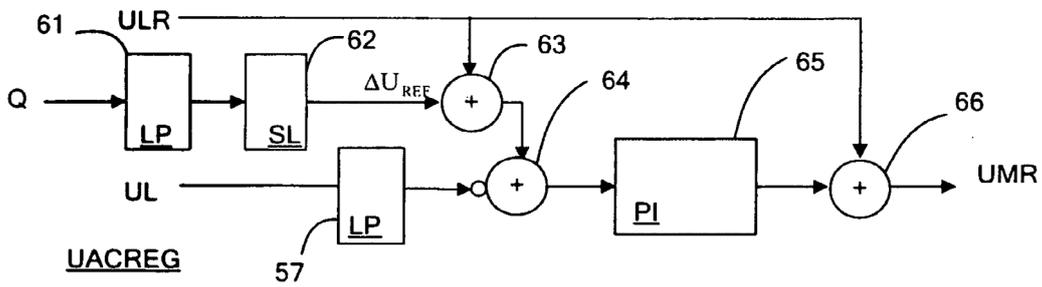


FIG. 5

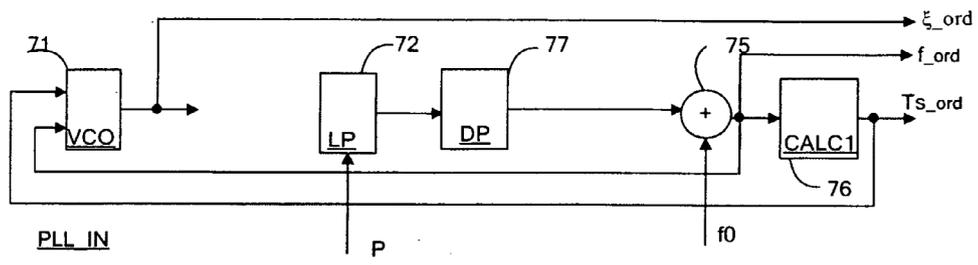


FIG. 6A

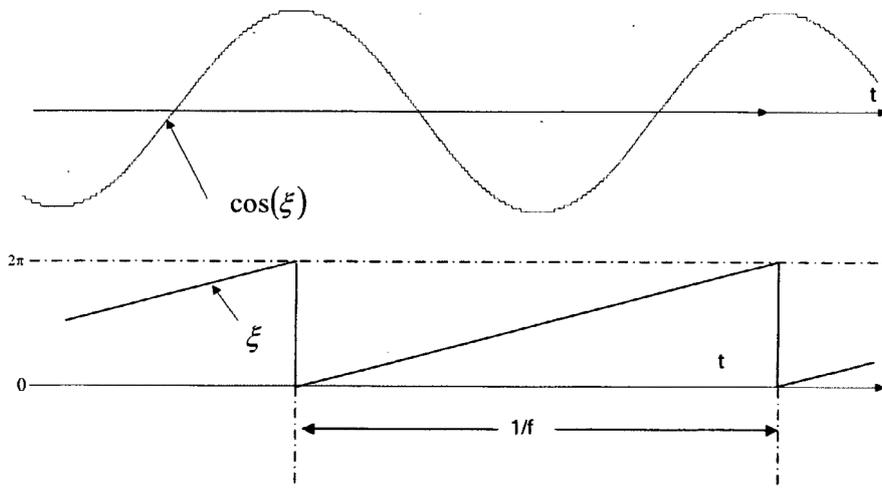


FIG. 6B