

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 752 201**

51 Int. Cl.:

H02J 1/00 (2006.01)

H02J 3/36 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2014** **E 14198835 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.07.2019** **EP 3035476**

54 Título: **Método, controlador y producto de programa informático para controlar una tensión en una red eléctrica de CC**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.04.2020

73 Titular/es:
SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Werner-von-Siemens-Straße 1
80333 München, DE

72 Inventor/es:
MÜNZ, ULRICH

74 Agente/Representante:
LOZANO GANDIA, José

ES 2 752 201 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, controlador y producto de programa informático para controlar una tensión en una red eléctrica de CC

5 Para la transmisión o distribución de energía eléctrica, las redes eléctricas de CC están ganando cada vez más importancia. En particular, a menudo se instalan enlaces de CC de alta tensión para soportar redes de CA de alta tensión. Además, en instalaciones industriales con una pluralidad de máquinas grandes, las redes de CC de media tensión son a menudo más eficientes para suministrar potencia a las máquinas que las redes de CA de media tensión. Como es habitual, "CC" representa corriente continua y "CA" corriente alterna.

10 En redes eléctricas actuales con varios terminales, es decir, nodos de la red eléctrica que suministran o demandan potencia a o desde la red eléctrica, se vuelve cada vez más complejo controlar el flujo de potencia y tensión para los diversos terminales. Habitualmente, han de cumplirse varias condiciones de contorno predeterminadas para los flujos de potencia y tensiones.

15 Esto es particularmente cierto para redes eléctricas de CC. Si la red eléctrica de CC comprende uno o más terminales que son suficientemente resistentes como para controlar sus tensiones de CC, puede usarse un enfoque en el sentido de un sistema maestro-esclavo. Estos terminales que son suficientemente resistentes como para controlar sus tensiones de CC en la red eléctrica de CC controlan las tensiones de CC y todos los demás terminales suministran o demandan potencia de CC. Un terminal que controla una tensión de CC en la red eléctrica de CC puede denominarse "terminal maestro" o "terminal V" y un terminal que controla una potencia de CC puede denominarse "terminal esclavo" o "terminal P". Los terminales maestros de la red eléctrica de CC tienen que equilibrar sus tensiones de CC con los flujos de potencia de la red eléctrica de CC de tal manera que se cumplan todas las condiciones de contorno. Este control es particularmente complejo en el caso de redes eléctricas de CC que comprenden varios terminales maestros.

20 Los métodos conocidos para el control de la tensión en una red eléctrica de CC incluyen métodos basados en resolver numéricamente un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia no lineales, que combinan valores para potencias de CC y tensiones de CC en la red eléctrica de CC. Sin embargo, las soluciones iterativas conocidas de las ecuaciones de flujo de potencia no lineales a menudo implican cálculos que llevan mucho tiempo. Además, los valores variables para el suministro y la demanda de potencia de CC conducen a un aumento significativo de la complejidad numérica. En los siguientes documentos se dan a conocer métodos conocidos:

35 WEIXING LU *ET AL*: "DC voltage limit compliance in voltage-source converter based multi-terminal HVDC", POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2005. IEEE SAN FRANCISCO, CA, EE.UU., 12-16 DE JUNIO, 2005, PISCATAWAY, NJ, EE.UU., IEEE, 12 de junio de 2005 (12-06-2005), páginas 1290-1295, XP010821591, DOI: 10.1109/PES.2005.1489346 ISBN: 978-0-7803-9157-4;

40 el documento WO 2012/044369 A1 y

Kory W. Hedman: "The Application of Robust Optimization in Power Systems Empowering Minds to Engineer the Future Electric Energy System", Arizona State University, agosto de 2014 (31-08-2014).

45 Un objetivo de la presente invención es proporcionar un método, un controlador y un producto de programa informático para controlar una tensión en una red eléctrica de CC que sea más flexible en particular en el caso de varios terminales maestros y/o en el caso de flujos de potencia de CC variables o inciertos.

50 Este objetivo se consigue mediante un método según la reivindicación 1 de patente, un controlador según la reivindicación 8 de patente y un producto de programa informático según la reivindicación 9 de patente.

Según la invención, se proporcionan un método, un controlador y un producto de programa informático para controlar una tensión en una red eléctrica de CC que comprende un terminal maestro que controla una tensión de CC del terminal maestro y un terminal esclavo que controla una potencia de CC del terminal esclavo. En este caso, el terminal maestro y/o el terminal esclavo pueden ser un convertidor, un inversor o un rectificador. El controlador y/o el producto de programa informático pueden ser casos centrales para la red eléctrica de CC o estar distribuidos a través de varios casos en comunicación.

60 Se reciben un primer intervalo de tolerancia para tensiones de CC del terminal maestro y del terminal esclavo así como un segundo intervalo de tolerancia para la potencia de CC del terminal esclavo. En este caso, los intervalos de tolerancia pueden representarse como intervalos definidos por valores mínimos y máximos de las cantidades respectivas o definidos por valores de punto medio y de desviación. Con eso, se ejecuta un procedimiento de optimización robusta mediante un procesador para un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC que combina valores para tensiones de CC y potencias de CC del terminal maestro y del terminal esclavo. Los métodos de optimización robusta son una clase particular de métodos de optimización que permiten parámetros inciertos. Permiten específicamente la optimización de primeras cantidades de modo que se satisfagan las restricciones dadas para todo un dominio de segundas cantidades inciertas. Las restricciones se denominan a menudo restricciones de

optimización robusta y el dominio de segundas cantidades inciertas se denomina a menudo incertidumbre o incertidumbre de optimización robusta.

5 Según la invención, los intervalos de tolerancia primero y segundo se introducen en el procedimiento de optimización robusta, usando el primer intervalo de tolerancia como restricción de optimización robusta y el segundo intervalo de tolerancia como incertidumbre de optimización robusta. Con eso, el procedimiento de optimización robusta determina un punto de consigna de tensión de CC para el terminal maestro de modo que el conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC y la restricción de optimización robusta se cumplen para el segundo intervalo de tolerancia. Según el punto de consigna de tensión de CC determinado, se controla la tensión de CC del terminal maestro.

15 Puesto que la invención usa intervalos de tolerancia para un procedimiento de optimización robusta en lugar de parámetros de red eléctrica dados o estimados, el punto de consigna de tensión de CC puede determinarse en conformidad con los intervalos de tolerancia aunque un suministro y/o demanda de potencia no se conozca con precisión o muestre variaciones. En particular, la invención permite una determinación y optimización rápidas y flexibles del punto de consigna de tensión de CC, permitiendo, por tanto, un control de tensión eficiente del terminal maestro con un tiempo de reacción corto.

20 La invención puede aplicarse fácilmente a redes eléctricas de CC con varios terminales maestros aplicando las etapas de método anteriores a todos los terminales maestros. El uso del procedimiento de optimización robusta permite un equilibrio eficiente de los flujos de potencia y tensiones de CC, en particular, en el caso de varios terminales maestros.

25 Mediante las reivindicaciones dependientes se facilitan realizaciones particulares de la invención.

Según la invención puede recibirse un valor objetivo para una potencia de CC objetivo del terminal maestro e introducirse en el procedimiento de optimización robusta teniendo en cuenta una desviación del valor objetivo con respecto a una potencia de CC del terminal maestro en una función de coste de optimización robusta. Con eso, el punto de consigna de tensión de CC puede determinarse de modo que la función de coste de optimización robusta se minimiza para el segundo intervalo de tolerancia.

30 Esto permite minimizar desviaciones y fluctuaciones de la potencia de CC del terminal maestro, potenciando, por tanto, la estabilidad.

35 Según una realización de la invención, puede incluirse un desfase con respecto al punto de consigna de tensión de CC determinado cuando se controla la tensión de CC del terminal maestro. El desfase puede depender de la desviación de un valor objetivo para una potencia de CC objetivo del terminal maestro con respecto a una potencia de CC del terminal maestro. Esta dependencia puede ser una proporcionalidad.

40 Este control es particularmente ventajoso en el caso de una red eléctrica de CC que comprende varios terminales maestros. Esto permite compartir etapas de carga de un modo predeterminado entre los terminales.

45 Según una realización de la invención el primer intervalo de tolerancia puede recibirse desde un generador de potencia convencional en el terminal maestro. Además, el segundo intervalo de tolerancia puede recibirse desde un generador de potencia renovable o un dispositivo de carga en el terminal esclavo.

Además, el punto de consigna de tensión de CC puede transmitirse a un generador de potencia convencional en el terminal maestro.

50 Ventajosamente, el conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC puede comprender una ecuación de flujo de potencia de CC linealizada.

55 En particular, una linealización que conduce a la ecuación de flujo de potencia de CC linealizada puede basarse en desprestigiar términos de orden superior en desviaciones de las tensiones de CC del terminal maestro y del terminal esclavo con respecto a una tensión de CC nominal.

60 Con una linealización de este tipo, las ecuaciones de flujo de potencia de CC pueden simplificarse considerablemente. Esto permite una solución numérica rápida y estable incluso en el caso de una red eléctrica de CC muy grande.

65 Además, el procedimiento de optimización robusta puede ser un procedimiento de optimización robusta lineal basado en una rutina de programación lineal. Las rutinas de programación lineal permiten una solución numérica particular rápida y estable de problemas de optimización con restricciones. Además, el procedimiento de optimización robusta puede distribuirse de manera eficiente a través de varios procesadores.

En los siguientes párrafos se describen realizaciones particulares a modo de ejemplo de la invención junto con el

dibujo. La figura muestra en representación esquemática una red eléctrica de CC con varios terminales maestros y varios terminales esclavos.

La figura representa una realización a modo de ejemplo de una red eléctrica de CC con varios terminales TM1 y TM2 maestros que controlan tensión de CC y varios terminales TS1, TS2, y TS3 esclavos que controlan potencia de CC en representación esquemática. Los terminales TM1, TM2 maestros y los terminales TS1, TS2, TS3 esclavos pueden ser convertidores, inversores y/o rectificadores. Según la presente realización, el terminal TM1 maestro se acopla a un generador CP1 de potencia convencional, el terminal TM2 maestro se acopla a un generador CP2 de potencia convencional, el terminal TS1 esclavo se acopla a una central PV de energía fotovoltaica, el terminal TS2 esclavo se acopla a una maquinaria M como dispositivo de carga, y el terminal TS3 esclavo se acopla a una central W de energía eólica. Se supone que los generadores CP1 y CP2 de potencia convencionales, por ejemplo, centrales eléctricas de gas, son suficientemente resistentes como para permitir que los terminales TM1 y TM2 maestros controlen las tensiones de CC de la red eléctrica de CC en su punto de suministro respectivo. Los terminales TM1, TM2 maestros y los terminales PS1, PS2, PS3 esclavos se conectan mediante líneas PL eléctricas. Alternativa o adicionalmente, los terminales TM1 y TM2 maestros pueden ser puntos de interconexión de la red eléctrica de CC a una red eléctrica de CA.

Para controlar las tensiones de CC de los terminales TM1 y TM2 maestros, se proporciona un controlador CTL en la red eléctrica de CC. El controlador CTL se acopla a los terminales TM1 y TM2 maestros así como a los terminales PS1, PS2 y PS3 esclavos tal como se indica mediante líneas discontinuas en la figura. El controlador CTL puede ser un caso central para la red eléctrica de CC o estar distribuido a través de varios casos en comunicación, por ejemplo, los terminales TM1, TM2 maestros y/o los terminales PS1, PS2, PS3 esclavos.

Desde cada uno de los terminales TM1 y TM2 maestros, el controlador CTL recibe un valor P_{M1}^* o P_{M2}^* objetivo, respectivamente, para una potencia de CC objetivo del terminal TM1 o TM2 maestro respectivo. Los valores P_{M1}^* y P_{M2}^* objetivo son potencias de CC deseadas para los terminales TM1 y TM2 maestros, por ejemplo, con el fin de hacer funcionar esos terminales y/o los generadores CP1 y CP2 de potencia convencionales conectados a un punto de trabajo favorable. En particular, los valores P_{M1}^* y P_{M2}^* objetivo pueden enviarse desde los generadores CP1 y CP2 de potencia convencionales hasta el terminal TM1 o TM2 maestro respectivo.

Además, el controlador CTL recibe desde el terminal TM1 maestro un primer intervalo de tolerancia especificado por un valor de una tensión U_N de CC nominal y un valor de una desviación ΔU de tensión con respecto a esa tensión U_N de CC nominal. Alternativa o adicionalmente, el primer intervalo U_N , ΔU de tolerancia puede proporcionarse mediante un código de red de la red eléctrica de CC. En particular, el primer intervalo U_N , ΔU de tolerancia especifica un intervalo de tolerancia común para las tensiones de CC de todos los terminales TM1, TM2, PS1, PS2, y PS3.

Además, el controlador CTL recibe desde cada uno de los terminales PS1, PS2 y PS3 esclavos un segundo intervalo de tolerancia especificado mediante valores $[\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}]$, $[\underline{P}_{S2}, \bar{P}_{S2}]$ o $[\underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}]$, respectivamente, que definen un intervalo de potencia de CC individual para el terminal PS1, PS2 o PS3 esclavo respectivo. En este caso, \underline{P}_{S1} , \underline{P}_{S2} , y \underline{P}_{S3} indican los límites inferiores y \bar{P}_{S1} , \bar{P}_{S2} , y \bar{P}_{S3} los límites superiores del segundo intervalo de tolerancia respectivo. La especificación de los segundos intervalos de tolerancia para las potencias de CC de los terminales PS1, PS2 y PS3 esclavos cubre el caso habitual en el que el suministro o demanda de potencia de los terminales PS1, PS2 y PS3 esclavos no es constante y/o no se conoce de manera exacta sino que sólo se conoce que se encuentran dentro de un intervalo, en este caso, el segundo intervalo de tolerancia respectivo. Este es a menudo el caso si se acoplan generadores de potencia renovable, en este caso, PV y W, o dispositivos de carga, en este caso, M, con suministro o demanda de potencia variable a los terminales PS1, PS2 y PS3 esclavos.

El controlador CTL alimenta el primer intervalo de tolerancia especificado por U_N y ΔU , los segundos intervalos de tolerancia especificados por $\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \underline{P}_{S2}, \bar{P}_{S2}, \underline{P}_{S3},$ y \bar{P}_{S3} y los valores P_{M1}^* y P_{M2}^* objetivo en un procedimiento de optimización robusta para un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC tal como se describe en detalle a continuación. En este caso, el primer intervalo U_N , ΔU de tolerancia se usa como una restricción de optimización robusta y los segundos intervalos de tolerancia especificados por $\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$ se usan como incertidumbres de optimización robusta. En una función de coste de optimización robusta se tiene en cuenta una desviación de los valores P_{M1}^* y P_{M2}^* objetivo con respecto a una potencia de CC real de un terminal TM1 o TM2 maestro respectivo.

Alternativa o adicionalmente, la función de coste de optimización robusta puede tener en cuenta los costes de la generación o consumo de potencia, en este caso, mediante CP1, CP2, PV, W o M, en un terminal maestro o esclavo respectivo.

El procedimiento de optimización robusta emite un punto u_{st1} de consigna de tensión de CC optimizado para el terminal TM1 maestro y un punto u_{st2} de consigna de tensión de CC optimizado para el terminal TM2 maestro de modo que el conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC y la restricción de optimización robusta se cumplen

para todos los segundos intervalos de tolerancia especificados por $\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$, y la función de coste de optimización robusta se minimiza. Cada uno de los puntos u_{s11} y u_{s12} de consigna de tensión de CC se transmiten desde el controlador CTL hasta el terminal TM1 o TM2 maestro respectivo para controlar su tensión de CC.

5 A continuación se describe con más detalle un modelo estático para la red eléctrica de CC. Los terminales de la red eléctrica de CC, denominados en la figura PM1, PM2, PS1, PS2 y PS3, se denominan ahora mediante un índice i, j, k , etc. Una línea eléctrica, denominada en la figura PL, entre el terminal i y el terminal j se describe mediante una admitancia en serie $g_{ij} = g_{ji} \geq 0$. Las tensiones de CC en los terminales i y j que están conectados mediante la admitancia en serie g_{ij} son u_i y u_j . Una corriente de CC que fluye desde el terminal i hasta el terminal j es entonces $i_{ij} = (u_i - u_j) \cdot g_{ij}$. Por consiguiente, la potencia p_{ij} de CC que fluye en el terminal i a la línea eléctrica desde el terminal i hasta el terminal j viene dada por $p_{ij} = u_i \cdot i_{ij}$. Esto conduce a un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC para una red eléctrica de CC con N terminales:

$$p_i = \sum_{j \in N_i} p_{ij} = \sum_{j \in N_i} g_{ij} u_i (u_i - u_j), \quad (1)$$

15 donde p_i indica una potencia de CC neta generada en el terminal i y N_i indica el conjunto de todos los terminales j adyacentes conectados al terminal i mediante una línea eléctrica. Las ecuaciones de flujo de potencia de CC son un conjunto de ecuaciones no lineales que combinan cantidades características de la red eléctrica de CC. Estas ecuaciones pueden reescribirse en forma vectorial como

$$P = \text{diag}(U)GU, \quad (2)$$

20 donde $P = \text{vec}(p_i)$ y $U = \text{vec}(u_i)$ son los vectores de las potencias p_i de CC y las tensiones u_i de CC, y

$$G = \begin{cases} -g_{ij} & \text{para } i \neq j \\ \sum_{k \in N_i} g_{ik} & \text{para } i = j \end{cases} \quad (3)$$

25 es una matriz de admitancias de la red eléctrica de CC. Aparentemente, G es una matriz laplaciana con todos los valores propios en el plano complejo de la mitad derecha excepto por un único valor propio 0. Los vectores propios izquierdo y derecho que corresponden al valor propio cero son $\mathbf{1}$ y $\mathbf{1}^T$, donde $\mathbf{1}^T$ indica el vector $(1, 1, \dots, 1)$.

30 En general, una red eléctrica de CC puede contener buses con un terminal y buses sin un terminal. A continuación, se supone que todos los buses sin un terminal se han eliminado del modelo de red eléctrica de CC, por ejemplo, aplicando la denominada reducción de Kron. Por tanto, puede suponerse que todos los buses de la red eléctrica de CC se conectan a un terminal.

35 El modelo comprende dos tipos de terminales

- terminales V o terminales maestros, en los que se controla la tensión u_i de CC y
- 40 • terminales P o terminales esclavos, en los que se controla la potencia p_i de CC.

45 Puede suponerse sin pérdida de generalidad que los vectores en la ecuación (2) se ordenan de modo que $P = \text{vec}(P_M, P_S)$ y $U = \text{vec}(U_M, U_S)$ contienen en primer lugar vectores parciales de potencias P_M de CC y tensiones U_M de CC de los terminales maestros y después vectores parciales de potencias P_S de CC y tensiones U_S de CC de los terminales esclavos. Con eso, la ecuación (2) puede reescribirse en forma de bloque como

$$\begin{pmatrix} P_M \\ P_S \end{pmatrix} = \text{diag}(U_M, U_S) \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_M \\ U_S \end{pmatrix}, \quad (4)$$

50 donde $G_{SM} = G_{MS}^T$.

Con respecto a la presente invención, se considera la siguiente cuestión:

55 Dada una red eléctrica de CC con al menos un terminal maestro y al menos un terminal esclavo y dada una desviación ΔU de tensión máxima permisible para todos los terminales, es decir, $u_i \in [U_N - \Delta U, U_N + \Delta U]$, $\forall i$. Si sólo se sabe que las potencias P_S de CC de los terminales esclavos se encuentran dentro de algunos intervalos específicos de terminales $[\underline{P}_S, \bar{P}_S] \ni P_S$, cómo deben ajustarse las tensiones U_M de CC en los terminales maestros de modo que las tensiones de CC en todos los terminales estén dentro del intervalo de tensión anterior y las

potencias P_M de CC de los terminales maestros estén cerca de sus valores P_M^* objetivo deseados.

5 La cuestión anterior define un denominado problema de optimización robusta. Los métodos de optimización robusta son una clase conocida particular de métodos de optimización que permiten parámetros inciertos. Estos permiten específicamente la optimización de primeras cantidades, en este caso, las potencias P_M de CC y/o las tensiones U_M de CC de los terminales maestros, de modo que se satisfacen restricciones dadas, en este caso, la desviación de tensión máxima permisible en todos los terminales, para todo un dominio de segundas cantidades inciertas, en este caso, las potencias P_S de CC de los terminales esclavos. Las restricciones se denominan a menudo restricciones de optimización robusta y el dominio de segundas cantidades inciertas se denomina a menudo incertidumbre o incertidumbre de optimización robusta.

15 Con el fin de simplificar la solución de la ecuación (4) de flujo de potencia de CC se linealiza esta ecuación. Para ello, se supone que todas las tensiones de CC están cerca de la tensión U_N de CC nominal y las diferencias de tensión $u_i - u_j$ son mucho más relevantes para los flujos de potencia que los valores absolutos de estas tensiones. Esto conduce a una ecuación de flujo de potencia de CC linealizada

$$\begin{pmatrix} P_M \\ P_S \end{pmatrix} = U_N \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_M \\ U_S \end{pmatrix}. \quad (5)$$

20 Esta linealización también implica que la red eléctrica de CC parece sin pérdidas debido a que $p_{ij} = -p_{ji}$, es decir, el flujo de potencia de CC que fluye en el terminal i a la línea eléctrica entre el terminal i y el terminal j es igual al flujo de potencia de CC que sale de esta línea eléctrica en el terminal j . Por tanto, la suma de toda la potencia de CC que fluye hacia dentro y hacia fuera es cero, es decir,

$$\mathbf{1}^T P_M + \mathbf{1}^T P_S = 0. \quad (6)$$

25 Además, la linealización implica que la potencia P de CC es independiente de desfases de tensión constante, es decir,

$$\begin{pmatrix} P_M \\ P_S \end{pmatrix} = U_N \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_M \\ U_S \end{pmatrix} = U_N \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} U_M \\ U_S \end{pmatrix} + \delta u \mathbf{1} \right), \quad (7)$$

30 donde δu es cualquier valor escalar real.

35 Con el fin de obtener un mapeo único de las tensiones U de CC a las potencias P de CC, la ecuación del primer terminal maestro se elimina del sistema de ecuaciones (5). Por tanto, se escribe

$$P = \begin{pmatrix} -\mathbf{1}^T \\ \mathbb{I} \end{pmatrix} \tilde{P} \quad \tilde{P} = \begin{pmatrix} p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

Además, las tensiones de CC se transforman en nuevas coordenadas de la siguiente manera

$$U - u_1 \mathbf{1} = \begin{pmatrix} 0 \\ u_2 - u_1 \\ \vdots \\ u_N - u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tilde{U} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

40 Puesto que los vectores $\mathbf{1}$ y $\mathbf{1}^T$ son los vectores propios derecho e izquierdo de la matriz G que corresponden al valor propio cero, se obtiene

$$P = \begin{pmatrix} -\mathbf{1}^T \\ \mathbb{I} \end{pmatrix} \tilde{P} = U_N \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} (U - u_1 \mathbf{1}) \quad (10)$$

$$= U_N \begin{pmatrix} G_{MM} & G_{SM} \\ G_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \tilde{U} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

A continuación, se eliminan la primera fila y la primera columna de G y se obtiene un sistema reducido:

$$\begin{pmatrix} \tilde{P}_M \\ P_S \end{pmatrix} = U_N \begin{pmatrix} \tilde{G}_{MM} & \tilde{G}_{SM} \\ \tilde{G}_{MS} & G_{SS} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{U}_M \\ \tilde{U}_S \end{pmatrix}. \quad (12)$$

En una primera etapa, se resuelve la ecuación (12) para \tilde{U}_S para obtener

$$\tilde{U}_S = G_{SS}^{-1} \left(\frac{P_S}{U_N} - \tilde{G}_{MS} \tilde{U}_M \right) \quad (13)$$

En este caso, la matriz parcial G_{SS} siempre es invertible porque la red eléctrica de CC está conectada. La ecuación (13) puede incluirse en la ecuación (12) para obtener

$$U_N (\tilde{G}_{MM} - \tilde{G}_{SM} G_{SS}^{-1} \tilde{G}_{MS}) \tilde{U}_M = \tilde{P}_M - \tilde{G}_{SM} G_{SS}^{-1} P_S \quad (14)$$

La linealización anterior de las ecuaciones de flujo de potencia de CC permite proporcionar una solución al problema surgido en la cuestión anterior, como una solución del siguiente problema de optimización robusta que determina puntos U_M de consigna de tensión de CC óptimos para los terminales maestros:

$$\min_{\tilde{U}_M, u_1} \gamma \quad (15a)$$

$$s.t. \gamma \geq \left\| P_M^* - \begin{pmatrix} -\mathbf{1}^T \\ \mathbb{I} \end{pmatrix} \left(U_N (\tilde{G}_{MM} - \tilde{G}_{SM} G_{SS}^{-1} \tilde{G}_{MS}) \tilde{U}_M + \tilde{G}_{SM} G_{SS}^{-1} P_S \right) - \begin{pmatrix} -\mathbf{1}^T P_S \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \right\|_{\infty} \\ \forall P_S \in \{\underline{P}_S, \bar{P}_S\} \quad (15b)$$

$$\Delta U \geq \left\| G_{SS}^{-1} \left(\frac{P_S}{U_N} - \tilde{G}_{MS} \tilde{U}_M \right) + \mathbf{1}(u_1 - U_N) \right\|_{\infty}, \forall P_S \in \{\underline{P}_S, \bar{P}_S\} \quad (15c)$$

$$\Delta U \geq \left\| \tilde{U}_M + \mathbf{1}(u_1 - U_N) \right\|_{\infty} \quad (15d)$$

$$\Delta U \geq \|u_1 - U_N\|, \quad (15e)$$

donde $\{\underline{P}_S, \bar{P}_S\}$ es el conjunto de vértices del politopo $[\underline{P}_S, \bar{P}_S]$ convexo que encierra todos los valores de P_S permisibles y $\|\cdot\|_{\infty}$ indica la norma infinita, es decir, el valor absoluto máximo. Como habitualmente, la abreviatura "s.t." significa "de modo que" e indica las restricciones de la minimización.

El término (15b) representa la función de coste de optimización robusta que tiene en cuenta la desviación de los valores P_M^* objetivo con respecto a las potencias de CC reales de los terminales maestros. Alternativa o adicionalmente, la función de coste de optimización robusta puede tener en cuenta los costes de la generación o consumo de potencia en un terminal maestro o esclavo respectivo, por ejemplo, en forma de un producto escalar $c^T P$ de un vector c de coste con el vector P de potencia de CC.

Ventajosamente, puede usarse un control de caída para controlar una tensión u_i de CC real que se va a aplicar al terminal maestro i según $u_i = u_i - k_u(p_i - p_i)$, donde u_i es el punto de consigna de tensión de CC para el terminal i determinado mediante la ecuación (15), k_u es una ganancia de caída, p_i es una potencia de CC medida suministrada realmente por el terminal i , y p_i es la potencia de CC del terminal i tal como se determina mediante la expresión (15).

En la figura, los puntos U_M de consigna de tensión de CC determinados para los terminales maestros se denominan U_{st1} y U_{st2} .

5 El problema de minimización anterior es un problema de optimización robusta lineal que puede resolverse de manera muy eficiente mediante rutinas de programación lineal convencionales como métodos de punto interior o los conocidos algoritmos simplex.

10 Las realizaciones tal como se describieron anteriormente ilustran las ventajas de la invención. En particular, la invención permite una optimización directa de las tensiones de CC controlables de los terminales maestros dentro de un primer intervalo de tolerancia, una incorporación de potencias de CC inciertas de los terminales esclavos y una formulación como un problema de programación lineal. Esto último permite una solución rápida incluso para un gran número de variables de optimización.

REIVINDICACIONES

1. Método para controlar una tensión en una red eléctrica de CC que comprende un terminal (TM1, TM2) maestro que controla una tensión de CC del terminal maestro y un terminal (TS1,..., TS3) esclavo que controla una potencia de CC del terminal esclavo, comprendiendo el método:
 - a) recibir un primer intervalo ($U_N, \Delta U$) de tolerancia para tensiones de CC del terminal (TM1, TM2) maestro y del terminal (TS1,..., TS3) esclavo,
 - b) recibir un segundo intervalo ($\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$) de tolerancia para la potencia de CC del terminal (TS1,..., TS3) esclavo,
 - c) ejecutar, mediante un procesador, un procedimiento de optimización robusta para un conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC que combina valores para tensiones de CC y potencias de CC del terminal (TM1, TM2) maestro y del terminal (TS1,..., TS3) esclavo,
 - d) introducir los intervalos de tolerancia primero y segundo en el procedimiento de optimización robusta, usando el primer intervalo ($U_N, \Delta U$) de tolerancia como restricción de optimización robusta y el segundo intervalo ($\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$) de tolerancia como incertidumbre de optimización robusta,
 - e) determinar mediante el procedimiento de optimización robusta un punto (u_{st1}, u_{st2}) de consigna de tensión de CC para el terminal (TM1, TM2) maestro de modo que el conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC y la restricción de optimización robusta se cumplen para el segundo intervalo ($\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$) de tolerancia, y
 - f) controlar la tensión de CC del terminal (TM1, TM2) maestro según el punto (u_{st1}, u_{st2}) de consigna de tensión de CC determinado, en el que se recibe un valor (P^*_{M1}, P^*_{M2}) objetivo para una potencia de CC objetivo del terminal (TM1, TM2) maestro, se introduce el valor (P^*_{M1}, P^*_{M2}) objetivo en el procedimiento de optimización robusta teniendo en cuenta una desviación del valor (P^*_{M1}, P^*_{M2}) objetivo con respecto a una potencia de CC del terminal (TM1, TM2) maestro en una función de coste de optimización robusta, y se determina el punto (u_{st1}, u_{st2}) de consigna de tensión de CC de modo que se minimiza la función de coste de optimización robusta para el segundo intervalo ($\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$) de tolerancia.
2. Método según la reivindicación 1, en el que se recibe un valor (P^*_{M1}, P^*_{M2}) objetivo para una potencia de CC objetivo del terminal (TM1, TM2) maestro, y cuando se controla la tensión de CC del terminal (TM1, TM2) maestro se incluye un desfase con respecto al punto (u_{st1}, u_{st2}) de consigna de tensión de CC determinado, dependiendo el desfase de la desviación del valor (P^*_{M1}, P^*_{M2}) objetivo con respecto a una potencia de CC del terminal (TM1, TM2) maestro.
3. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el primer intervalo ($U_N, \Delta U$) de tolerancia se recibe desde un generador (CP1, CP2) de potencia convencional en el terminal (TM1, TM2) maestro y/o el segundo intervalo ($\underline{P}_{S1}, \bar{P}_{S1}, \dots, \underline{P}_{S3}, \bar{P}_{S3}$) de tolerancia se recibe desde un generador (PV, W) de potencia renovable o un dispositivo (M) de carga en el terminal (TS1,..., TS3) esclavo.
4. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el punto (u_{st1}, u_{st2}) de consigna de tensión de CC se transmite a un generador (CP1, CP2) de potencia convencional en el terminal (TM1, TM2) maestro.
5. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el conjunto de ecuaciones de flujo de potencia de CC comprende una ecuación de flujo de potencia de CC linealizada.
6. Método según la reivindicación 5, en el que una linealización que conduce a la ecuación de flujo de potencia de CC linealizada se basa en despreciar términos de orden superior en desviaciones de las tensiones de CC del terminal (TM1, TM2) maestro y del terminal (TS1,..., TS3) esclavo con respecto a una tensión de CC nominal.
7. Método según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el procedimiento de optimización robusta es un procedimiento de optimización robusta lineal basado en una rutina de programación lineal.

8. Controlador (CTL) para controlar una tensión en una red eléctrica de CC que comprende un terminal (TM1, TM2) maestro que controla una tensión de CC del terminal maestro y un terminal (TS1, ..., TS3) esclavo que controla una potencia de CC del terminal esclavo, estando el controlador (CTL) configurado para realizar un método según una de las reivindicaciones anteriores.

5 9. Producto de programa informático para controlar una tensión en una red eléctrica de CC que comprende un terminal (TM1, TM2) maestro que controla una tensión de CC del terminal maestro y un terminal (TS1, ..., TS3) esclavo que controla una potencia de CC del terminal esclavo, estando el producto de programa informático adaptado para realizar un método según una de las reivindicaciones 1 a 7.

10

FIG

