

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 743 938**

51 Int. Cl.:

H02J 3/18 (2006.01)

H02J 3/12 (2006.01)

H02J 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.08.2014 PCT/EP2014/066812**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.06.2015 WO15078598**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.08.2014 E 14752582 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.07.2019 EP 3075053**

54 Título: **Procedimiento para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica**

30 Prioridad:

26.11.2013 DE 102013224156

28.11.2013 DE 102013224411

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

21.02.2020

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Werner-von-Siemens-Strasse 1
80333 München, DE**

72 Inventor/es:

**BAMBERGER, JOACHIM y
MÜNZ, ULRICH**

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 743 938 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

Procedimiento para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica

5 La invención se refiere a un procedimiento para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica, así como a un equipo correspondiente y a una red eléctrica.

10 Las redes eléctricas comprenden una pluralidad de nodos de red conectados mediante líneas eléctricas, en los cuales se genera energía eléctrica o bien se consume energía eléctrica. Los nodos de la red se controlan entonces a menudo en el marco de una regulación proporcional, en la que para los distintos nodos se ajustan su tensión y frecuencia o bien la potencia activa y la potencia reactiva suministrada. Se diferencia entre nodos generadores formadores de la red y nodos generadores que apoyan la red. En un nodo generador formador de la red, que también se denomina nodo generador de tensión regulada, se ajusta en el marco de la regulación proporcional la amplitud y la frecuencia de la tensión en ese nodo. Por 15 el contrario en un nodo generador que apoya la red, que también se denomina nodo generador de intensidad de corriente regulada, se regula en el marco de la regulación proporcional la potencia activa y la potencia reactiva suministrada.

20 En las redes eléctricas actuales los nodos generadores que apoyan la red son a menudo instalaciones de generación de energía renovable, que contienen electrónica de potencia, como por ejemplo inversores, que sólo están diseñados para una determinada intensidad de la corriente máxima. Cuando se producen oscilaciones demasiado grandes de la carga en la red eléctrica, puede llegar a ser inestable la red eléctrica, debido a una limitación de la intensidad de corriente de los nodos generadores que apoyan la red, lo cual en determinadas condiciones puede originar fallos de una red eléctrica. En consecuencia el funcionamiento de los nodos generadores que apoyan la red está diseñado por lo general tal que cuando 25 se producen saltos de carga no se alcanza la intensidad de corriente máxima. Pero esto trae como consecuencia que la proporción de energía que se aporta a la red eléctrica mediante generación de energía renovable está limitada. Debido a ello aumentan los costes de la generación eléctrica, ya que para ello se utilizan más nodos generadores formadores de la red que por lo general son generadores convencionales, como por ejemplo generadores diesel o turbinas de gas.

30 Por el estado actual de la técnica se conocen sólo pocos enfoques de cómo puede aumentar en una red eléctrica la proporción de la generación de energía renovable. En el documento [1] se describen redes eléctricas en forma de las llamadas micro grids (microrredes) con una elevada proporción de generación de energía renovable. No obstante en tales redes se utilizan grandes acumuladores de energía eléctrica sobredimensionados como nodos formadores de la red. Para optimizar redes eléctricas se conocen además procedimientos de simulación, con los cuales se simulan distintas variaciones de la carga en la red. Pero estos procedimientos exigen cálculos complejos y sólo pueden aportar resultados positivos por lo general para un pequeño número de posibles variaciones de la carga.

35 El documento WO 2012/037989 A2 da a conocer un procedimiento para la regulación asistida por ordenador de la distribución de la energía eléctrica en una red de energía descentralizada, en la que basándose en valores de medida de la red de energía se ajustan mediante una optimización magnitudes de ajuste de la red de energía. La optimización se realiza en cuanto a una desviación lo menor posible de las potencias activas generadas por nodos de red respecto a potencias activas de consigna.

Es objetivo de la invención configurar adecuadamente una red eléctrica de manera sencilla y rápida con un procedimiento asistido por ordenador.

45 Este objetivo se logra mediante las reivindicaciones independientes. En las reivindicaciones dependientes se definen perfeccionamientos de la invención.

50 El procedimiento correspondiente a la invención sirve para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica. El procedimiento puede ejecutarse al respecto previamente (off-line) antes de la puesta en servicio de la red eléctrica. Igualmente puede ejecutarse y/o repetirse el procedimiento durante el servicio de la red eléctrica (on-line). La red eléctrica configurada mediante el procedimiento incluye una pluralidad de nodos de red conectados mediante líneas eléctricas. Estos nodos de red contienen uno o varios primeros nodos de red. El o los primeros nodos de red proporcionan durante el servicio de la red eléctrica potencia activa para una carga (por ejemplo una carga pasiva) en la red eléctrica y son por lo tanto los correspondientes nodos generadores. La carga puede presentarse en la red eléctrica, según la forma de 60 ejecución, en un punto o en varios puntos o bien nodos.

65 Un correspondiente primer nodo de red significa en la red eléctrica un nodo generador formador de la red, en el que mediante un procedimiento de regulación y en particular mediante una regulación proporcional, se regulan la amplitud y la frecuencia de la tensión en este nodo de red por un lado en función de la potencia reactiva que se aporta a través de este nodo de red o de la corriente reactiva que se aporta a través de este nodo de red y por otro lado en función de la potencia activa que se aporta a través de este

nodo de red o de la corriente activa que se aporta a través de este nodo de red. Un tal procedimiento de regulación o una tal regulación proporcional se conoce de por sí. En el marco de la regulación proporcional, la amplitud de la tensión es proporcional a la potencia reactiva o bien a la corriente reactiva y la frecuencia de la tensión es proporcional a la potencia activa o bien a la corriente activa.

5

En el procedimiento correspondiente a la invención se determinan variaciones de la potencia activa de los primeros nodos de red para las correspondientes variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga basándose en un modelo dinámico de la red eléctrica (es decir, un modelo que describe la variación en el tiempo de magnitudes que son relevantes en la red eléctrica, como tensiones, potencias y frecuencias). En otras palabras, se describen y/o modelizan las variaciones de la potencia activa de los primeros nodos mediante un modelo dinámico de la red eléctrica en función de variaciones de la potencia activa predeterminadas para la carga y pueden así calcularse con asistencia por ordenador. Como modelo dinámico de la red eléctrica puede utilizarse por ejemplo el modelo descrito en el documento [2]. En una variante preferida se utiliza un modelo que se basa en la hipótesis de que la potencia activa y la potencia reactiva generadas en un nodo de la red están disponibles inmediatamente en cualquier otro nodo de la red. Este modelo se describirá más en detalle en la descripción detallada. La hipótesis que acabamos de describir es al respecto equivalente a la hipótesis de líneas eléctricas cortas (que pueden despreciarse) entre los nodos de la red. En otra variante preferida se utiliza un modelo que aplica un modelo de flujo de carga linealizado.

10

15

20

En el procedimiento correspondiente a la invención se ajustan los procedimientos de regulación de los correspondientes primeros nodos de red tal que mediante las variaciones de la potencia activa de los primeros nodos de red determinadas por el citado modelo se resuelve un problema de optimización con la meta de un funcionamiento de la red eléctrica óptimo en cuanto a uno o varios criterios de optimización. En función de la configuración pueden fijarse estos criterios de optimización y/o el objetivo de forma diferente. Por ejemplo pueden estar fijados los criterios de optimización tal que mediante los mismos resulten bajos costes de funcionamiento de la red. Según la invención el objetivo del problema de optimización es que proceda del o de los primeros nodos de la red tan poca proporción de la potencia activa proporcionada para la carga como sea posible. Esto corresponde así al criterio de optimización de la aportación de la menor proporción de potencia activa posible por parte del o de los primeros nodos de red.

25

30

En una forma de ejecución preferida del procedimiento correspondiente a la invención incluyen los nodos de red además uno o varios segundos nodos de red, que durante el funcionamiento de la red eléctrica proporcionan potencia activa para la carga en la red eléctrica, siendo un correspondiente segundo nodo de red un nodo generador que apoya la red en forma de una instalación generadora de energía renovable, en la que mediante un procedimiento de regulación y en particular mediante una regulación proporcional, por un lado la potencia activa aportada a través de este nodo de red o la corriente activa aportada a través de este nodo de red y por otro lado la potencia reactiva aportada a través de este nodo de red se regulan en función de la frecuencia y amplitud de la tensión en este nodo de red. Un tal procedimiento de regulación o una tal regulación proporcional se conoce igualmente de por sí. En la regulación proporcional es entonces la potencia activa suministrada o bien la intensidad de corriente activa suministrada proporcional a la frecuencia de la tensión y la potencia reactiva suministrada o bien la corriente reactiva suministrada es proporcional a la amplitud de la tensión. En el marco de esta forma de ejecución se determinan además variaciones de la potencia activa de los segundos nodos de red para las correspondientes variaciones de la potencia activa predeterminadas de la carga basándose en el modelo dinámico de la red eléctrica. Además se ajustan los procedimientos de regulación de los correspondientes primeros y segundos nodos de red tal que mediante las variaciones de la potencia activa determinadas de los primeros y segundos nodos de red se resuelve el problema de optimización con el objetivo de un funcionamiento de la red eléctrica óptimo con respecto a uno o varios criterios de optimización.

35

40

45

50

El procedimiento correspondiente a la invención se basa en el descubrimiento de que de manera sencilla, con un modelo dinámico adecuado de la red eléctrica, los procedimientos de regulación de los nodos generadores pueden parametrizarse tal que se cumplan criterios de optimización predeterminados respecto al funcionamiento de la red eléctrica. En una variante preferida se genera entonces, cuando el funcionamiento es óptimo, la mayor proporción de energía posible en la red eléctrica mediante instalaciones de generación de energía renovable, con lo que se mantienen reducidos los costes de la generación de corriente eléctrica. El procedimiento se utiliza en particular en una red eléctrica en forma de una red en isla, en la que los nodos de la red no están conectados a otras redes eléctricas.

55

60

En una variante preferida del procedimiento correspondiente a la invención el procedimiento de regulación en los nodos generadores formadores de la red es una regulación proporcional, que incluye una primera y una segunda regulación proporcional.

65

Con preferencia, según la primera regulación proporcional, basándose en un primer factor de proporcionalidad y una potencia activa de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así

como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica, se fija la frecuencia de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la potencia activa suministrada por el nodo generador formador de la red. En una variante alternativa, según la primera regulación proporcional basándose en un primer factor de proporcionalidad y una corriente activa de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica, se fija la frecuencia de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la corriente activa aportada por el nodo generador formador de la red.

Con preferencia, según la segunda regulación proporcional basándose en un segundo factor de proporcionalidad y una potencia reactiva de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador formador de la red, se fija la amplitud de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la potencia reactiva aportada a través del nodo generador formador de la red. En una variante alternativa, según la segunda regulación proporcional basándose en un segundo factor de proporcionalidad y una corriente reactiva de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador formador de la red, se fija la amplitud de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la corriente reactiva aportada por el nodo generador formador de la red.

En otra forma de ejecución el procedimiento de regulación en el nodo generador que apoya la red es una regulación proporcional, que incluye una tercera y una cuarta regulación proporcional. Con preferencia, según la tercera regulación proporcional basándose en un tercer factor de proporcionalidad y una potencia activa de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica, se fija la potencia activa aportada a través del nodo generador que apoya la red en función de la frecuencia de la tensión en el nodo generador que apoya la red. En una variante alternativa, según la tercera regulación proporcional basándose en un tercer factor de proporcionalidad y una corriente activa de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica, se fija la corriente activa suministrada por el nodo generador que apoya la red en función de la frecuencia de la tensión en el nodo generador que apoya la red.

Con preferencia, según la cuarta regulación proporcional basándose en un cuarto factor de proporcionalidad y una potencia reactiva de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, se fija la potencia reactiva aportada a través del nodo generador que apoya la red en función de la amplitud de la tensión en el nodo generador que apoya la red. En una variante alternativa, según la cuarta regulación proporcional basándose en un cuarto factor de proporcionalidad y una corriente reactiva de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, se fija la corriente reactiva aportada a través del nodo generador que apoya la red en función de la amplitud de la tensión en el nodo generador que apoya la red.

En una forma de ejecución especialmente preferida, se determinan en el marco del ajuste de la primera y segunda regulación proporcional y/o de la tercera y cuarta regulación proporcional, el primer y/o el segundo factor de proporcionalidad y/o el tercer y/o el cuarto factor de proporcionalidad y/o la potencia activa de referencia o la corriente activa de referencia y/o la potencia reactiva de referencia o la corriente reactiva de referencia en los respectivos primeros y/o segundos nodos de red. Estas magnitudes se utilizan así para el ajuste y/o parametrización de la regulación proporcional en los nodos de red formadores de la red y/o que apoyan la red.

El problema de optimización antes definido y formulado de forma general es, en una variante de la invención, una minimización de la potencia activa aportada a través del primer o los primeros nodos de red, bajo la condición secundaria de que las variaciones de potencia activa de los primeros y/o segundos nodos de red (y en particular sólo de los segundos nodos de red) están limitadas para las correspondientes variaciones de la potencia activa predeterminadas de la carga, es decir, no sobrepasan un valor de umbral predeterminado.

En otra variante el problema de optimización viene dado por una minimización de las variaciones de potencia activa de los primeros y/o segundos nodos de red para las respectivas variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga. Con preferencia sólo incide entonces la minimización de las variaciones de potencia activa de los segundos nodos de red en el problema de optimización. De esta manera se limita la magnitud de las sobreoscilaciones en los nodos de red que apoyan la red, con lo que estos nodos de red pueden operar con una mayor potencia activa. Así se proporciona más potencia activa mediante los nodos generadores que apoyan la red, con lo que se cumple el objetivo de optimización definido al principio, según el cual procede la menor proporción posible de la potencia activa proporcionada para la carga de los primeros nodos de red.

En otra variante más del procedimiento correspondiente a la invención se tiene en cuenta como condición secundaria del problema de optimización que las desviaciones de las frecuencias de las tensiones en el o

los nodo/s generador/es que forma/n la red y/o apoya/n la red (en particular sólo en los nodos generadores formadores de la red) quedan limitadas por una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica para las correspondientes variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga y/o las desviaciones de las amplitudes de las tensiones en el o los nodo/s generador/es que forma/n la red y/o apoya/n la red (en particular sólo en los nodos generadores formadores de la red) quedan limitadas por una tensión de referencia asociada al correspondiente nodo generador formador de la red y/o que apoya la red para las correspondientes variaciones de potencia reactiva predeterminadas de la carga. Con esta forma de ejecución de la invención queda asegurado un funcionamiento estable de la red con amplitud de la tensión y frecuencia de la tensión en muy gran medida constantes en los nodos de la red.

En otra variante del procedimiento correspondiente a la invención se estima, para determinar las variaciones de la potencia activa de los segundos nodos de red, una variación en el tiempo de la frecuencia y de la amplitud de la tensión en los correspondientes segundos nodos de red mediante un algoritmo PLL (PLL = Phase-locked Loop, bucle de seguimiento de fase).

En una forma de ejecución preferida incluye/n el o los primeros nodos de red en la red eléctrica configurada con el procedimiento correspondiente a la invención, uno o varios acumuladores de energía eléctrica, en particular baterías y/o uno o varios generador/es eléctrico/s accionado/s mediante combustible fósil o de generación renovable, como por ejemplo generadores diesel. Los segundos nodos de red representan en una variante preferida una o varias instalaciones fotovoltaicas y/o instalaciones de generación eólica.

Además del procedimiento antes descrito, se refiere la invención a un equipo para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica, estando equipado el equipo para realizar el procedimiento correspondiente a la invención y/o una o varias variantes preferidas del procedimiento correspondiente a la invención.

Además se refiere la invención a una red eléctrica que incluye el equipo correspondiente a la invención antes descrito.

Un ejemplo de ejecución de la invención se describirá detalladamente a continuación en base a la adjunta figura 1. Esta figura muestra una red eléctrica en forma de una red en isla, en la que se lleva a cabo una forma de ejecución del procedimiento correspondiente a la invención.

La red eléctrica PG mostrada en la figura 1 incluye los nodos de red N1, N2, N3, N4 y N5, que están unidos entre sí mediante líneas eléctricas PL. Los nodos de red N1 a N4 son entonces nodos generadores, siendo el nodo de red N1 un nodo generador G en forma de un generador diesel y siendo los nodos de red N2, N3 y N4 instalaciones generadoras de energía renovable en forma de instalaciones fotovoltaicas PV. El nodo generador N1 es un nodo generador formador de la red (también denominado nodo generador regulado en tensión) y por el contrario las instalaciones generadoras de energía renovable N2 a N4 son nodos generadores que apoyan la red (también denominados nodos generadores regulados en intensidad de la corriente). Estas dos clases de nodos de red se diferencian en su regulación proporcional, tal como se describirá posteriormente más en detalle.

Los nodos generadores N1 a N4 proporcionan potencia activa para la carga pasiva L existente en la red, que en el ejemplo de ejecución de la figura 1 se representa mediante un nodo de carga N5. No obstante, alternativamente puede presentarse la carga también en diversos puntos y/o en una pluralidad de nodos de la red eléctrica. Para la configuración y/o control adecuados de la red eléctrica está prevista una unidad central de control CO, que comunica con los distintos nodos, tal como se muestra mediante líneas discontinuas. En esta unidad de control se realiza una forma de ejecución del procedimiento correspondiente a la invención. En particular se ajustan adecuadamente los correspondientes parámetros de los reguladores proporcionales implementados en los nodos.

Según la variante aquí descrita del procedimiento correspondiente a la invención, se resuelve un problema de optimización, con asistencia por ordenador, en la puesta en servicio de la red eléctrica o si se necesita también durante el funcionamiento, para fijar parámetros de los reguladores proporcionales tal que cuando tienen lugar variaciones rápidas de la potencia activa y reactiva de la carga, la variación así originada de las potencias activas y reactivas de los nodos generadores de energía renovable quede limitada y entonces proporcionen los nodos generadores G la menor proporción posible de la potencia activa aportada para la carga. La optimización se realiza basándose en un modelo de la red eléctrica que se fundamenta en la hipótesis de líneas eléctricas cortas entre los nodos de la red. Este modelo y la correspondiente optimización se describirán a continuación más en detalle. Dado el caso puede utilizarse en lugar del modelo que se describe a continuación también otro modelo de la red eléctrica para formular el problema de optimización, como por ejemplo el modelo descrito en el documento [2].

Tal como ya se ha mencionado, se basa el modelo aquí utilizado en la hipótesis de líneas eléctricas cortas, lo cual significa que las diferencias de fase entre nodos de red contiguos se acercan a cero. En

otras palabras, se basa el modelo en la hipótesis de que la potencia activa y la potencia reactiva generadas en un nodo de red de la red eléctrica están disponibles inmediatamente (es decir, instantáneamente o sin retardo) en cualquier otro nodo de la red eléctrica.

5 En el procedimiento que se describe a continuación, se parte de la red eléctrica PG de la figura 1, que incluye un único nodo generador formador de la red en forma de un generador diesel. No obstante, el procedimiento puede aplicarse también a varios nodos de red formadores de la red, siendo los nodos formadores de la red también otras clases de generadores (por ejemplo turbinas de gas) o acumuladores de energía eléctrica. Además puede incluir el nodo generador formador de la red, que a continuación se especifica mediante el índice M (M = Master), también una pluralidad de grupos idénticos, que operan en paralelo, con lo que los mismos se modelizan como un único nodo generador consolidado.

10 Tal como se ha indicado, contiene la red PG de la figura 1 varios nodos generadores que apoyan la red, que a continuación se designarán con índices i y j, señalándose además mediante la variable N el número total de nodos generadores que apoyan la red. Al respecto pueden estar previstos más de los tres nodos generadores que apoyan la red representados en la figura 1. Los nodos generadores que apoyan la red pueden representar, total o parcialmente, también otras instalaciones generadoras de energía renovable como instalaciones fotovoltaicas, como por ejemplo instalaciones de energía eólica.

15 La carga pasiva L que se presenta en la red eléctrica resulta en el modelo aquí descrito como sigue:

$$P_L = \frac{U^2}{R_L} \quad (1a)$$

$$Q_L = \frac{U^2}{X_L} \quad (1b)$$

20 Aquí significa U la amplitud de la tensión y R_L es la resistencia óhmica (o resistencia activa) y X_L es la resistencia reactiva (o reactancia) de la carga L.

25 Bajo la hipótesis anterior de líneas eléctricas cortas, se describe la potencia activa y/o potencia reactiva del nodo generador formador de la red M mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_M = P_L - \sum_{j=1}^N P_{Cj} \quad (2a)$$

$$Q_M = Q_L - \sum_{j=1}^N Q_{Cj} \quad (2b)$$

30 Aquí designa P_M la potencia activa y Q_M la potencia reactiva que proporcionan los nodos generadores formadores de la red. P_{Cj} es la potencia activa y Q_{Cj} la potencia reactiva que proporciona el nodo generador que apoya la red número j (es decir, el correspondiente inversor de la instalación generadora de energía renovable).

35 El nodo generador formador de la red M en forma del generador diesel G utiliza una regulación proporcional, en la que la frecuencia y la tensión del generador diesel se ajustan en función de la potencia activa y la potencia reactiva aportada por este nodo. La regulación proporcional para ajustar la frecuencia $f(P)$ y la tensión $U(Q)$ son entonces como sigue:

$$40 \quad f = f_0 - \frac{1}{k_M^f} (P_M - P_{M,0}) \quad (2c)$$

$$45 \quad U = U_M = U_{M,0} - k_M^Q (Q_M - Q_{M,0}) = U_{M,0} - k_M^Q (Q_L - \sum_{j=1}^N Q_{Cj} - Q_{M,0}) \quad (2d)$$

50 Aquí designan f y U respectivamente la frecuencia y la tensión para el nodo generador M. k_M^f es la droop-gain o ganancia droop (inversa) para la regulación de la frecuencia y k_M^Q la droop-gain para la regulación de tensión, representando estas droop-gains factores de proporcionalidad en el sentido de las reivindicaciones. Además corresponde f_0 a una frecuencia de referencia en la red eléctrica, que representa la frecuencia nominal de la red (por ejemplo 50 Hz). Además es $P_{M,0}$ una potencia activa de referencia, $U_{M,0}$ una tensión de referencia y $Q_{M,0}$ una potencia reactiva de referencia de la regulación proporcional.

55 Alternativamente puede utilizar el nodo generador formador de la red M una regulación proporcional, en la que la frecuencia y la tensión del generador diesel se ajustan en función de la corriente activa y la corriente reactiva aportada por este nodo. La regulación proporcional para ajustar la frecuencia $f(I_{PM})$ y la tensión $U(I_{QM})$ es entonces como sigue:

60

$$f = f_0 - \frac{1}{k_M^f} (I_{PM} - I_{PM,0}) \quad (2e)$$

$$U = U_M = U_{M,0} - k_M^Q (I_{QM} - I_{QM,0}) \quad (2f)$$

5 Aquí es $I_{PM,0}$ la corriente activa de referencia e $I_{QM,0}$ la corriente reactiva de referencia de la regulación proporcional. Las magnitudes I_{PM} e I_{QM} designan las corrientes activas y reactivas aportadas en ese momento. En las explicaciones que siguen se utilizará solamente la variante (2c), (2d). Debido a las equivalencias aproximadas $I_{PM} \approx \frac{P_M}{\sqrt{3}U_N}$ y $I_{QM} \approx \frac{Q_M}{\sqrt{3}U_N}$ (U_N corresponde a la tensión nominal), pueden aplicarse las siguientes ecuaciones también para el caso (2e), (2f), en el que las droop gains k_M^f y k_M^Q se escalan con el factor $\sqrt{3}U_N$.

15 Hay que considerar que la ecuación anterior (2c) representa el estado estacionario del generador diesel. Los generadores diesel formadores de la red presentan una masa giratoria con un momento de inercia m y un factor de amortiguamiento D , que es muy pequeño. La masa giratoria rota en el estado estacionario en sincronismo con la frecuencia de la red f . El generador diesel aporta entonces una potencia mecánica P_{mech} , para mantener la frecuencia estacionaria f antes citada según la ecuación (2c). La potencia mecánica P_{mech} del generador diesel resulta como sigue:

$$P_{mech} = P_{M,0} - k_M^f (f - f_0) \quad (2g)$$

20 Con el modelo conocido de la masa giratoria y la ecuación anterior (2a), se obtiene a partir de ello:

$$mf\dot{+} Df = P_{mech} - P_M = P_{M,0} - k_M^f (f - f_0) - P_L + \sum_{j=1}^N P_{Cj} \quad (2h)$$

25 Puesto que D puede despreciarse y en el estado estacionario es $f\dot{=} 0$, resulta de ello $P_{mech} = P_M$. En combinación con la ecuación (2e) resulta así la regulación de frecuencia de la ecuación (2c).

30 Si en lugar de un generador diesel se utiliza un acumulador de energía eléctrica como nodo generador formador de la red, se utilizan como regulación proporcional, en lugar de las ecuaciones (2c) y (2d) las siguientes ecuaciones (2i) y (2j):

$$f = f_M = f_0 - k_M^P (P_M - P_{M,0}) = f_0 - k_M^P (P_L - \sum_{j=1}^N (P_{Cj}) - P_{M,0}) \quad (2i)$$

$$U = U_M = U_{M,0} - k_M^Q (Q_M - Q_{M,0}) = U_{M,0} - k_M^Q (Q_L - \sum_{j=1}^N (Q_{Cj}) - Q_{M,0}) \quad (2j)$$

35 Aquí están fijadas a su vez las correspondientes droop-gains k_M^P y k_M^Q , así como valores de referencia $P_{M,0}$, $U_{M,0}$ y $Q_{M,0}$. f_0 corresponde a la antes citada frecuencia de referencia en la red eléctrica. Son formas de realización alternativas con corriente activa y corriente reactiva

$$f = f_M = f_0 - k_M^P (I_{PM} - I_{PM,0}) \quad (2k)$$

$$40 \quad U = U_M = U_{M,0} - k_M^Q (I_{QM} - I_{QM,0}) \quad (2l)$$

45 Aquí están fijados a su vez los correspondientes valores de referencia $I_{PM,0}$ e $I_{QM,0}$. Tal como antes se ha descrito, pueden utilizarse las ecuaciones (2k), (2l) en lugar de (2i), (2j) cuando se escalan las correspondientes droop-gains k_M^P y k_M^Q con el factor $\sqrt{3}U_N$.

A diferencia del nodo generador formador de la red M , está configurada la regulación proporcional para el nodo generador que apoya la red número i como sigue:

$$50 \quad P_{Ci} = P_{Ci,0} - k_{Ci}^P (f_{Ci} - f_0) \quad (3a)$$

$$Q_{Ci} = Q_{Ci,0} - k_{Ci}^Q (U_{Ci} - U_{Ci,0}) \quad (3b)$$

Aquí es P_{Ci} la potencia activa y Q_{Ci} la potencia reactiva en el nodo generador que apoya la red número i , las cuales se ajustan en función de la frecuencia f_{Ci} y la tensión U_{Ci} en el nodo generador que apoya la red número i . Los valores $P_{Ci,0}$, $Q_{Ci,0}$, f_0 , $U_{Ci,0}$ son a su vez puntos de referencia de la regulación proporcional y corresponden a una potencia activa de referencia, una potencia reactiva de referencia, la ya antes definida frecuencia de referencia, así como una tensión de referencia.

Las magnitudes k_{Ci}^P, k_{Ci}^Q son a su vez droop-gains, que corresponden a los factores de proporcionalidad en el sentido de las reivindicaciones.

Son formas de realización alternativas:

$$I_{PCi} = I_{PCi,0} - k_{Ci}^P(f_{Ci} - f_0) \quad (3c)$$

$$I_{QCi} = I_{QCi,0} - k_{Ci}^Q(U_{Ci} - U_{Ci,0}) \quad (3d)$$

Aquí es I_{PCi} la corriente activa e I_{QCi} la corriente reactiva en el nodo generador que apoya la red número i , las cuales se ajustan en función de la frecuencia f_{Ci} y la tensión U_{Ci} en el nodo generador que apoya la red número i . Los valores $I_{PCi,0}$, $I_{QCi,0}$ corresponden a una corriente activa de referencia y una corriente reactiva de referencia. Tal como antes se ha descrito, pueden utilizarse las ecuaciones (3c), (3d) en lugar de (3a),

(3b) cuando se escalan las correspondientes droop-gains k_{Ci}^P y k_{Ci}^Q con el factor $\sqrt{3}U_N$. El ejemplo de realización continúa con la variante (3a), (3b).

En el marco de la modelización aquí descrita de la red eléctrica se describe la dinámica de los nodos generadores que apoyan la red mediante un algoritmo PLL, que en una primera aproximación tiene un comportamiento de pasobajo. Este algoritmo estima la frecuencia y la tensión en el nodo generador que apoya la red número i mediante los valores f_{Ci} y U_{Ci} como sigue:

$$\dot{f}_{Ci} = -\frac{1}{T_{Ci}^f}(f_{Ci} - f) \quad (3e)$$

$$\dot{U}_{Ci} = -\frac{1}{T_{Ci}^U}(U_{Ci} - U) \quad (3f)$$

Aquí designan T_{Ci}^f, T_{Ci}^U constantes de tiempo, cuyo valor puede fijarlo adecuadamente un especialista. F y U son la frecuencia y la tensión en el nodo generador formador de la red.

Mediante la combinación de las ecuaciones anteriores resulta para una red en isla, que contiene un único generador diesel como nodo generador formador de la red, así como varios nodos generadores que apoyan la red, el siguiente modelo dinámico para la potencia activa y la frecuencia:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} f \\ f_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{D+k_M^f}{m} & -\frac{1}{m}(k_C^P)^T \\ (T_C^f)^{-1} & -\text{diag}((T_C^f)^{-1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ f_c \end{pmatrix} + \frac{1}{m} \begin{pmatrix} k_M^f + \mathbf{1}^T k_C^P & -1 & 1 & +\mathbf{1}^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_0 \\ P_L \\ P_{M,0} \\ P_{C,0} \end{pmatrix} \quad (4a)$$

$$\begin{pmatrix} f \\ P_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\text{diag}(k_C^P) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ f_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_C^P & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_0 \\ P_L \\ P_{M,0} \\ P_{C,0} \end{pmatrix} \quad (4b)$$

Aquí están definidos los vectores en las ecuaciones (4a) y (4b) como sigue:

$$f_c = \text{vec}(f_{Ci}), k_C^P = \text{vec}(k_{Ci}^P), T_C^f = \text{vec}(T_{Ci}^f), P_C = \text{vec}(P_{Ci}), P_{C,0} = \text{vec}(P_{Ci,0})$$

$$\mathbf{1} = \text{vec}(1), (T_C^f)^{-1} = \text{vec}\left(\frac{1}{T_{Ci}^f}\right)$$

Además resulta el siguiente modelo dinámico para la potencia reactiva y la tensión:

$$\dot{U}_C = -\text{diag}((T_C^U)^{-1}) \left(I + \text{diag}(k_C^Q) \right) U_C + (T_C^U)^{-1} \begin{pmatrix} 1 & (k_C^Q)^T & -k_M^Q & k_M^Q & k_M^Q \mathbf{1}^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{M,0} \\ U_{C,0} \\ Q_L \\ Q_{M,0} \\ Q_{C,0} \end{pmatrix} \quad (5a)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{U} \\ \dot{Q}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_M^Q (k_C^Q)^T \\ -\text{diag}(k_C^Q) \end{pmatrix} U_C + \begin{pmatrix} 1 & \text{diag}(k_C^Q) & -k_M^Q & k_M^Q & k_M^Q \mathbf{1}^T \\ 0 & \text{diag}(k_C^Q) & 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{M,0} \\ U_{C,0} \\ Q_L \\ Q_{M,0} \\ Q_{C,0} \end{pmatrix} \quad (5b)$$

5

Aquí están definidos los vectores en las ecuaciones (5a) y (5b) como sigue:

$$U_C = \text{vec}(U_{Ci}), U_{C0} = \text{vec}(U_{Ci,0}), k_C^Q = \text{vec}(k_{Ci}^Q), T_C^U = \text{vec}(T_{Ci}^U), Q_C = \text{vec}(Q_{Ci}), Q_{C,0} = \text{vec}(Q_{Ci,0})$$

10

La dinámica de las anteriores ecuaciones (4a), (4b) y la dinámica de las anteriores ecuaciones (5a), (5b) están acopladas mediante las ecuaciones de la carga (1a) y (1b), que acoplan la potencia activa P_L y la potencia reactiva Q_L de la carga con la tensión U . No obstante, se presupone que la amplitud de la tensión U sólo varía marginalmente, con lo que ambas dinámicas son independientes entre sí.

15

Basándose en la anterior modelización, se resuelve en la forma de ejecución aquí descrita un problema de optimización, según el cual se minimizan los costes de la generación de energía del generador, es decir, la mayoría de la energía para la carga L ha de generarse mediante los nodos generadores de energía renovable que apoyan la red, ya que esta energía es bastante más barata que la generación de energía quemando combustible fósil. Aquí se tienen en cuenta condiciones marginales relativas al máximo transitorio (es decir, las máximas variaciones en el tiempo) de la potencia activa en los nodos generadores que apoyan la red, así como en cuanto a la frecuencia y la tensión en los nodos generadores formadores de la red. De esta manera queda garantizado un funcionamiento de la red estable y además se evitan sobreoscilaciones al generar la potencia activa en los nodos generadores que apoyan la red.

25

Matemáticamente se representa este proceso de optimización como sigue:

$$\min_{P_0, Q_0, K} P_M \quad (6a)$$

30

Bajo la condición de la ecuación (2a) (6b)

$$\|P_{Ci}(t)\|_\infty \leq P_{Ci,max} \quad \forall i, \forall P_L \in TP_L \quad (6c)$$

$$\|f(t) - f_0\|_\infty \leq \Delta f_{max} \quad \forall P_L \in TP_L \quad (6d)$$

35

$$\|U(t) - U_N\|_\infty \leq \Delta U_{max} \quad \forall Q_L \in TQ_L \quad (6e)$$

Los vectores que figuran en las ecuaciones están definidos como sigue:

$$P_0 = (P_{M,0}, P_{C,0})^T, Q_0 = (Q_{M,0}, Q_{C,0})^T, K = (k_M^f, (k_C^P)^T, k_M^Q, (k_C^Q)^T)^T$$

40

Las magnitudes $P_{Ci,max}$ son límites superiores para la potencia activa en los correspondientes nodos generadores que apoyan la red. Además Δf_{max} es un límite superior para oscilaciones de la frecuencia y ΔU_{max} un límite superior para oscilaciones de la tensión en el nodo generador formador de la red. U_N designa una tensión nominal predeterminada en los nodos generadores formadores de la red. TP_L es un bloque predeterminado de posibles trayectorias de la potencia activa de la carga, es decir, un conjunto de posibles variaciones en el tiempo predeterminadas de la potencia activa de la carga, de las cuales se supone que estas variaciones pueden presentarse en la red eléctrica considerada. Análogamente TQ_L es un bloque predeterminado de posibles trayectorias de la potencia reactiva, es decir, un conjunto de posibles variaciones en el tiempo predeterminadas de la potencia reactiva de la carga, de las cuales se

45

supone que estas variaciones pueden presentarse en la red eléctrica considerada. Además $\|\cdot\|_{\infty}$ designa la norma de infinitud o de máximo, de por sí conocida, que es el máximo valor absoluto o módulo para todos los instantes $t \geq 0$ del argumento en la norma.

5 Para la anterior ecuación (6a) se calcula P_M mediante la ecuación (2a) en combinación con las ecuaciones (4a) y (4b). Entonces se resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales de la ecuación (4a) y se utilizan las frecuencias f y f_c que de ello resultan en la ecuación (4b). De ello resulta entonces P_C , que se utiliza a continuación en la ecuación (2a). La magnitud $P_{Ci}(t)$ de la ecuación (6c) resulta resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales correspondiente a la ecuación (4a) y utilizando las frecuencias f y f_c que de ello resultan en la ecuación (4b). La frecuencia $f(t)$ de la ecuación (6d) se determina resolviendo el sistema de ecuaciones diferenciales de la ecuación (4a). La magnitud $U(t)$ resulta de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales según la ecuación (5a) y utilizando la tensión U_C que de ello resulta en la ecuación (5b).

15 La ecuación (6c) se utiliza para evitar sobreoscilaciones en las potencias activas de los nodos generadores que apoyan la red, para que no se produzcan daños o desconexiones de los onduladores en las instalaciones fotovoltaicas. Las ecuaciones (6d) y (6e) limitan la desviación en cuanto a frecuencia y a tensión, para garantizar un funcionamiento estable de la red y una buena calidad de la tensión. El problema de la optimización según las ecuaciones (6a) a (6e) puede resolverse con métodos de por sí conocidos, por ejemplo mediante un análisis de robustez H_{∞} , H_2 ó H_1 . Los correspondientes algoritmos se encuentran por ejemplo en el documento [3]. En particular pueden reformularse las condiciones marginales anteriores (6c), (6d), (6e) como desigualdades matriciales, lo cual se describe igualmente en el documento [3]. Los algoritmos allí representados para las condiciones (6c), (6d), (6e) garantizan también una estabilidad interna de la red eléctrica frente a variaciones de la carga. Dado el caso pueden añadirse otras condiciones marginales, en particular límites superiores e inferiores para elementos de los vectores K , P_0 y Q_0 .

30 En conjunto basándose en la solución del problema de optimización anterior se determinan valores adecuados para los factores de proporcionalidad, así como las potencias activas de referencia y las potencias reactivas de referencia de los reguladores proporcionales en los nodos generadores formadores de la red y los nodos generadores que apoyan la red. De esta manera se logra durante el funcionamiento de la red eléctrica una generación de energía optimizada con los menores costes de generación posibles. El procedimiento puede entonces determinarse por ejemplo antes de la puesta en servicio de la red eléctrica partiendo de una potencia activa y potencia reactiva (promediadas) de la carga. Igualmente puede utilizarse el procedimiento anterior dado el caso también durante el funcionamiento de la red eléctrica para actualizar los correspondientes parámetros de los reguladores proporcionales cuando varía la carga en la red eléctrica.

40 En un segundo ejemplo de ejecución se muestra cómo puede modelizarse la red eléctrica con varios nodos formadores de la red y sin la hipótesis de líneas eléctricas cortas. Al respecto se parte del PG de la figura 1, pero representando los nodos generadores N1, N2, N3 y N4 ahora respectivos nodos generadores formadores de la red en forma de un generador diesel o de un acumulador de energía. El procedimiento puede utilizarse también para otros nodos de red formadores de la red en forma de otras clases de generadores o nodos adicionales que apoyan la red.

45 Contrariamente al ejemplo de ejecución anterior con líneas eléctricas que pueden despreciarse, se utiliza ahora un modelo de flujo de carga linealizado para describir la potencia activa y/o potencia reactiva de los nodos:

50
$$P_i(t) \approx \sum_{j \in N_i} \left(\frac{U_{iN}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \left(r_{ij}(U_i(t) - U_j(t)) + x_{ij}U_{jN}(\theta_i(t) - \theta_j(t)) \right) \right), \quad (7)$$

$$Q_i(t) \approx \sum_{j \in N_i} \left(\frac{U_{iN}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \left(x_{ij}(U_i(t) - U_j(t)) - r_{ij}U_{jN}(\theta_i(t) - \theta_j(t)) \right) \right). \quad (8)$$

55 Aquí designan P_i y Q_i las potencias activa y reactiva aportadas por el nodo i . La línea eléctrica entre los nodos i y j presenta una resistencia r_{ij} y una reactancia x_{ij} . Las amplitudes de la tensión en los nodos i y j son U_i , U_j , siendo U_{iN} , U_{jN} las tensiones nominales en los nodos i y j . Las fases de la tensión en los nodos i y j son θ_i , θ_j . Para mostrarlo se representan las magnitudes que varían con el tiempo como función del tiempo t , mientras que todas las demás magnitudes son parámetros constantes. El conjunto N_i designa todos los nodos contiguos al nodo i .

60 Las ecuaciones (7) y (8) pueden indicarse también en representación escrita matricial:

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{diag}(U_{iN})G & -\text{diag}(U_{iN})B\text{diag}(U_{iN}) \\ -\text{diag}(U_{iN})B & -\text{diag}(U_{iN})G\text{diag}(U_{iN}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \theta \end{pmatrix}$$

Aquí se definen los vectores y matrices como sigue:

$$5 \quad \theta = \text{vec}(\theta_i), U = \text{vec}(U_i), P = \text{vec}(P_i), Q = \text{vec}(Q_i),$$

$$G = [G_{ij}]; G_{ij} = \begin{cases} \sum_{j \in N_i} \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i = j \\ -\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

$$B = [B_{ij}]; B_{ij} = \begin{cases} -\sum_{j \in N_i} \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i = j \\ +\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

10

Las fases de la tensión de los distintos nodos pueden calcularse mediante integración de las frecuencias de la tensión en los correspondientes nodos. Las frecuencias de la tensión resultan para generadores convencionales de la ecuación (2c) y para acumuladores de energía de la ecuación (2h) como sigue:

$$15 \quad \dot{\theta}_i(t) = f_0 - \frac{1}{k_{Mi}^f} (P_{Mi}(t) - P_{Mi,0}) \quad (2c')$$

$$m_i \ddot{\theta}_i(t) + D_i \dot{\theta}_i(t) = P_{mech}(t) - P_{Mi}(t) = P_{Mi,0} - k_{Mi}^f (\dot{\theta}_i(t) - f_0) - P_{Mi}(t) \quad (2h')$$

20

Al respecto designan θ_i la frecuencia en el nodo generador i . k_{Mi}^f es la droop-gain (inversa) para la regulación de la frecuencia en el nodo i , representando estas droop-gains factores de proporcionalidad en el sentido de las reivindicaciones. Además corresponde f_0 a una frecuencia de referencia en la red eléctrica, que representa la frecuencia nominal de la red (por ejemplo 50 Hz). Además es $P_{Mi,0}$ una potencia activa de referencia. Los parámetros m_i y D_i describen el momento de inercia y el factor de amortiguamiento del generador en el nodo i .

25

Análogamente puede describirse la dinámica de la amplitud de la tensión U_{Mi} para los nodos de red i formadores de la red similarmente a en la ecuación (3f) y (3d) como sigue:

$$30 \quad \dot{U}_{Mi} = -\frac{1}{T_{Mi}^U} (U_{Mi} - U_{Mi,0} + k_{Mi}^Q (Q_{Mi} - Q_{Mi,0})) \quad (2d')$$

30

Aquí designa T_{Mi}^U una constante de tiempo, cuyo valor puede fijar adecuadamente un especialista. k_{Mi}^Q es la droop-gain para la regulación de tensión, representando estas droop-gains factores de proporcionalidad en el sentido de las reivindicaciones. Además $U_{Mi,0}$ es una tensión de referencia y $Q_{Mi,0}$ una potencia reactiva de referencia de la regulación proporcional en el nodo i .

35

Ahora pueden acoplarse los modelos dinámicos de los nodos formadores de la red (2c'), (2d'), (2h') con los nodos de la carga (ecuaciones (1a) y (1b)) mediante la ecuación de flujo de carga linealizada (7) (realizándose entonces $P_{Mi} = P_i$ y $Q_{Mi} = Q_i$). De esta manera se obtienen las siguientes ecuaciones, análogamente a las ecuaciones (4a) y (5a) del ejemplo de realización precedente:

40

$$\text{diag}(m_i) \ddot{\theta} + \text{diag}(D_i) (\dot{\theta}) + \text{diag}(k_{Mi}^f) (\dot{\theta} - f_0 \mathbf{1}) = P_{M,0} - (\text{diag}(U_{iN})G U - \text{diag}(U_{iN})B \text{diag}(U_{iN}) \theta) \quad (9a)$$

$$\text{diag}(T_{Mi}^U) \dot{U} = -U + U_{M,0} + \text{diag}(k_{Mi}^Q) (Q_{M,0} \pm (-\text{diag}(U_{iN})B U \pm \text{diag}(U_{iN})G \text{diag}(U_{iN}) \theta)) \quad (9b)$$

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{diag}(U_{iN})G & -\text{diag}(U_{iN})B\text{diag}(U_{iN}) \\ -\text{diag}(U_{iN})B & -\text{diag}(U_{iN})G\text{diag}(U_{iN}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \theta \end{pmatrix} \quad (9c)$$

Aquí están definidos los vectores y matrices en las ecuaciones (9a), (9b) y (9c) como sigue:

$$5 \quad \theta = \text{vec}(\theta_i), U = \text{vec}(U_i), P_{M,0} = \text{vec}(P_{Mi,0}), U_{M,0} = \text{vec}(U_{Mi,0}), Q_{M,0} = \text{vec}(Q_{Mi,0}),$$

$$G = [G_{ij}]; G_{ij} = \begin{cases} \sum_{j \in N_i} \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i = j \\ -\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

$$B = [B_{ij}]; B_{ij} = \begin{cases} -\sum_{j \in N_i} \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i = j \\ +\frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

10 Aquí rige para un nodo formador de la red, al que está conectado un acumulador de energía, $m_i = 0, D_i = 0$ y para un nodo de carga, $m_i = 0, D_i = 0, k_{Mi}^f = 0, k_{Mi}^Q = 0, P_{Mi} = -P_{Li}, T_{Mi}^U = 0$. El sistema de ecuaciones diferencial-algebraicas que resulta puede ser transformado por un especialista en un sistema de ecuaciones diferenciales con entrada P_L y salidas P y Q .

15 Con ayuda del modelo dinámico de las ecuaciones (9a) a (9c) puede crearse ahora un problema de optimización análogo al de las ecuaciones (6a) a (6e). En este ejemplo de ejecución se presupone que los diversos nodos generadores formadores de la red tienen distintos costes de funcionamiento c_i por unidad de potencia aportada P_{Mi} . El vector de costes resulta así como $c = \text{vec}(c_i)$. El problema de optimización resultante es así

$$20 \quad \min_{P_0, Q_0, K} c^T P_M \quad (10a)$$

Bajo la condición de las ecuaciones (9a) a (9c) (10b)

$$25 \quad \|P_{Mi}(t)\|_\infty \leq P_{Mi,max} \quad \forall i, \forall P_L \in TP_L \quad (10c)$$

$$\|f(t) - f_0\|_\infty \leq \Delta f_{max} \quad \forall P_L \in TP_L \quad (10d)$$

$$30 \quad \|U(t) - U_N\|_\infty \leq \Delta U_{max} \quad \forall Q_L \in TQ_L \quad (10e)$$

Basándose en la solución a este problema de optimización, pueden determinarse valores adecuados para el factor de proporcionalidad, así como las potencias activas de referencia y las potencias reactivas de referencia de los reguladores proporcionales en los nodos generadores formadores de la red y dado el caso también en nodos generadores que apoyan la red.

35 Las formas de ejecución antes descritas del procedimiento correspondiente a la invención presentan una serie de ventajas. En particular se logra de manera sencilla un funcionamiento optimizado de una red eléctrica mediante un procedimiento sencillo asistido por ordenador, que basándose en un modelo de la red eléctrica calcula valores adecuados para los reguladores proporcionales de los nodos de red, sin que para ello tengan que realizarse costosas simulaciones. En base a ello, queda optimizado el funcionamiento de la red eléctrica al aportarse tanta energía como sea posible mediante fuentes de energía renovable, lográndose no obstante a la vez un funcionamiento estable de la red con reducidas oscilaciones de la tensión y/o de la frecuencia.

45 Bibliografía

- [1] Lopes, y colab. "PV Hybrid Mini-Grids: Applicable Control Methods for Various Situations" (Mini-redes fotovoltaicas híbridas: Métodos de control aplicables para diversas situaciones), International Energy Agency: Photovoltaic Power Systems Programme, 2012.
- 50 [2] Markus Jostock y colab., "Structured Analysis of Arbitrary Island Grids" (Análisis estructurado de redes arbitrarias en isla), 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 6 - 8 Octubre 2013, Copenhagen.
- [3] Scherer, C. y Weiland, S.; Linear Matrix Inequalities in Control; lecture notes, (Desigualdades matriciales lineales en el control; notas de conferencia)
- 55 <http://www.dscs.tudelft.nl/~cscherer/lmi/notes05.pdf> (2005).

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica (PG) con una pluralidad de nodos de red (N1, N2, ..., N5) conectados mediante líneas eléctricas (PL), que incluye uno o varios primeros nodos de red (N1), proporcionando el o los primeros nodos de red (N1) durante el servicio de la red eléctrica (PG) potencia activa para una carga (L) en la red eléctrica (PG), siendo un correspondiente primer nodo de red (N1) un nodo generador formador de la red, en el que mediante un procedimiento de regulación se regulan la amplitud y la frecuencia de la tensión en este nodo de red (N1) por un lado en función de la potencia reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) y por otro lado en función de la potencia activa que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente activa que se aporta a través de este nodo de red (N1),
- 10 **caracterizado porque**
- 15 - se determinan variaciones de la potencia activa de los primeros nodos de red (N1) para las correspondientes variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga (L) basándose en un modelo dinámico de la red eléctrica (PG);
- 20 - se ajustan parámetros de los procedimientos de regulación de los correspondientes primeros nodos de red (N1) tal que mediante las variaciones de la potencia activa determinada para los primeros nodos de red (N1) se resuelve un problema de optimización con la meta de un funcionamiento de la red eléctrica óptimo en cuanto a uno o varios criterios de optimización, siendo el objetivo del problema de optimización que proceda del o de los primeros nodos de la red (N1) tan poca proporción de la potencia activa proporcionada para la carga (L) como sea posible.
- 25 2. Procedimiento según la reivindicación 1,
- caracterizado porque** los nodos de red (N1, N2, ..., N5) incluyen además uno o varios segundos nodos de red (N2, N3, N4), que durante el funcionamiento de la red eléctrica (PG) proporcionan potencia activa para la carga en la red eléctrica (PG), siendo un correspondiente segundo nodo de red (N2, N3, N4) un nodo generador que apoya la red en forma de una instalación generadora de energía renovable (PV), en la que mediante un procedimiento de regulación por un lado se regula la potencia activa aportada a través de este nodo de red (N2, N3, N4) o la corriente activa aportada a través de este nodo de red (N2, N3, N4) y por otro lado la potencia reactiva aportada a través de este nodo de red (N2, N3, N4) se regulan en función de la frecuencia y amplitud de la tensión en este nodo de red,
- 30 - determinándose además variaciones de la potencia activa de los segundos nodos de red (N2, N3, N4) para las correspondientes variaciones de la potencia activa predeterminadas de la carga (L) basándose en el modelo dinámico de la red eléctrica (PG) y
- 35 - ajustándose los procedimientos de regulación de los correspondientes primeros y segundos nodos de red (N1, N2, N3, N4) tal que mediante las variaciones de la potencia activa determinadas de los primeros y segundos nodos de red (N1, N2, N3, N4) se resuelve el problema de optimización con el objetivo de un funcionamiento de la red eléctrica óptimo con respecto a uno o varios criterios de optimización.
- 40 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- 45 **caracterizado porque** una red eléctrica (PG) funciona en forma de una red en isla, sin conexión de los nodos de la red (N1, N2, ..., N5) a otras redes eléctricas.
4. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- 50 **caracterizado porque el** modelo dinámico de la red eléctrica (PG) se basa en la hipótesis de que la potencia activa y la potencia reactiva generadas en un nodo de la red (N1, N2, ..., N5) están disponibles inmediatamente en cualquier otro nodo de la red (N1, N2, ..., N5).
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- 55 **caracterizado porque** el modelo dinámico de la red eléctrica (PG) es un modelo de flujo de carga linealizado.
6. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
- 60 **caracterizado porque** el procedimiento de regulación en los nodos generadores formadores de la red es una regulación proporcional, que incluye una primera y una segunda regulación proporcional.
7. Procedimiento según la reivindicación 6,
- caracterizado porque**
- 65 - según la primera regulación proporcional, basándose en un primer factor de proporcionalidad y una potencia activa de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica (PG), se fija la frecuencia de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la potencia activa suministrada por el nodo generador formador de la red o bien

- 5 - según la primera regulación proporcional, basándose en un primer factor de proporcionalidad y una corriente activa de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica (PG), se fija la frecuencia de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la corriente activa aportada por el nodo generador formador de la red.
8. Procedimiento según la reivindicación 6 ó 7,
caracterizado porque
- 10 - según la segunda regulación proporcional, basándose en un segundo factor de proporcionalidad y una potencia reactiva de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador formador de la red, se fija la amplitud de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la potencia reactiva aportada por el nodo generador formador de la red o bien
- 15 - según la segunda regulación proporcional, basándose en un segundo factor de proporcionalidad y una corriente reactiva de referencia asociada al nodo generador formador de la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador formador de la red, se fija la amplitud de la tensión en el nodo generador formador de la red en función de la corriente reactiva aportada por el nodo generador formador de la red.
- 20 9. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes en combinación con la reivindicación 2,
caracterizado porque el procedimiento de regulación en el nodo generador que apoya la red es una regulación proporcional, que incluye una tercera y una cuarta regulación proporcional.
- 25 10. Procedimiento según la reivindicación 9,
caracterizado porque
- 30 - según la tercera regulación proporcional basándose en un tercer factor de proporcionalidad y una potencia activa de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica (PG), se fija la potencia activa aportada a través del nodo generador que apoya la red en función de la frecuencia de la tensión en el nodo generador que apoya la red o bien
- 35 - según la tercera regulación proporcional basándose en un tercer factor de proporcionalidad y una corriente activa de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica (PG), se fija la corriente activa suministrada por el nodo generador que apoya la red en función de la frecuencia de la tensión en el nodo generador que apoya la red.
11. Procedimiento según la reivindicación 9 ó 10,
caracterizado porque
- 40 - según la cuarta regulación proporcional basándose en un cuarto factor de proporcionalidad y una potencia reactiva de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, se fija la potencia reactiva aportada a través del nodo generador que apoya la red en función de la amplitud de la tensión en el nodo generador que apoya la red o bien
- 45 - según la cuarta regulación proporcional basándose en un cuarto factor de proporcionalidad y una corriente reactiva de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, así como una tensión de referencia asociada al nodo generador que apoya la red, se fija la corriente reactiva aportada por el nodo generador que apoya la red en función de la amplitud de la tensión en el nodo generador que apoya la red.
- 50 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 6 a 11,
caracterizado porque en el marco del ajuste de la primera y segunda regulación proporcional y/o de la tercera y cuarta regulación proporcional, se determinan el primer y/o el segundo factor de proporcionalidad y/o el tercer y/o el cuarto factor de proporcionalidad y/o la potencia activa de referencia o la corriente activa de referencia y/o la potencia reactiva de referencia o la corriente reactiva de referencia en los respectivos primeros y/o segundos nodos de red (N1, N2, N3, N4).
- 55 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
caracterizado porque el problema de optimización es una minimización de la potencia activa aportada a través del primer o los primeros nodos de red (N1), bajo la condición secundaria de que las variaciones de la potencia activa de los primeros y/o segundos nodos de red (N1, N2, N3, N4) están limitadas para las correspondientes variaciones de la potencia activa predeterminadas de la carga (L).
- 60 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
caracterizado porque el problema de optimización es una minimización de las variaciones de potencia activa de los primeros y/o segundos nodos de red (N1, N2, N3, N4) para las respectivas variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga (L).
- 65

- 5 15. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
caracterizado porque como condición secundaria del problema de optimización se tiene en cuenta que las desviaciones de las frecuencias de las tensiones en el o los nodo/s generador/es que forma/n la red y/o apoya/n la red, quedan limitadas por una frecuencia de referencia asociada a la red eléctrica (PG) para la correspondientes variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga (L) y/o las desviaciones de las amplitudes de las tensiones en el o los nodo/s generador/es que forma/n la red y/o apoya/n la red quedan limitadas por una tensión de referencia asociada al correspondiente nodo generador formador de la red y/o que apoya la red para las correspondientes variaciones de potencia reactiva predeterminadas de la carga (L).
- 10 16. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
caracterizado porque para determinar las variaciones de la potencia activa de los segundos nodos de red (N2, N3, N4), se estima una variación en el tiempo de la frecuencia en los correspondientes segundos nodos de red (N2, N3, N4) mediante un algoritmo PLL.
- 15 17. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes,
caracterizado porque el o los primeros nodos de red (N1) incluyen uno o varios acumuladores de energía, en particular baterías y/o uno o varios generador/es eléctrico/s accionado/s mediante combustible fósil o de generación renovable.
- 20 18. Procedimiento según una de las reivindicaciones precedentes en combinación con la reivindicación 2,
caracterizado porque el o los segundo/s nodo/s de red (N2, N3, N4) incluyen una o varias instalaciones fotovoltaicas y/o instalaciones de generación eólica.
- 25 19. Equipo para la configuración asistida por ordenador de una red eléctrica (PG) con una pluralidad de nodos de red (N1, N2, ..., N5) conectados mediante líneas eléctricas (PL), que incluye uno o varios primeros nodos de red (N1), proporcionando el o los primeros nodos de red (N1) durante el servicio de la red eléctrica (PG) potencia activa para una carga (L) en la red eléctrica (PG), siendo un correspondiente primer nodo de red (N1) un nodo generador formador de la red, en el que mediante un procedimiento de regulación se regulan la amplitud y la frecuencia de la tensión en este nodo de red (N1) por un lado en función de la potencia reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) y por otro lado en función de la potencia activa que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente activa que se aporta a través de este nodo de red (N1),
caracterizado porque el equipo está preparado para ejecutar un procedimiento en el que
 - se determinan variaciones de la potencia activa de los primeros nodos de red (N1) para las correspondientes variaciones de potencia activa predeterminadas de la carga (L) basándose en un modelo dinámico de la red eléctrica (PG);
 - se ajustan los parámetros de los procedimientos de regulación de los correspondientes primeros nodos de red (N1) tal que mediante las variaciones de la potencia activa determinadas de los primeros nodos de red (N1) se resuelve un problema de optimización con la meta de un funcionamiento de la red eléctrica óptimo en cuanto a uno o varios criterios de optimización, siendo el objetivo del problema de optimización que proceda del o de los primeros nodos de la red (N1) tan poca proporción de la potencia activa proporcionada para la carga (L) como sea posible.
- 30 35 40 45 20. Equipo según la reivindicación 19,
caracterizado porque el equipo está preparado para ejecutar un procedimiento según una de las reivindicaciones 2 a 19.
- 50 55 60 21. Red eléctrica (PG) con una pluralidad de nodos de red (N1, N2, ..., N5) conectados mediante líneas eléctricas (PL), que incluye uno o varios primeros nodos de red (N1), proporcionando el o los primeros nodos de red (N1) durante el servicio de la red eléctrica (PG) potencia activa para una carga (L) en la red eléctrica (PG), siendo un correspondiente primer nodo de red (N1) un nodo generador formador de la red, en el que mediante un procedimiento de regulación se regulan la amplitud y la frecuencia de la tensión en este nodo de red (N1) por un lado en función de la potencia reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente reactiva que se aporta a través de este nodo de red (N1) y por otro lado en función de la potencia activa que se aporta a través de este nodo de red (N1) o de la corriente activa que se aporta a través de este nodo de red (N1),
caracterizada porque la red eléctrica (PG) incluye un equipo para la configuración de la red eléctrica según la reivindicación 19 ó 20.

65

