

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 671 406**

51 Int. Cl.:

**H02J 3/18** (2006.01)

**H02J 3/38** (2006.01)

**H02J 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.06.2015 PCT/EP2015/063213**

87 Fecha y número de publicación internacional: **23.12.2015 WO15193199**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.06.2015 E 15728857 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.04.2018 EP 3158617**

54 Título: **Procedimiento para controlar la distribución de energía**

30 Prioridad:

**20.06.2014 GB 201411004**

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

**06.06.2018**

73 Titular/es:

**UNIVERSITY COLLEGE DUBLIN, NATIONAL  
UNIVERSITY OF IRELAND DUBLIN (100.0%)  
Belfield  
Dublin 4, IE**

72 Inventor/es:

**MURPHY, CONOR;  
KEANE, ANDREW y  
RICHARDSON, PETER**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

**ES 2 671 406 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 controlar la distribución de energía.

5 **Campo**

La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar la distribución de energía, proveniente de una pluralidad de fuentes energéticas conectadas a una red de distribución de energía eléctrica.

10 **Antecedentes de la invención**

La figura 1 muestra una parte de una típica red de distribución de energía eléctrica 10. La red comprende un número de ramas que conectan unos nodos indexados 00 a 08. Una pluralidad de fuentes energéticas A a D están conectadas a los nodos 03, 05, 07 y 08, respectivamente, y la demanda se extrae de la red en los nodos indicados con las flechas 12. La red 10, en este caso, es alimentada a través de dos transformadores 14 conectados en paralelo. En el ejemplo mostrado, se indica que las fuentes energéticas son turbinas eólicas, aunque se apreciará que la presente invención se refiere a la mitigación de los problemas, por medio del uso de cualquier forma de fuente energética capaz de controlar la potencia reactiva incluyendo fuentes eólicas, fotovoltaicas e hidráulicas. Además, aunque las fuentes energéticas se muestran como turbinas individuales, éstas pueden ser igualmente parques eólicos, que incluyen una pluralidad de turbinas o cualquier grupo de generadores de este tipo.

Se apreciará que varias fuentes energéticas de este tipo están conectadas con unas partes remotas de redes de distribución, en las que la capacidad de la infraestructura que conecta fuentes energéticas a la demanda puede ser limitada. Las propiedades físicas de los conductores y las cargas dentro de la red provocan que tanto la magnitud como el ángulo del voltaje varíen y, por lo tanto, causen el flujo de potencia reactiva. Cualquier fuente o pila reactiva puede reducir la capacidad de transferencia de potencia activa de las ramas de la red y podría conducir a circulaciones de energía congestionadas en la red.

La energía disponible de las fuentes A a D puede variar, en gran medida, según las condiciones ambientales predominantes en la medida en que, bajo ciertas condiciones de funcionamiento, los operadores de red pueden pedir a los proveedores que restrinjan la generación de potencia activa para evitar la congestión de red y romper las restricciones térmicas, es decir, los límites de corriente para la red.

En resumen, hay dos restricciones contradictorias en juego, mantener el voltaje terminal de un generador a un nivel aceptable (para el generador) para permitir que la energía generada sea suministrada y monetizada, al tiempo que se asegura que no se cumplan las restricciones térmicas.

Los esquemas actuales de gestión para generadores en dichos sistemas de distribución tienen el potencial de originar la subutilización de la infraestructura de red existente, en la que al intentar mantener un voltaje equilibrado en un nodo de conexión del generador (y la red circundante), la potencia reactiva requerida puede limitar la capacidad de transferencia disponible para la potencia activa en las líneas circundantes. Esto, a su vez, resulta en la reducción innecesaria de la potencia activa y en la pérdida de ingresos para aquellos generadores.

45 Ha habido una serie de intentos para abordar los problemas con la distribución de energía en dichas redes:

La publicación WO 2009083445 divulga un procedimiento para aumentar una capacidad de potencia reactiva total de un grupo de turbinas eólicas conectadas operativamente a una red. El procedimiento comprende las etapas de generar un valor de voltaje representativo de un nivel de voltaje de red, determinar un valor requerido de potencia reactiva total basado en el valor de voltaje, y activar por lo menos una turbina eólica en dicho grupo para incrementar la capacidad de potencia reactiva total desde un valor presente al valor requerido de potencia reactiva total en una cantidad predeterminada.

Los documentos US nº 7.531.911 y EP 2 254 217 divulgan un procedimiento para la regulación de la potencia reactiva en un parque eólico, que presenta una pluralidad de turbinas eólicas que proporcionan un control óptimo de la compensación de potencia reactiva en el parque eólico y es capaz de mantener una reserva de potencia reactiva para apoyar eventuales contingencias de red.

La patente US nº 6.924.565 proporciona un control de potencia reactiva y real para sistemas de generadores de turbinas eólicas, en el que el soporte de potencia reactiva proporcionado por los generadores individuales de turbinas eólicas en un sistema se puede variar dinámicamente para adaptarse a los parámetros de aplicación y utilizar así la capacidad total de un sistema generador de turbina eólica.

La patente US nº 6.924.627 divulga la regulación de potencia reactiva en una instalación de energía eólica, modulada por un dispositivo de compensación entre un generador y la red para la compensación de la potencia reactiva. El dispositivo de compensación está regulado de tal modo que la energía eléctrica suministrada al

consumidor tenga un componente de potencia reactiva adaptado en relación con su fase, amplitud y/o frecuencia al consumidor, de tal manera que compense la potencia reactiva en el consumidor.

El documento US/2010/237834 divulga un procedimiento para controlar la distribución de energía a través de una red eléctrica en la que primero, se estima un voltaje de red equivalente sobre la base de unas magnitudes eléctricas medidas en un punto de conexión de la planta de generación de energía junto con un modelo equivalente de una red de energía a la cual está conectada la planta de generación de potencia. Entonces, sobre la base de dicho voltaje equivalente estimado, se genera un comando indicativo de potencia reactiva que va a ser producida por la planta de generación de energía.

## Sumario

De acuerdo con la presente invención, está previsto un procedimiento para controlar la distribución de energía según la reivindicación 1.

El presente procedimiento determina el voltaje terminal de un recurso de potencia reactiva para reducir al mínimo por inferencia el flujo de corriente a una o varias partes remotas de una red.

Las formas de realización de la presente invención producen y definen una relación entre el voltaje local y las mediciones de potencia en un nodo de una red eléctrica y las condiciones del sistema en una rama remota de la red. Estas mediciones locales se utilizan para determinar un punto de ajuste de voltaje óptimo en el nodo que, si se logra mediante un recurso de potencia reactiva, afectaría al flujo de potencia reactiva o corriente de línea en una o más ramas remotas particulares del sistema de potencia de una manera capturada por la relación derivada. El cambio requerido en la potencia reactiva para obtener este punto de ajuste de voltaje también se calcula sobre la base de las mediciones locales.

Este procedimiento no se limita a controlar sólo generadores, sino cualquier dispositivo que inyecte y absorba potencia reactiva incluso sin producir potencia activa.

Las formas de realización de la presente invención se basan en la medida en que las mediciones locales, en un nodo de conexión de un dispositivo, pueden utilizarse para inferir las condiciones del sistema en regiones remotas (ramas) del sistema de potencia y hacer cambios informados al propio punto de funcionamiento del dispositivo para contrarrestar (potenciales) infracciones de restricciones en esas regiones.

Las formas de realización de la invención intentan satisfacer ambas restricciones; mantener los voltajes terminales locales en un nodo, al cual está conectado un dispositivo a un rango permisible y reducir al mínimo el flujo de potencia reactiva en la red circundante, aumentando de este modo la capacidad disponible de potencia activa para ser exportada desde un dispositivo tal como un sitio generador.

Las formas de realización utilizan un control local, a diferencia de otros enfoques de "instalar y olvidar" utilizados actualmente en el funcionamiento de generación distribuida, a saber, Regulación Automática del Voltaje (modo AVR) y Factor de Potencia constante (modo PF).

## Breve descripción de las figuras

Las formas de realización de la presente invención se describirán a continuación a modo de ejemplo, haciendo referencia a las figuras adjuntas, en las que:

la figura 1 muestra una red de distribución de energía ejemplificativa, que incluye un número de fuentes de energía renovable controladas de acuerdo con una forma de realización de la presente invención;

la figura 2 ilustra de forma general las fases de modelado de red empleadas dentro de una forma de realización de la invención;

la figura 3 ilustra las restricciones conflictivas para un generador dado dentro de una red, tal como la que se muestra en la figura 1;

la figura 4 ilustra las etapas involucradas en el control de un generador según una forma de realización de la invención;

la figura 5 muestra el procedimiento para determinar un punto de ajuste de voltaje ajustado de acuerdo con una forma de realización de la invención, y

la figura 6 muestra las combinaciones de los cálculos utilizados en el procedimiento de la figura 4.

**Descripción de las formas de realización preferidas**

Haciendo referencia a la figura 2, las formas de realización de la presente invención, en primer lugar, involucran la construcción de un modelo eléctrico que refleja el comportamiento eléctrico de una red de distribución tal como la red 10, etapa 1.

En primer lugar se presentarán alguna nomenclatura utilizada en la descripción de este modelado:

$P$  - Potencia Activa

$Q$  - Potencia Reactiva

$\theta$  - Ángulo de Fasor de Voltaje

$V$  - Magnitud de Fasor de Voltaje

$g_{ij}$  - Conductancia de Serie para la Rama ij

$b_{ij}$  - Susceptancia de Serie para la Rama ij

$g_{si}$  - Conductancia de Derivación en el nodo i

$b_{si}$  - Susceptancia de Derivación en el nodo i

$N$  - Número Total de nodos

$|I_{ij}|$  - Flujo de corriente en la rama ij

$\frac{\partial P}{\partial V}$  - Sensibilidad de Voltaje de Potencia Activa

$\frac{\partial Q}{\partial V}$  - Sensibilidad de Voltaje de Potencia Reactiva

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$  - Sensibilidad de Ángulo de Voltaje de Potencia Activa

$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  - Sensibilidad de Ángulo de Voltaje de Potencia Reactiva

La potencia activa,  $P_{ij}$ , la potencia reactiva,  $Q_{ij}$ , y la magnitud de corriente de línea,  $|I_{ij}|$ , para cada rama de la red se pueden definir con ecuaciones, tales como las ecuaciones (1) a (3), aunque se pueden utilizar otras:

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$|I_{ij}| = \frac{\sqrt{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}}{V_i} \quad (3)$$

Calcular el flujo de potencia compleja en cualquier nodo  $i$  de la red implica la escritura de dos funciones para todos los nodos  $N$ , una para la potencia activa y otra para la potencia reactiva, por ejemplo, como en las ecuaciones (4) y (5):

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (4)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \Delta V_j \quad (5)$$

En la Etapa 2, se realiza un análisis de flujo de potencia, por ejemplo, un análisis de flujo de potencia de Newton-Raphson, para evaluar el impacto de los generadores en los diferentes nodos de la red con respecto al rango de generadores de todos los posibles puntos de operación de potencia activa y potencia reactiva, a una demanda de sistema dada. Este análisis se puede llevar a cabo por medio del uso de un programa de análisis del sistema de potencia, tal como DlgSILENT *PowerFactory* y/o por medio del uso de una solución dedicada implementada con por ejemplo Mathworks Matlab. Por medio del uso de un programa de análisis de un sistema de potencia, la generación de potencia activa y potencia reactiva de todos los generadores se incrementó independientemente entre las fronteras de sus respectivos límites, capturando todas las combinaciones de inyección de potencia compleja y la magnitud y ángulo de voltaje calculados para cada nodo se registran para cada combinación. Estos resultados de nodo se pueden utilizar entonces, por ejemplo, en una secuencia de comandos de Matlab para volver a calcular una matriz Jacobina, que incluye cada flujo de potencia convergente.

De este modo, se calcula el voltaje y la fase  $V$  y  $\theta$  en cada nodo  $i$  de la red para cada combinación de potencia activa y reactiva generada por los generadores de red, en este caso A a D, a una demanda dada, que se obtiene de los nodos 12. En la forma de realización, esta demanda es una demanda de sistema mínima en cada uno de

los nodos 12. Estos valores de demanda se pueden establecer en  $P=Q=0$  en cada uno de los nodos 12; o pueden comprender unas estimaciones individuales para P y Q sobre la base de unos valores históricos y/o valores predichos.

- 5 En la forma de realización, el análisis de flujo de potencia capta las variables independientes asociadas con los cambios en las inyecciones de potencia del generador activo y reactivo que afectan el ángulo y a la magnitud de voltaje en una matriz Jacobina. La matriz Jacobina se forma tomando los coeficientes de ángulo y magnitud de voltaje y al escribir las ecuaciones (4) y (5) en notación matricial como sigue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_i}{\partial V_1} & \dots \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_1} & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_j \\ \Delta V_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

Esta matriz Jacobina encapsula las propiedades del sistema de potencia y refleja los cambios en el ángulo  $\theta$  y la magnitud de voltaje  $V$  que se producen en un nodo dado de red  $i$  debido a la inyección de potencia activa y reactiva en cualquier nodo de red al que está conectado un generador.

La información capturada en la matriz Jacobina son las sensibilidades de nodo de una solución de flujo de potencia convergente, aunque algunas de ellas pueden ser nulas, reflejando, por ejemplo, cuándo un generador podría no tener ningún efecto en una rama remota de la red.

En la Etapa 3 de la figura 2, se aplica una técnica de regresión no lineal a los resultados de la Etapa 2 para derivar una relación entre las mediciones locales de V, P y Q, en cada nodo de generador, y las condiciones del sistema remoto, ya sea para  $|I_{ij}|$  o  $Q_{ij}$  para cada rama de la red, donde las restricciones térmicas sean una preocupación. En la presente forma de realización, las tres expresiones empleadas para reducir al mínimo el flujo de potencia reactiva en líneas remotas se formulan de la siguiente manera:

- el flujo de corriente de línea o potencia reactiva (potencia reactiva que incluye un componente de corriente) en una línea remota que concierne a un generador local:

$$|I_{ij}| \text{ o } Q_{ij} = x_1 + x_2 V^2 + x_3 P^2 + x_4 V + x_5 P + x_6 PV \quad (8)$$

- la magnitud de voltaje local en la demanda de sistema mínima:

$$V^{MinD} = y_1 + y_2 Q^2 + y_3 P^2 + y_4 Q + y_5 P + y_6 PQ \quad (9)$$

- la sensibilidad de voltaje de potencia reactiva local:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = z_1 + z_2 V^2 + z_3 Q^2 + z_4 V + z_5 Q + z_6 QV \quad (10)$$

Se observará que cada una de las ecuaciones (8) a (10) comprende una expresión de segundo orden que relaciona dos mediciones locales de V, P y Q en el nodo de generador con un parámetro en la red calculado a partir del análisis de flujo de potencia, por ejemplo, corriente de línea  $|I_{ij}|$  o flujo de potencia reactiva  $Q_{ij}$  en una rama del sistema de potencia. Sin embargo, pueden utilizarse otras órdenes y un mayor número de variables independientes, por ejemplo, valores medidos para generadores adyacentes, pueden seleccionarse también para extender esta técnica. Igualmente, las expresiones no necesitan ser funciones de valor continuo y posiblemente podrían ser no lineales.

Se debería notar que cualquier generador de la red podría estar relacionado con su impacto sobre más de una rama y, en este caso, una pluralidad de vectores x, cada uno asociado con una rama respectiva ij, se calcularía para ese generador.

También debe apreciarse que si el estado de la línea se comunica al controlador, esto mejoraría la estimación para el flujo de rama calculado a partir de la ecuación (8).

Los vectores x, y y z en las ecuaciones (8) a (10) son los coeficientes determinados a partir del análisis de regresión. Las mediciones locales que se utilizan para la ecuación (8) son la potencia activa, P, y la magnitud de

voltaje,  $V$ , obtenida a partir de las mediciones en la ubicación del generador, ecuación (8). Para calcular el voltaje en un nodo de generador con una demanda de sistema mínima, se utilizan las mediciones de potencia activa,  $P$ , y potencia reactiva,  $Q$ , en la ecuación (9). Por último, para inferir la sensibilidad de voltaje de potencia reactiva local se utilizan el voltaje local medido,  $V$ , y la potencia reactiva,  $Q$ , del generador en la ecuación (10).

Formuladas de esta manera, las ecuaciones (8) a (10) proporcionan un procedimiento indirecto para determinar la solución óptima al problema de gestión de potencia reactiva para sistemas de distribución con generación distribuida, donde la magnitud de voltaje local  $V$  y la generación de potencia activa y reactiva  $P$  y  $Q$ , medidos en tiempo real, se utilizan para inferir las condiciones del sistema.

La figura 3 muestra una ilustración típica de dos restricciones en conflicto para un generador dado; siendo el voltaje local en un nodo  $i$  del generador y la corriente de línea de una rama remota del sistema afectado por el generador, a medida que varía la potencia activa y reactiva de la unidad. Por lo tanto, en el ejemplo de la figura 1, el nodo controlado podría ser el nodo 08, al que está conectado el generador D y la rama concerniente puede ser la rama de conexión de los nodos 01 y 07 y/o los nodos 07 y 08 (esta opción de rama concerniente es típicamente no arbitraria, como por ejemplo, no se consideraría que el generador D afecta a la corriente de línea en los nodos conectores de rama 02 y 03.)

Otras asignaciones dentro de la red de la figura 1 incluyen la rama de conexión de los nodos 01 y 02, que es la rama concerniente para el generador A, la rama 01-05 es la rama concerniente para el generador B y la rama 01-07 es la rama concerniente para el generador C.

La figura 3 destaca la opción disponible de la potencia reactiva en el espacio de solución disponible para el generador, si se asume que la potencia activa es fija, como indica la curva de potencia activa constante. El protocolo típico para un operador de sistema, si se detecta una infracción de restricción térmica en una línea como ésta, es decir, si la corriente de línea máxima para la rama remota concerniente es (va a ser) superada, ha sido solicitar una reducción de la potencia activa producida por el generador. Esta reducción de la generación de potencia tiene el efecto de mover la curva de potencia activa constante en la dirección de la flecha C. Sin embargo, como se apreciará, esto puede involucrar una reducción sustancial de la generación de potencia para llevar al operador del generador a un nivel, donde no se exceda la corriente de línea máxima.

La figura 4 muestra las etapas secuenciales implicadas en el control de un generador, de acuerdo con una forma de realización de la invención. La Etapa 1 incluye el análisis de modelado y regresión descrito en relación con la figura 2.

En la Etapa 2 de la figura 4, un controlador (no mostrado) con acceso a las ecuaciones (8) a (10) descritas anteriormente, toma mediciones locales en unos terminales de un generador: la magnitud del voltaje,  $V$ , la potencia activa,  $P$ , y la generación de potencia reactiva,  $Q$ . La medición puede comprender una monitorización continua o periódica, por ejemplo, a intervalos de 15 minutos o, de hecho, puede incluso ser impulsada por un evento, por ejemplo, como respuesta a cambios en la demanda o en la generación de potencia activa.

El controlador puede bien incluir un controlador situado centralmente en comunicación con cada generador y provisto con las ecuaciones para cada generador; o alternativamente los controladores independientes podrían operar en cada generador con el sólo conocimiento de las ecuaciones (8) a (10) para ese generador.

Basado en las mediciones locales de  $V$ ,  $P$  y  $Q$ , en la Etapa 3, el controlador calcula un voltaje objetivo  $V_{Set}^{New}$  que resultará en el flujo mínimo de corriente  $|I_{ij}|$  o el flujo de potencia reactiva  $Q_{ij}$  sobre una rama  $ij$ , en la red circundante.

En una forma de realización, se obtiene una solución óptima al determinar primero un punto de ajuste de voltaje local,  $V_{Set}^{Old}$ , a partir de la ecuación (8), que da como resultado el flujo mínimo de corriente  $|I_{ij}|$  y, por extensión, la negación calculada del flujo de potencia reactiva, en la rama objetiva. Tomando la ecuación (8), que describe el flujo de corriente de una rama en el sistema de potencia, el mínimo se encuentra sustituyendo el valor observado de las variables independientes medidas, por ejemplo, la generación de potencia activa  $P$ , y diferenciar con respecto a la variable de control, por ejemplo, el voltaje,  $V$ , en los terminales del generador. La expresión resultante del gradiente se ajusta a cero y se resuelve para la variable de control desconocida. Gráficamente, esto corresponde a la localización  $V_{Set}^{Old}$  mostrada en la figura 3.

Como alternativa, la ecuación (8) se puede utilizar para equiparar el flujo de potencia reactiva  $Q_{ij}$  de una línea remota. En este caso, como los valores no son absolutos, las raíces de la ecuación se encuentran sustituyendo las variables independientes medidas, por ejemplo, la potencia activa  $P$ . El valor de esta raíz revelará el punto de ajuste de la variable de control independiente, por ejemplo, la magnitud de voltaje  $V_{Set}^{Old}$ , que dará como resultado la anulación prevista del flujo de potencia reactiva en una rama  $ij$  del sistema de potencia.

Se debe recordar que estos procedimientos se basan en la suposición de que el análisis de flujo de potencia fuera de línea se realiza para una demanda de sistema mínima y, como tal, el punto de ajuste óptimo determinado para el voltaje,  $V_{Set}^{Old}$ , sólo es óptimo en el caso de la demanda mínima. Esta simplificación debe abordarse, ya que, en realidad, la demanda del sistema varía diariamente y de manera estacional, en un sistema de potencia.

La figura 5 ilustra el proceso de ajuste  $V_{Set}^{Old}$  calculado sobre la base de la ecuación (8) para determinar el voltaje objetivo  $V_{Set}^{New}$  y, a la vez, se justifica el aumento de la demanda del sistema.

Como se muestra, al utilizar el punto de ajuste de voltaje,  $V_{Set}^{Old}$ , fuera del tiempo de demanda mínima, donde el voltaje medido en el nodo es  $V_{Obs}$ , se requeriría la inyección de más potencia reactiva que la necesaria para una demanda mínima, donde el voltaje calculado a partir de la ecuación (9), es modelado como  $V^{MinD}$ . Esto se debe al hecho de que la magnitud de voltaje medida,  $V = V_{Obs}$ , se ve disminuida debido al aumento de la carga activa y reactiva dibujada por encima de la demanda mínima. El ajuste del voltaje objetivo  $V_{Set}^{Old}$  calculado por medio del uso de la ecuación (8) viene dado por:

$$V_{Set}^{New} = V_{Set}^{Old} - (V^{MinD} - V^{Obs}) \quad (11)$$

en la que  $V^{MinD}$  es la solución a la ecuación (9), el voltaje calculado basado en las mediciones observadas de P y Q del generador, a la demanda de sistema mínima.

Por lo tanto, tal como se muestra en la figura 5, el cambio requerido en el voltaje,  $\Delta V_{New}$ , se encuentra a partir de la diferencia entre el voltaje observado  $V = V_{Obs}$ , desde la Etapa 2, y el punto de ajuste del voltaje objetivo

$$V_{Set}^{New}.$$

En la presente forma de realización, el controlador comprueba que el punto de ajuste de voltaje  $V_{Set}^{New}$  requerido por la solución óptima esté dentro de los límites permitidos por el operador del sistema, tal como en la ecuación (12):

$$V^- \leq V^{Obs} + \Delta V_{New} \leq V^+ \quad (12)$$

En el caso de que la adición de  $\Delta V_{New}$  exceda los límites impuestos, el cambio de voltaje requerido es ajustado (típicamente reducido) en la cantidad necesaria para asegurar que se respetan los límites  $V^-$ ,  $V^+$ .

Se apreciará que cuando la ecuación (9) es modelada en base a una demanda dada, distinta de la demanda mínima, por ejemplo, una demanda máxima, entonces el ajuste de  $V_{Set}^{Old}$ , para llegar a  $V_{Set}^{New}$  debería ser alterado en consecuencia.

La Etapa 4 de la figura 4 calcula la sensibilidad de voltaje de potencia reactiva actualizada  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  de la ubicación del generador. Esta sensibilidad local se calcula sustituyendo los valores medidos V, Q de la Etapa 2 de la figura 4, por la Ecuación (10).

La Etapa 5 de la figura 4 determina el cambio en la generación de potencia reactiva requerido por el generador para obtener el punto de ajuste de voltaje requerido  $V_{Set}^{New}$  en sus terminales. Al utilizar la sensibilidad  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  encontrada en la Etapa 4, se utiliza el cambio requerido en el voltaje  $\Delta V_{New}$  determinado en la Etapa 3, ecuación (13), para obtener el cambio requerido de potencia reactiva  $\Delta Q$  necesaria en el lugar de medición (el nodo de generador):

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \Delta V_{New} \quad (13)$$

Para asegurar que el cambio requerido de potencia reactiva esté contenido en las limitaciones de potencia reactiva del generador, se cumple la siguiente restricción de desigualdad:

$$Q^- \leq Q^{Obs} + \Delta Q \leq Q^+ \quad (14)$$

- 5 Los límites superior e inferior de la ecuación (14) también pueden ajustarse a un límite impuesto por el operador del sistema si se requiere un factor de potencia o rango PQ. En el caso de que el cambio en la potencia reactiva infrinja los límites Q- y Q+, el cambio en la potencia reactiva se ajusta para llevar la salida de potencia reactiva realizada a ese límite. Esta instrucción de control es emitida al sistema de control de generador existente, Etapa 6.
- 10 También debe apreciarse que cuando un generador está relacionado con condiciones en más de una rama de red, las Etapas 3-5 de la figura 4 pueden repetirse, en función de cada vector x (utilizado en la ecuación (8)) para proporcionar soluciones alternativas para el cambio requerido de potencia reactiva  $\Delta Q$ . En una forma de realización, se seleccionaría el mayor cambio permitido calculado en la potencia reactiva.
- 15 Si el generador estuviera funcionando a su límite de potencia reactiva o límite de voltaje y las condiciones de funcionamiento sugirieran que la rama (o ramas) asignada(s) está(n) infringiendo su límite térmico, se podría dar una instrucción para reducir la generación de potencia activa a la cantidad requerida. Entonces sería útil formular las sensibilidades de voltaje de potencia activa al conjunto de medición local.
- 20 Al ajustar la potencia reactiva del generador a la cantidad requerida  $\Delta Q$ , se repite el procedimiento de la Etapa 2 - Etapa 5 y se puede seguir indefinidamente.
- Un resumen del procedimiento para obtener la señal de control  $\Delta Q$  a partir de estas entradas locales V, P y Q se proporciona en la figura 6. Así, en la Etapa 60, la ecuación (8) se utiliza para calcular un voltaje  $V_{Set}^{Old}$  óptimo. En
- 25 la Etapa 62, la ecuación (9) se utiliza para calcular el voltaje esperado, en un nodo de generador a demanda mínima  $V^{Mind}$ . En la Etapa 64, estos valores se combinan con el voltaje observado en el nodo  $V=VObs$  y se comprueban con los límites del sistema para producir un cambio de voltaje requerido  $\Delta V_{New}$  tal como se ilustra en la figura 5. Separadamente y en forma paralela o secuencial, se utiliza la ecuación (10) para determinar la
- 30 sensibilidad al voltaje  $\frac{\partial Q}{\partial V}$  en el nodo. En la Etapa 68, estos valores se combinan y se comprueban con los límites del sistema, para proporcionar un cambio requerido en la potencia reactiva  $\Delta Q$  y esto es comunicado por el controlador al generador.
- Haciendo referencia a la figura 3, el comando para cambiar la potencia reactiva tiene el efecto de cambiar nominalmente un punto operacional del generador a lo largo de la curva de potencia activa constante y, tal como
- 35 se apreciará, esto puede proporcionar una solución que permita a un generador adherirse a las restricciones térmicas, sin necesariamente reducir su generación de potencia activa. Así, por ejemplo, el procedimiento podría ayudar a encontrar el punto de funcionamiento T, en lugar de desplazar el punto de funcionamiento en la dirección de la flecha C.
- 40 El controlador puede ser implementado en un software, por ejemplo, en un dispositivo de controlador lógico programable (PLC) que está instalado en una subestación del generador e y se encuentra interconectado con un sistema de control del generador existente. Antes de entrar en funcionamiento, se establece(n) la(s) sección(es) remota(s) de la red que se asignará(n) al generador, y el controlador se programa con los vectores x, y y z de las
- 45 ecuaciones (8) a (10) respectivamente. El conjunto de medidas de entrada se obtiene a partir de los transformadores de instrumentos locales, que están fácilmente disponibles en la subestación del generador. Una vez en funcionamiento, el controlador emite un punto de ajuste de potencia reactiva actualizada para el generador, a intervalos dados. Por supuesto, es posible que el controlador se actualice con más o menos frecuencia o a intervalos irregulares.
- 50 En el caso de que se produzca un cambio en la topología de la red y/o se añada o se elimine un generador o carga de la red, se necesita remodelar la red, es decir, se debe repetir la figura 2 o la Etapa 1 de la figura 4 y el software del controlador actualizado en consecuencia para tener en cuenta las nuevas características de la red.
- 55 La ventaja en el funcionamiento de los generadores distribuidos de la manera descrita anteriormente es la garantía de que la potencia activa generada se añade de la manera más eficiente posible a la red circundante. Esto se refleja típicamente en una mejora en las pérdidas del sistema durante el transcurso del funcionamiento del procedimiento.
- 60 Esta invención es aplicable a cualquier generador, especialmente a un generador de potencia renovable, que tiene la capacidad de controlar la inyección y absorción de potencia reactiva. Las formas de realización de la invención pueden aplicarse a regiones de un sistema de transmisión con sensibilidades de alto voltaje de potencia reactiva y sensibilidades de ángulo de voltaje de potencia reactiva.



**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para controlar la distribución de energía a través de una red eléctrica que comprende las etapas siguientes:

5

a) modelar la red para:

relacionar un flujo de corriente ( $|I_{ij}|$ ,  $Q_{ij}$ ) en por lo menos una rama designada que conecta un par de nodos ( $ij$ ) de la red con una combinación de voltaje y potencia medidos, que se inyecta en un nodo  $i$  de la red a la cual está conectado un dispositivo, que inyecta y absorbe la potencia reactiva;

10

relacionar un voltaje esperado ( $V^{MinD}$ ) en el nodo  $i$  a un nivel dado de demanda de red con una combinación de potencia activa y reactiva, que se es inyectada por dicho dispositivo en dicho nodo  $i$ ;

15

relacionar una potencia reactiva a la sensibilidad del voltaje ( $\frac{\partial Q}{\partial V}$ ) en el nodo  $i$  con una combinación de potencia y voltaje que se inyecta en el nodo  $i$ ;

b) medir el voltaje ( $V$ ), una potencia reactiva ( $Q$ ) y una potencia activa ( $P$ ) inyectadas en el nodo  $i$ ;

20

c) calcular un voltaje de ajuste deseado ( $V_{Set}^{Old}$ ) en dicho nodo  $i$  que reduce al mínimo el flujo de corriente en dicha rama designada para un voltaje y potencia medidos inyectados en el nodo  $i$ ;

d) calcular dicho voltaje esperado sobre la base de dicha potencia activa y reactiva inyectada;

25

e) calcular un voltaje de ajuste deseado ajustado ( $V_{Set}^{New}$ ) sobre la base de dicho voltaje esperado;

f) determinar un ajuste requerido de dicho punto de ajuste de voltaje del dispositivo ( $\Delta V_{New}$ ) sobre la base de una diferencia entre dicho voltaje de ajuste deseado ajustado y dicho voltaje medido;

30

g) calcular una potencia reactiva a una sensibilidad de voltaje ( $\frac{\partial Q}{\partial V}$ ) sobre la base del voltaje y potencia medidos inyectados en el nodo  $i$ ;

h) calcular un cambio requerido ( $\Delta Q$ ) en dicho ajuste de la potencia reactiva del dispositivo en función de dicho voltaje de ajuste deseado ajustado y dicha potencia reactiva a la sensibilidad de voltaje;

35

i) comunicar dicho cambio requerido a dicho dispositivo.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha relación entre el flujo de corriente ( $|I_{ij}|$ ,  $Q_{ij}$ ) y el voltaje y la potencia medidos inyectados en el nodo  $i$  se define como:

40

$$|I_{ij}| \text{ o } Q_{ij} = x_1 + x_2 V^2 + x_3 P^2 + x_4 V + x_5 P + x_6 PV .$$

3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha relación entre el voltaje esperado ( $V^{MinD}$ ) en el nodo  $i$  a un nivel dado de demanda de red y una combinación de potencia activa y reactiva que es inyectada por dicho dispositivo se define como:

45

$$V^{MinD} = y_1 + y_2 Q^2 + y_3 P^2 + y_4 Q + y_5 P + y_6 PQ .$$

4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha relación entre la potencia reactiva a la sensibilidad de voltaje ( $\frac{\partial Q}{\partial V}$ ) y el voltaje y la potencia inyectada en el nodo  $i$  se define como:

50

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = z_1 + z_2 V^2 + z_3 Q^2 + z_4 V + z_5 Q + z_6 QV .$$

5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho nivel dado de demanda de red es una demanda de red mínima, y en el que dicha demanda de red mínima comprende o bien: una demanda cero; o una estimación

55

de demanda en cada uno de un número de nodos de dicha red.

6. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende llevar a cabo las etapas b) a i) de forma reiterativa, y en el que dichas etapas b) a i) se llevan a cabo de manera periódica.

7. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende llevar a cabo la etapa a) como respuesta a un cambio en la configuración de red.

8. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho ajuste del punto de ajuste del voltaje del dispositivo ( $\Delta V_{New}$ ) está limitado a límites permitidos.

9. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho cambio requerido ( $\Delta Q$ ) en dicho ajuste de potencia reactiva del dispositivo está limitado a límites permitidos.

10. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho modelado comprende:

llevar a cabo un análisis de flujo de potencia de dicha red para todos los posibles puntos de funcionamiento de potencia activa y reactiva de todos los dispositivos conectados a dicha red a un nivel dado de demanda del sistema; y

llevar a cabo un análisis de regresión de dichos resultados del análisis de flujo de potencia para determinar dichas relaciones.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que dichos resultados del análisis de flujo de potencia comprenden una matriz Jacobina de la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_i}{\partial V_1} & \dots \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_1} & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_j \\ \Delta V_j \end{bmatrix}$$

en la que:

$\theta$  comprende un ángulo de fasor de voltaje en un nodo  $i$ ;

$V$  comprende una magnitud de fasor de voltaje en un nodo  $i$ ;

$\frac{\partial P}{\partial V}$  comprende una sensibilidad de voltaje de potencia activa en un nodo  $i$ ;

$\frac{\partial Q}{\partial V}$  comprende una sensibilidad de voltaje de potencia reactiva en un nodo  $i$ ;

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$  comprende una sensibilidad de ángulo de voltaje de potencia activa en un nodo  $i$ , y

$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$  comprende una sensibilidad de ángulo de voltaje de potencia reactiva en un nodo  $i$ .

12. Procedimiento según la reivindicación 1 llevado a cabo o bien: localmente en un dispositivo independientemente de otros dispositivos en dicha red; o centralmente para todos los dispositivos de dicha red.

13. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho dispositivo es un generador de energía.

14. Controlador conectado operativamente con por lo menos un dispositivo que inyecta y absorbe la potencia reactiva en una red de distribución de electricidad, estando el controlador configurado para llevar a cabo las etapas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

15. Producto de programa informático, que comprende un medio legible por ordenador en el que se almacenan unas instrucciones ejecutables por ordenador y que cuando se ejecutan en un controlador en una red de distribución de electricidad están dispuestas para llevar a cabo las etapas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

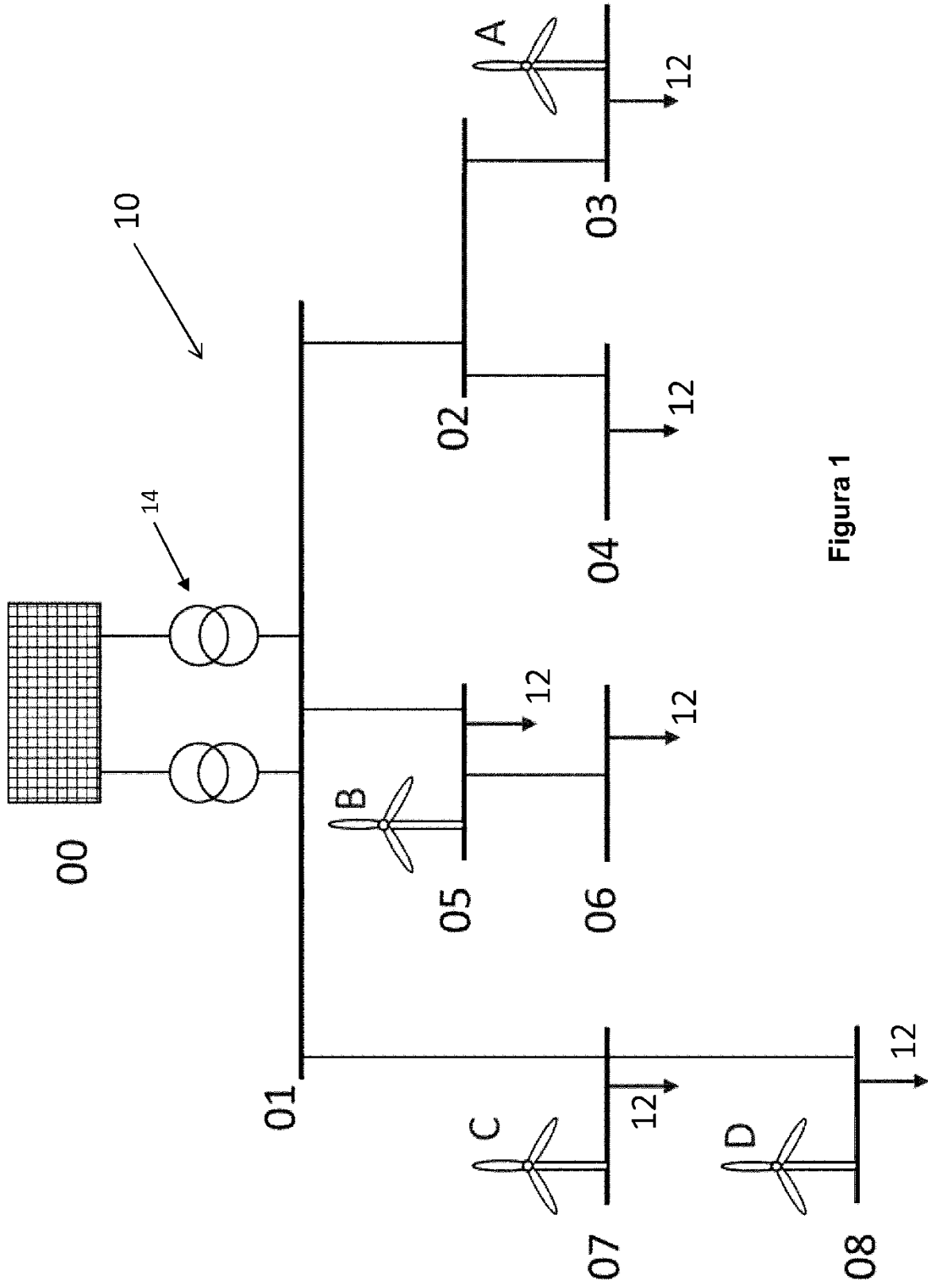


Figura 1

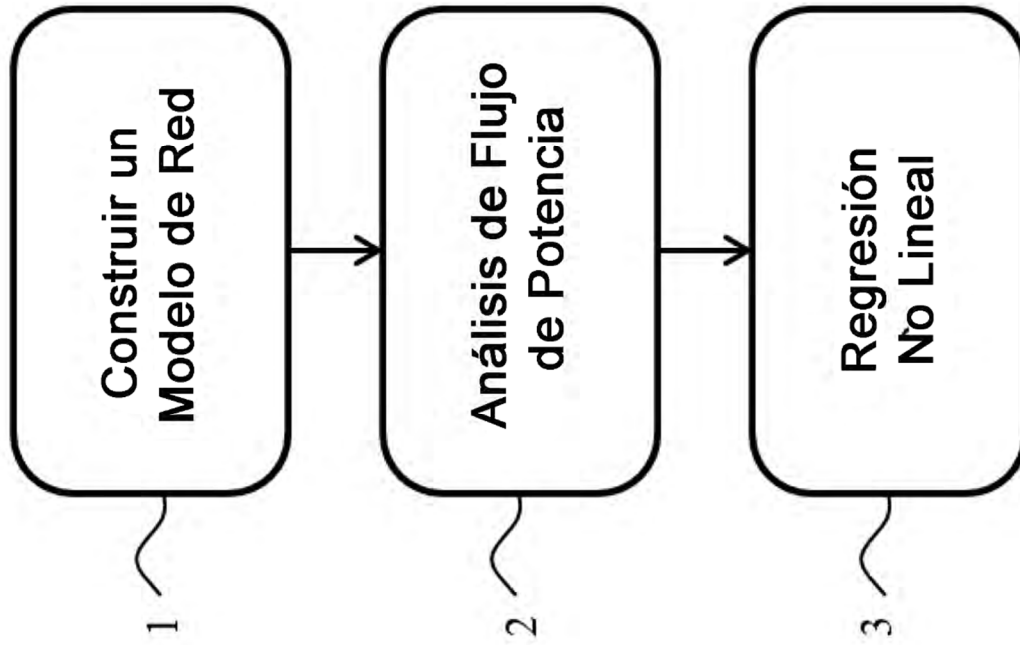


Figura 2

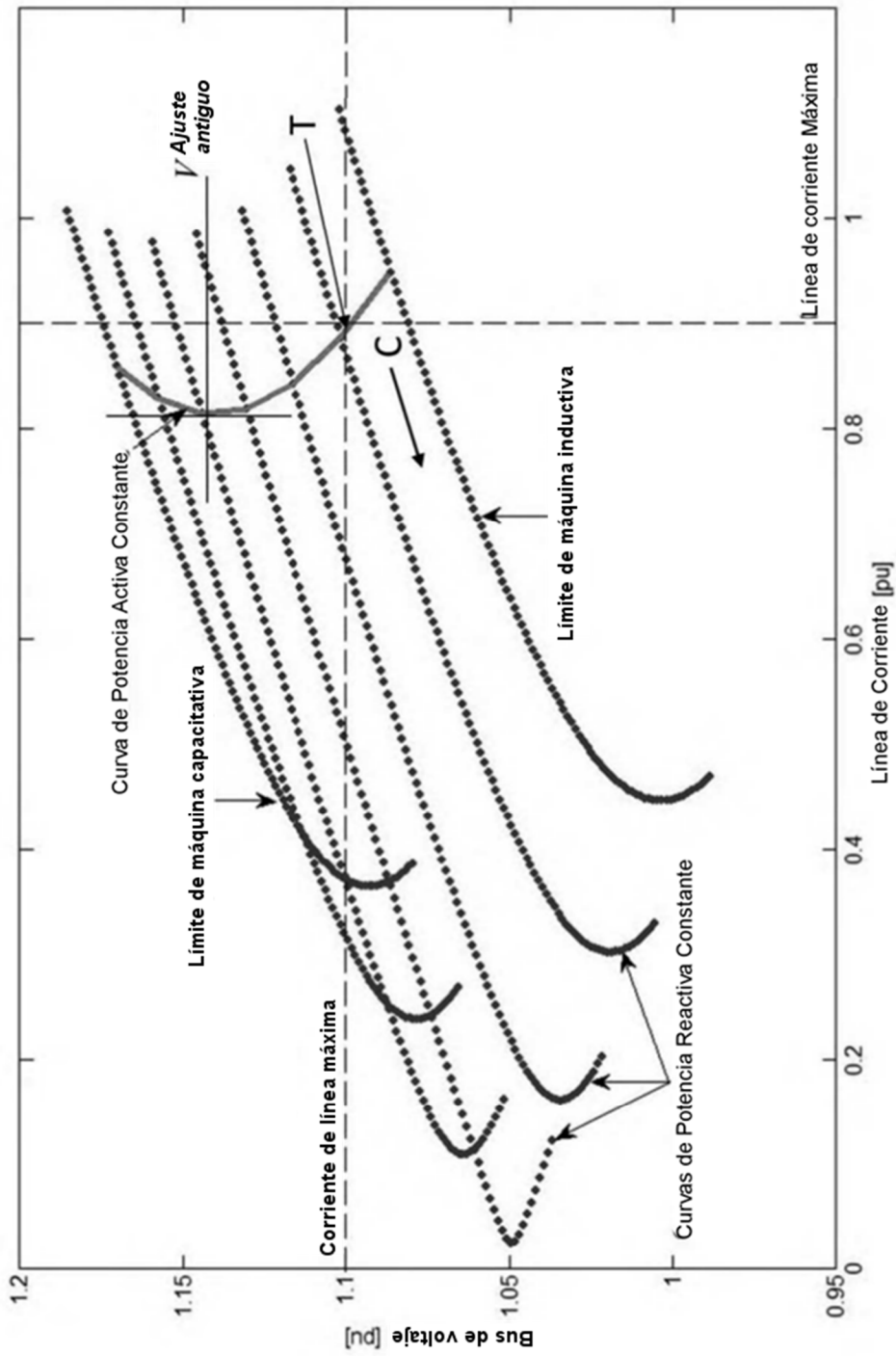


Figura 3

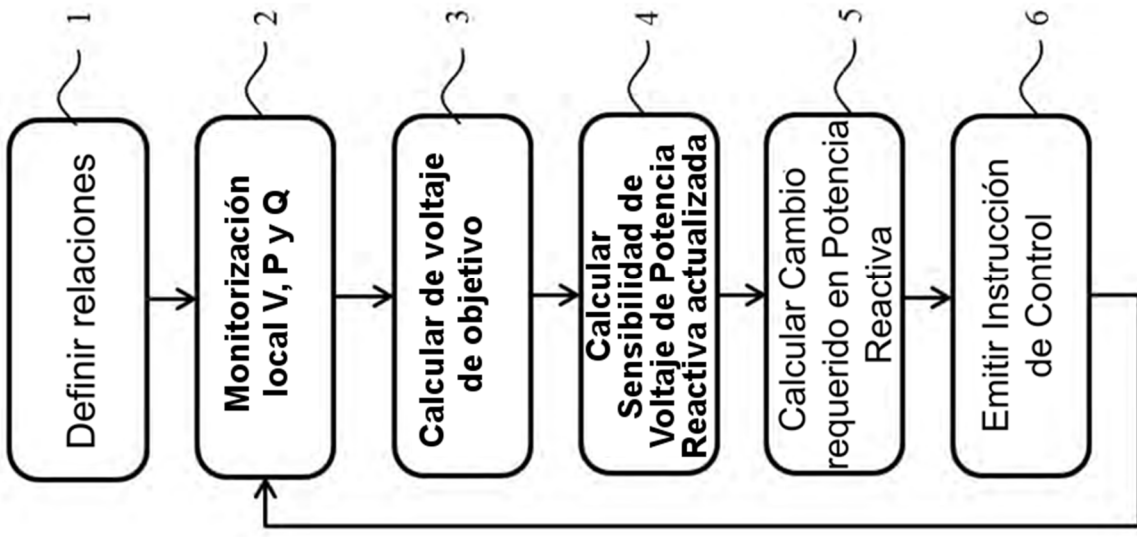


Figura 4

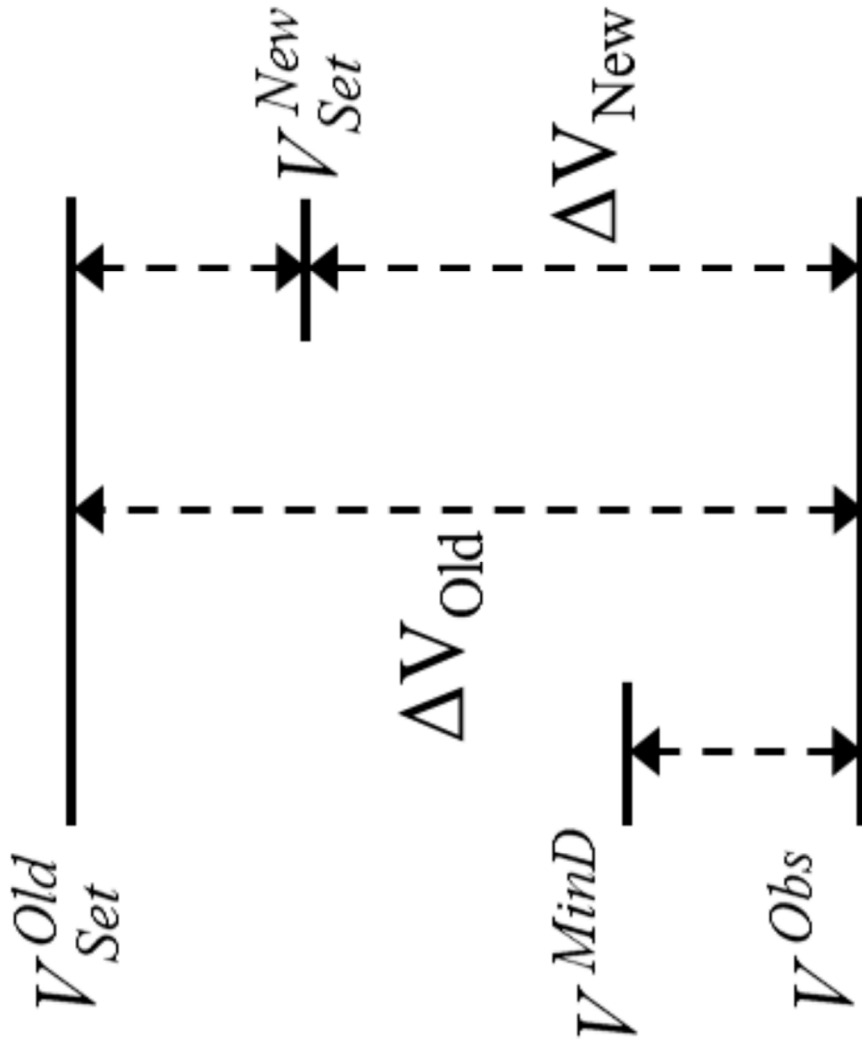


Figure 5

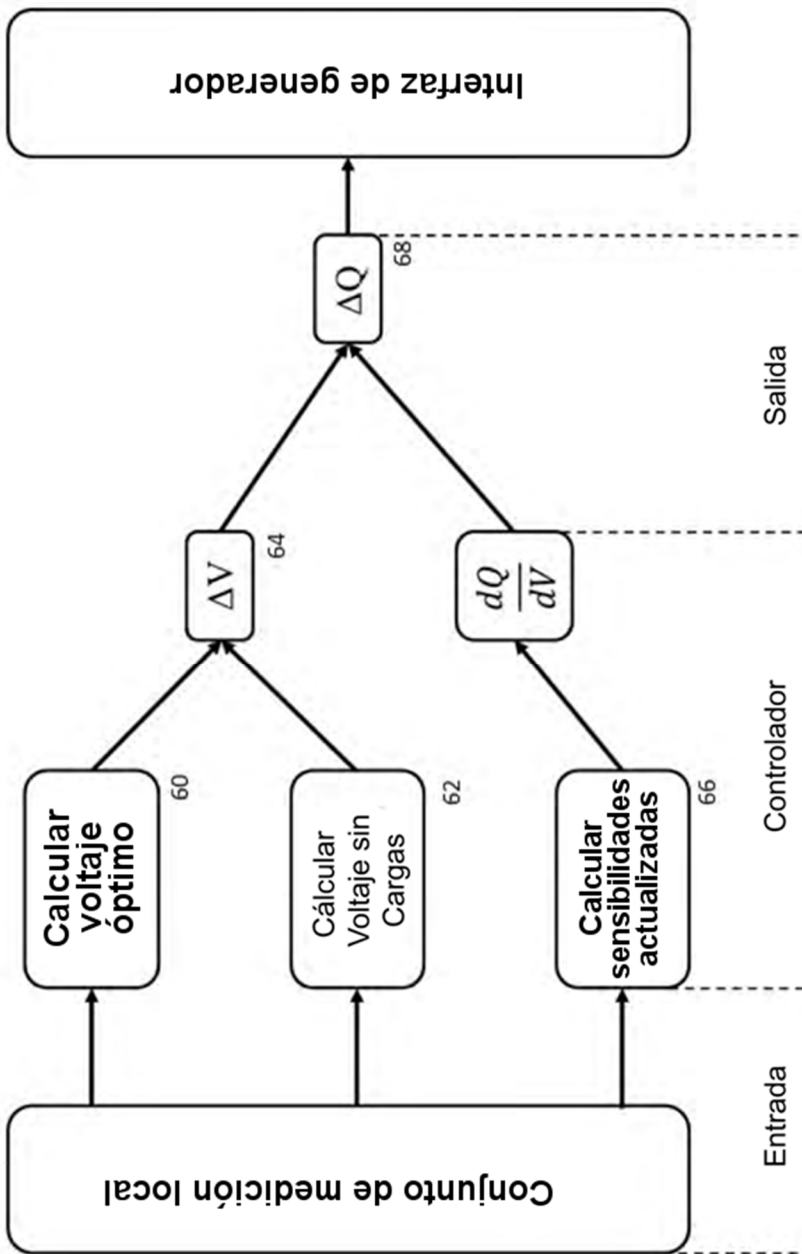


Figura 6