

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 681 045**

51 Int. Cl.:

**H02P 9/08** (2006.01)

**H02P 29/024** (2006.01)

**H02P 23/14** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **07.11.2012 PCT/US2012/063910**

87 Fecha y número de publicación internacional: **16.05.2013 WO13070736**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.11.2012 E 12847325 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.07.2018 EP 2798734**

54 Título: **Sistema y método para detectar fallos incipientes de generador**

30 Prioridad:  
**07.11.2011 US 201113290910**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**11.09.2018**

73 Titular/es:  
**BASLER ELECTRIC COMPANY (100.0%)**  
**Route 143 P.O. Box 269**  
**Highland, IL 62249, US**

72 Inventor/es:  
**KIM, KIYONG**

74 Agente/Representante:  
**VÁZQUEZ FERNÁNDEZ-VILLA, Concepción**

ES 2 681 045 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Sistema y método para detectar fallos incipientes de generador

**5 Campo técnico**

La presente divulgación se refiere a generadores de energía de corriente alterna y, más específicamente, a un sistema y un método para el manejo y el mantenimiento de un generador de energía.

**10 Antecedentes**

Un problema grave en la generación de energía eléctrica en relación con las redes eléctricas cada vez de mayor tamaño de los sistemas de servicios eléctricos es el de las averías de generador intempestivas y costosas en uno de los generadores dentro de la red eléctrica. Un generador de energía eléctrica recibe fuerza de rotación de motor primario que hace rotar una bobina de alambre en relación con un campo magnético o viceversa. En los generadores eléctricos, este campo magnético se genera usando electroimanes conocidos como bobinas de campo. La corriente eléctrica en estas bobinas de campo proporciona el campo magnético necesario para inducir una corriente eléctrica en la bobina de generador principal para producir la energía generada para su suministro a la red eléctrica.

Los operarios de generadores de voltamperio reactivo (VAR) deben desarrollar una planificación de tensión y reactiva y procedimientos y prácticas de funcionamiento para garantizar que disponen de recursos reactivos suficientes, tensiones y márgenes reactivos disponibles para suministrar energía de CA a la red eléctrica. Tal como se ha experimentado en el pasado con redes eléctricas, una avería de generador imprevista puede tener un efecto negativo para toda la red eléctrica y puede dar como resultado apagones programados. Aunque se han desarrollado normas por parte de organizaciones industriales tales como la North American Electric Reliability Corporation (NERC) para planificación y control de tensión y reactivo, tales normas sólo contemplan la planificación, el diseño y funcionamiento de un generador dentro de la red eléctrica y no abordan el mantenimiento preventivo o la previsión de fallas potenciales en el generador, tales como cortocircuitos entre espiras en el devanado de campo. Como tal, el inventor del presente documento ha identificado la necesidad de un sistema y un método que puedan detectar fallos o fallas incipientes de un generador para posibilitar que un operario planifique e implemente mantenimiento en el generador para impedir averías de generador imprevistas.

La publicación de solicitud de patente US2009198386 da a conocer un sistema de control de excitación de generador que usa una técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO) para estimar constantes temporales para un excitador y un generador en un sistema de excitación.

**Sumario de la invención**

La presente invención proporciona un método, un sistema y un software informático para detectar un fallo incipiente de un generador en un sistema de alimentación, que incluye las etapas de establecer uno o más parámetros de referencia de generador del generador para su uso como referencia inicial; medir uno o más valores de parámetro de funcionamiento del generador; usar el uno o más valores de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado del uno o más de los parámetros de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas; y determinar si los valores presentes estimados del uno o más de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable.

**Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 es un diagrama de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

La figura 2 es un diagrama de flujo de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

La figura 3 es un diagrama de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

La figura 4 es un diagrama de flujo de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

Las figuras 5-8 son capturas de pantalla de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

La figura 9 es un diagrama fasorial de un generador según una realización a modo de ejemplo.

La figura 10 es un diagrama de un sistema para estimar valores de parámetro de generador según una realización a modo de ejemplo.

**5 Descripción detallada de la realización preferida**

La siguiente descripción tiene una naturaleza simplemente a modo de ejemplo y no pretende limitar la presente divulgación ni las aplicaciones o los usos de la divulgación.

10 El presente sistema y el presente método pueden aplicarse a generadores de energía de CA dentro de una red eléctrica de CA. En la figura 1, se ilustra un modelo típico para un generador de energía de CA de este tipo y componentes del sistema de alimentación asociados. Tal como se muestra, el generador 12 recibe una entrada de fuerza de rotación desde un motor 14 primario que puede, por ejemplo, accionarse por turbina de vapor de agua, accionarse por turbina de gas, accionarse de manera hidrostática o accionarse por motor diésel. El  
 15 generador 12 recibe una tensión de campo desde un excitador 16 que alimenta bobinas de campo en el generador 12 a un nivel variable. La cantidad de tensión de campo proporcionada por el excitador 16 al generador 12 se determina mediante un regulador 18 de tensión automático (AVR). El AVR 18 determina la cantidad apropiada de tensión de campo a suministrar al generador 12 basándose en las necesidades operativas del sistema de alimentación. Un estabilizador 20 de sistema de alimentación (PSS) puede interaccionar con el  
 20 AVR 18 para estabilizar la energía generada por el generador 12. El AVR 18 y/o el PSS 20 monitorizan una red 22 eléctrica y las corrientes y tensiones entre bornes en las salidas del generador 12 para garantizar que el generador 12 esté funcionando tal como se desea. La red eléctrica 22 se modela representando los transformadores 24, las líneas 26 de transmisión, así como representando un carga 28 de factor de potencia y grandes cargas 30 de arranque de motor.

25 Tal como se muestra en la figura 2, lo siguiente describe una realización a modo de ejemplo de un método de detección de fallo incipiente de generador. Las etapas de la figura 2 se describen a continuación y con referencia a las demás figuras. En la descripción de los diversos diagramas de flujo, la explicación funcional de una etapa se marca con números de referencia entre corchetes angulares <nnn>.

30 Etapas 1: Recepción y almacenamiento de entradas de parámetro de referencia de generador <200>:

35 En la primera etapa <200> del procedimiento a modo de ejemplo consiste en la recepción y almacenamiento de valores de parámetro de referencia de generador. Los valores de parámetro de referencia de generador o bien se calculan o miden por el fabricante en el momento de la fabricación del generador o bien se determinan o miden de otro modo.

40 Estos valores de parámetro de referencia proporcionan una entrada inicial y una referencia para evaluar el rendimiento del generador e incluyen parámetros de diseño y parámetros de rendimiento y se denominan en el presente documento parámetros de referencia de diseño de generador. Algunos parámetros son fijos durante toda la vida del generador, tales como el número de devanados y polos, o pueden variar durante el funcionamiento del generador debido a la velocidad, temperatura o tensión de campo de funcionamiento del generador u otros factores tales como, por ejemplo, la resistencia del devanado de inducido  $R_a$ , que varía con la temperatura. Otros parámetros de fabricante no pueden medirse directamente en tiempo real durante el  
 45 funcionamiento del generador.

Ejemplos de parámetros de referencia de generador para los que pueden medirse o calcularse valores para un generador específico son:

50  $R_a$  = resistencia de devanado de inducido.

$R_{fd}$  = resistencia de devanado de campo

55  $X_l$  = reactancia de dispersión

$X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario

$X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario

60  $X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica

$X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica

$T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador

65  $T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador

La etapa de recepción y almacenamiento de entradas de parámetro de referencia de generador puede incluir una interfaz de usuario tal como una interfaz gráfica de usuario (GUI) para introducir tales valores y varianzas en el sistema.

5

Etapa 2: Medición de valores de parámetro de funcionamiento:

La siguiente etapa <202> consiste en la medición de valores de parámetro de funcionamiento durante el funcionamiento del generador. Los valores de parámetro de funcionamiento comprenden valores de rendimiento o de referencia de generador en estado dinámico y en estado estacionario que pueden medirse directamente que incluyen, pero no se limitan a, uno o más de las tensiones entre bornes por fase, las corrientes entre bornes por fase, la potencia total P y el ángulo de rotor interno. Tal como se conoce en la técnica, estas mediciones pueden muestrearse y registrarse a lo largo del tiempo.

10

En una realización, los parámetros de funcionamiento muestreados en un conjunto de parámetros de funcionamiento pueden incluir uno o más de:

15

$E_{fd}$  = tensión de campo

20

$I_{fd}$  = corriente de campo

$E_t$  = tensión entre bornes

25

$I_t$  = corriente entre bornes

$\phi$  = el ángulo de carga

$\delta_i$  = el ángulo de potencia (ángulo de rotor interno)

30

$V_{gen}$  = tensión de generador

$V_r$  = tensión de referencia

35

$P$  = potencia real del generador

$Q$  = potencia reactiva del generador

Si no puede medirse un ángulo de potencia  $\delta_i$  tal como cuando no está disponible un dispositivo de medición de ángulo de potencia, el ángulo de potencia  $\delta_i$  puede calcularse tal como se indica a continuación.

40

Estos valores de parámetro de funcionamiento se proporcionan durante pruebas de sistema o basándose en un funcionamiento periódico para determinar los valores de parámetro de funcionamiento del generador. Además, el sistema y el método tal como se describen en el presente documento pueden ser continuos durante el funcionamiento del generador en un modo de monitorización para medición en tiempo real de los parámetros de funcionamiento.

45

Etapa 3: Estimación de parámetros de rendimiento de generador:

Aunque anteriormente se recibieron valores de rendimiento que pueden medirse, otros aspectos de los parámetros de rendimiento de un generador no pueden medirse directamente mientras el generador está en funcionamiento, pero si se conocen, proporcionarán una idea sobre la probabilidad de fallo incipiente de ese generador. Para estimar los valores de los parámetros de rendimiento, la presente divulgación contempla la aplicación de uno o más modelos de generador. El sistema utiliza un modelo de generador seleccionado por el usuario y estima aquellos valores de parámetro dentro del modelo de generador seleccionado usando un sistema y un método de estimación de parámetro descritos a continuación. El sistema de estimación de parámetro incluye una interfaz de usuario tal como una interfaz gráfica de usuario (GUI) para proporcionar a un usuario la capacidad de inicializar el sistema y controlar un procedimiento de estimación de parámetro en tiempo real en línea para un generador dado. El sistema y método de estimación de parámetro tal como se describirán en el presente documento utilizan los valores de parámetro de funcionamiento muestreados medidos de las corrientes y tensiones de campo y de estator tanto para el estado estacionario como para modos dinámicos de funcionamiento para estimar parámetros de rendimiento de generador. Un conjunto a modo de ejemplo de los parámetros de rendimiento que pueden estimarse es el siguiente:

50

55

60

$X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario

65

$X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario

$X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica

$X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica

$T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador

$T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador

Tal como se usa en el presente documento, el apóstrofo indica el parámetro dinámico en comparación con el parámetro en estado estacionario.

Este conjunto a modo de ejemplo de parámetros de rendimiento estimados se denominarán a continuación en el presente documento los parámetros de rendimiento estimados. Tal como se describirá, cada uno de estos tendrá sus valores estimados y esos valores se compararán con un valor de parámetro de referencia y una varianza a partir de la etapa 1 anterior.

Los expertos en la técnica deben entender que el conjunto identificado de parámetros de rendimiento estimados es sólo un conjunto a modo de ejemplo y pueden incluirse parámetros de generador adicionales o de menos dentro del presente sistema y el presente método y encontrarse todavía dentro del alcance de la presente divulgación.

La estrategia de estimación de PSO

El método y sistema de detección de fallo incipiente de generador utiliza optimización por enjambre de partículas (PSO) para estimar los valores de los parámetros de rendimiento de generador en tiempo real basándose en los valores de parámetro de funcionamiento medidos reales y determinados valores de parámetro de referencia. Aunque los valores de parámetro estimado derivados de PSO se basan en mediciones en tiempo real, el método de PSO estima valores de parámetro para determinar cuándo el valor está fuera de los parámetros aceptables.

Para los sistemas de generación de energía, los datos disponibles para los generadores síncronos son las tensiones y corrientes de fase de estator en los bornes de la máquina, y la corriente y tensión de campo. Por tanto, estos parámetros se usan para formular el problema de estimación de parámetro.

La tensión de campo de generador, las corrientes y las tensiones entre bornes de generador trifásicas se monitorizan de manera continuada. Si el generador está funcionando en el estado estacionario, se estiman las reactancias síncronas de generador ( $X_d$  y  $X_q$ ) basándose en la condición de estado estacionario.

Cuando se detecta un evento que va a provocar un cambio considerable en la tensión de campo de generador, sus respuestas dinámicas se registran durante cinco segundos. Las respuestas registradas se utilizan para estimar los parámetros dinámicos de generador ( $X'_d$ ,  $X'_q$ ,  $T'_{do}$ ,  $T'_{qo}$ ) tal como se muestra en la figura 3.

Las tensiones de campo y las corrientes entre bornes de generador registradas se aplican a la simulación en el dominio temporal para calcular las tensiones de generador. Para el modelo de generador para la simulación, se ignoran la derivada de concatenaciones de flujo de eje d y eje q. Por tanto, se usa un modelo de generador biaxial representado en las ecuaciones a continuación que incluye las características fundamentales de respuestas de tensión, pero se supone que se han eliminado todos los estados transitorios de estator/red. Esta suposición es correcta dado que la tasa de cambio de la corriente y la tensión entre bornes de la máquina es insignificante en condiciones de pequeña perturbación.

$$T'_{qo} \frac{E'_d(t)}{dt} = -E'_d(t) + i_q(t)(X_q - X'_q) \quad (1)$$

$$T'_{do} \frac{E'_q(t)}{dt} = -E'_q(t) - i_d(t)(X_d - X'_d) + E_{fd}(t) \quad (2)$$

$$e_d(k) = E'_d(k) - R_a i_d(k) + X_q i_q(k) \quad (3)$$

$$e_q(k) = E'_q(k) - R_a i_q(k) - X_d i_d(k) \quad (4)$$

Los resultados de simulación obtenidos usando este modelo de generador se comparan con los datos registrados. Si los resultados no coinciden, los parámetros de generador se ajustan mediante la técnica de PSO para proporcionar la coincidencia óptima. La técnica está inspirada por el comportamiento social de las bandadas

de pájaros o de los bancos de peces. En la PSO, las partículas potenciales (soluciones) vuelan a través del espacio del problema siguiendo las partículas óptimas actuales. Cada partícula sigue la pista de sus coordenadas en el espacio del problema y comunica la solución óptima hallada a las otras partículas. Esta comunicación permite una decisión inteligente en un intento siguiente de hallar la mejor solución posible (un conjunto de parámetros de generador).

La PSO se inicializa con un grupo de cinco partículas y luego busca resultados óptimos a través del espacio del problema siguiendo las partículas óptimas halladas hasta ese punto. El espacio de soluciones del problema se define como los parámetros de generador ( $X_d, X_q, X'_d, X'_q, T'_{do}, T'_{qo}$ ). Con la presente partícula y la tensión de campo de generador registrada, se calcula la respuesta del modelo ( $y_k$ ) para  $k= 1, \dots, N$ . La respuesta calculada se compara con la respuesta real del sistema. Supóngase que un valor muestreado de la respuesta real del sistema en la etapa  $k$  es  $z_k$ . La función de idoneidad para elegir la partícula óptima es la suma del cuadrado de las diferencias entre  $z_k$  e  $y_k$ ,  $k= 1, \dots, N$  de la siguiente manera:

$$J = \sum_{k=1}^N (z_k - y_k)^2 \quad (5)$$

Después de hallar los dos valores óptimos, la partícula actualiza su velocidad y posiciones con las siguientes ecuaciones:

$$v_{k+1} = \alpha v_k + \beta_1 rand_1(x_k^{propio} - x_k) + \beta_2 rand_2(x_k^{global} - x_k) \quad (6)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k \quad (7)$$

donde  $v_k$  es la velocidad de partícula,  $x_k$  es la partícula actual (solución),  $x_k^{propio}$  y  $x_k^{global}$  se definen como valor óptimo para una partícula y valor óptimo entre todas las partículas,  $\alpha$  es un peso de inercia.  $rand_1$  y  $rand_2$  son números aleatorios entre 0 y 1.  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son factores de aprendizaje. En este documento, la técnica de PSO descrita anteriormente se modifica para alcanzar una búsqueda mejor para el presente problema, tal como se describe a continuación.

### Estimación de parámetros de generador

El modelo de máquina en la sección anterior es el modelo convencional de ejes d y q con un devanado amortiguador en cada uno de los ejes. Por tanto, las corrientes y las tensiones de generador en los ejes d y q se calculan mediante las ecuaciones a continuación usando corrientes y tensiones entre bornes de generador trifásicas muestreadas.

$$e_d = E_t \text{ sen } \delta_i \quad (7)$$

$$e_q = E_t \text{ cos } \delta_i \quad (8)$$

$$i_d = \frac{P \text{ sen } \delta_i + Q \text{ cos } \delta_i}{E_t} \quad (9)$$

$$i_q = \frac{P \text{ cos } \delta_i - Q \text{ sen } \delta_i}{E_t} \quad (10)$$

donde  $\delta_i, E_t, I_t, P$  y  $Q$  son el ángulo de rotor interno de generador (ángulo de potencia), la tensión entre bornes, la corriente, la potencia activa y la potencia reactiva, respectivamente. Véase la figura 9.

Las mediciones necesarias para el procedimiento de estimación son corrientes y tensiones de CA trifásicas, tensión de campo y ángulo de rotor. Se supone que el ángulo de potencia va a obtenerse a partir de un dispositivo de medición de ángulo de potencia, aunque también puede calcularse un valor estimado, tal como se describe a continuación.

Ángulo de potencia,  $\delta_i$

El valor en estado estacionario del ángulo de potencia,  $\delta_i$ , se calcula usando la siguiente relación:

$$\delta_i = \tan^{-1} \left( \frac{X_d I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right) \quad (11)$$

5 Usando los valores conocidos de  $E_t$ ,  $I_t$  y  $\phi_i$  y los valores suministrados por el fabricante de  $R_a$ ,  $X_q$ , el ángulo de potencia se computa y se compara con el valor en estado estacionario medido. Un desfase constante notificado entre el valor calculado y medido de  $\delta_i$  se compensa calibrándolo a cero con potencia activa medida nula.

10 Parámetros en estado estacionario ( $X_d$  y  $X_q$ )

En la condición de funcionamiento en estado estacionario, las reactancias síncronas de generador ( $X_d$  y  $X_q$ ) se estiman basándose en las siguientes ecuaciones:

$$X_d = \frac{E_t}{I_t} \quad (12)$$

$$X_q = \frac{E_t K_{sd} - \phi}{I_t} \quad (13)$$

donde  $K_{sd}$  es el coeficiente de saturación de generador en la condición de estado estacionario.

20 Coeficiente de saturación,  $K_{sd}$

Los parámetros de una máquina síncrona varían en condiciones de carga diferentes a causa de cambios de la temperatura interna de la máquina, saturación magnética, envejecimiento y acoplamiento entre la máquina y sistemas externos.

Se realizan varias suposiciones para representar la saturación en estudios de estabilidad transitoria dado que un tratamiento riguroso del rendimiento de máquina síncrona que incluye saturación es una práctica inútil. Un método práctico para afrontar efectos de saturación basándose en razonamiento semiheurístico, y aproximaciones elegidas cuidadosamente se facilita en [9].

El efecto de saturación se caracteriza mediante las funciones de saturación. Esta variación provoca el cambio en la tensión de campo. Con el fin de manejar los efectos de saturación basándose en la simplicidad del método de estimación, la tensión de campo se multiplica por el coeficiente de saturación.

Basándose en las corrientes y tensiones entre bornes trifásicas, se calculan  $P_t$  y  $Q_t$ , y podemos hallar

$$I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{E_t} \quad (14)$$

$$\Psi_t = |E_t + (R_a + jX_l)I_t| \quad (15)$$

$$\hat{K}_{sd} = \frac{\Psi_t}{\Psi_t + A_{sat} e^{B_{sat}(\Psi_t - \Psi_{t1})}} \quad (16)$$

donde  $R_a$  y  $X_l$  son la resistencia de estator y reactancia de dispersión de generador, respectivamente.  $A_{sat}$ ,  $B_{sat}$  y  $\Psi_{t1}$  son coeficientes de saturación de generador.

45 Parámetros en estado dinámico ( $X'_d$ ,  $X'_q$ ,  $T'_{do}$ ,  $T'_{qo}$ )

Los parámetros dinámicos se identifican usando la técnica de PSO comparando las tensiones medidas reales con las tensiones de generador calculadas. Se realiza una simulación en el dominio temporal para calcular las tensiones de generador cuando se aplican las tensiones de campo de generador registradas.

Los parámetros de generador para el modelo de simulación se ajustan mediante la técnica de PSO para proporcionar la coincidencia óptima. El conjunto de parámetros de generador se expresan como una posición de

partícula,  $(\hat{T}'_{do}, \hat{X}'_q, \hat{X}'_d, \hat{T}'_{qo}, \hat{X}_q, \hat{X}_d)$ . El modelo de generador con cada posición de partícula se usa para calcular las tensiones entre bornes. Para la simulación de la respuesta de generador a la tensión de campo aplicada con corrientes de generador medidas, se utiliza el método de integración de Euler para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias de modelos dinámicos. El método de Euler se utiliza solamente por simplicidad dado que el error de propagación es insignificante con un tamaño de escalón de integración de 1 ms.

$$E'_d(k+1) = E'_d(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}'_{qo}} \left( -E'_d(k) + i_q(k) (\hat{X}_q - \hat{X}'_q) \right) \quad (17)$$

$$E'_q(k+1) = E'_q(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}'_{do}} \left( -E'_q(k) - i_d(k) (\hat{X}_d - \hat{X}'_d) + \hat{K}_{sd} E_{fd}(k) \right) \quad (18)$$

$$e_d(k) = E'_d(k) - \hat{R}_d i_d(k) + \hat{X}_q i_q(k) \quad (19)$$

$$e_q(k) = E'_q(k) - \hat{R}_q i_q(k) - \hat{X}_d i_d(k) \quad (20)$$

donde  $\Delta t$  es el tamaño de escalón de integración y  $K_{sd}$  es el coeficiente de saturación de generador calculado en una condición desencadenada previamente. El valor de fabricante o medido dado se usa para la resistencia de estator  $R_a$ . El cambio de resistencia de estator a una temperatura de funcionamiento especificada puede calcularse también según la técnica anterior.

Los valores iniciales para las ecuaciones dinámicas,  $E'_d(0)$  y  $E'_q(0)$ , se calculan basándose en los valores muestreados en condiciones desencadenadas previamente usando las siguientes ecuaciones:

$$E'_d(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_d(k) + R_a i_d(k) - \hat{X}_q i_q(k) \quad (21)$$

$$E'_q(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_q(k) + R_a i_q(k) + \hat{X}_d i_d(k) \quad (22)$$

Los valores en los ejes d y q de generador simulados se comparan con los valores medidos,  $e_{d\_m}(k)$  y  $e_{q\_m}(k)$ , usando la función de idoneidad

$$J = \sum_{k=1}^N \left[ (e_{d\_m}(k) - e_d(k))^2 + (e_{q\_m}(k) - e_q(k))^2 \right] \quad (23)$$

Después de hallar los dos valores óptimos (valor óptimo global y valor propio óptimo), la partícula actualiza su velocidad y posiciones con las siguientes ecuaciones:

$$v_{k+1} = \alpha v_k + \beta_1 rand(x_k^{propio} - x_k) + \beta_2 rand(x_k^{global} - x_k) \quad (24)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k \quad (25)$$

donde  $v_k$  es la velocidad de partícula,  $x_k$  es la partícula actual (solución),  $x_k^{propio}$  y  $x_k^{global}$  se definen como valor óptimo para una partícula y valor óptimo entre todas las partículas. El peso de inercia,  $\alpha$ , es de 0,9 y los factores de aprendizaje,  $\beta_1$  y  $\beta_2$ , son de 0,1. No se multiplica ningún número aleatorio en la función anterior cuando los valores en los ejes d y q de generador simulados se comparan con los valores medidos usando la función de idoneidad. En su lugar, un nuevo conjunto de partículas se generan después de 50 iteraciones de la siguiente manera:

$$\hat{X} = rand() \cdot X_{nominal} \quad (26)$$

El límite de la superficie de búsqueda para cada partícula se fija con las siguientes reglas:

$$0,2 \cdot X_{nominal} \leq X_E \leq 1,2 \cdot X_{nominal} \quad (27)$$

Haciendo referencia a la figura 4, el procedimiento computacional de la técnica de PSO propuesta se resume de la siguiente manera:

- 5 etapa 0 <701>: inicializar los índices de iteración,  $NOI = 0$ ,  $J = 0$
- etapa 1 <702>: inicializar cada posición de partícula usando la ecuación (26).
- 10 etapa 2 <704>: calcular los valores iniciales para las ecuaciones dinámicas,  $E'_d(0)$  y  $E'_q(0)$ , para los modelos de simulación usando las ecuaciones (21) y (22)
- etapa 3 <706>: calcular la respuesta del modelo con una posición de partícula seleccionada,  $e_d(k)$  y  $e_q(k)$ ,  $k= 1, \dots, N$ , aplicando las tensiones de campo medidas a las ecuaciones (17)-(20).
- 15 etapa 4 <708>: calcular la función de idoneidad, ecuación (23), para comprobar la partícula óptima basándose en las respuestas de modelo obtenidas en la etapa 3 y las respuestas registradas. Si es mejor, actualizar la partícula óptima.
- 20 etapa 5 <710>: hasta que se calculen todas las partículas en la etapa <710>, incrementar un contador de partícula <711> y repetir las etapas <704>, <706> y <708> para cada partícula.
- etapa 6 <712>: actualizar la nueva posición y velocidad de partícula usando las ecuaciones (24) y (26).
- 25 etapa 7 <714>: a continuación, en el bloque de decisión <714>, determinar si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones. Si no se ha alcanzado el número máximo de iteraciones en la etapa <716>, incrementar los contadores de iteración ( $NOI$  y  $J$ ) y avanzar a la etapa <717>. Si se alcanza, detener la estimación adicional del valor de parámetro.
- 30 etapa 8 <717> si el índice  $J$  es 50, avanzar a la etapa <702>. Si no, avanzar a la etapa <704>.
- Al final del procedimiento iterativo, el valor óptimo global contendrá la estimación más próxima del valor de parámetro.

35 Etapa 4 <206>: Comparar valores estimados con valores de referencia y varianzas recibidos y almacenados

Volviendo a la figura 2, después de la estimación de parámetros de rendimiento de generador en estado estacionario o estado dinámico, el parámetro estimado se compara con los valores de referencia y varianzas recibidos y almacenados de la etapa 1 <200>.

40 Etapa 5 <208>: Determinar si se establece una alarma

Si en la etapa 4 <206> se determina que un parámetro de rendimiento en estado estacionario o dinámico supera un valor esperado en una determinada cantidad o supera una varianza proporcionada con respecto al valor esperado, una alarma se presenta (etapa <210>) a un operario de que un valor de rendimiento de generador está fuera del valor o intervalo esperado. Si todos los parámetros se encuentran dentro del intervalo esperado, la comparación de parámetro de generador y el procedimiento de estimación vuelve a desencadenarse inmediatamente o vuelve a desencadenarse en un momento posterior basándose en condiciones predefinidas.

50 Implementación del procedimiento en un entorno computacional

La presente invención puede implementarse conjuntamente con un generador real o en un programa de simulación en tiempo real para simular un sistema de generación de energía con el fin de someter a prueba la capacidad del presente sistema para estimar con éxito parámetros de generación. Lo más preferiblemente, la presente invención se implementa en un programa de aplicación basado en MICROSOFT WINDOWS que funciona en un sistema informático capaz de hacer funcionar el entorno de WINDOWS con la presente invención teniendo su propia interfaz gráfica de usuario (GUI).

60 Para someter a prueba, se proporciona un programa de simulación en tiempo real para simular un sistema de generación de energía rudimentario conectado a un sistema de alimentación grande con condiciones equilibradas y se representa dentro de la aplicación (figura 5). Tal como se observa en la figura 5, el modelo de sistema de alimentación de la figura 1 se presenta dentro de la interfaz y los elementos del modelo pueden seleccionarse para definir las características del elemento dentro del modelo a través de la interfaz de usuario (por ejemplo, la ventana de parámetro de generador de la figura 6).

65 El procedimiento de medición de las respuestas de máquina se extrae desde el programa de simulación en tiempo real. Midiendo las cantidades de tensión de generador, corriente, potencia y ángulo de rotor interno

pueden obtenerse las corrientes y tensiones entre bornes en los ejes d y q,  $e_d$ ,  $e_q$ ,  $i_d$  e  $i_q$  usando las ecuaciones (7)-(10). El ruido y error de sesgo se añaden a las cantidades medidas para comprobar el rendimiento de estimación del método propuesto.

5 Aunque esté llevándose a cabo la simulación, se permite que cambien los parámetros de modelo de sistema en tiempo real, o bien automáticamente a través de un secuencia de comandos aleatoria o una secuencia de comandos sucesiva o bien a través de entradas de usuario que cambian manualmente una de las cantidades medidas o características del sistema a través de una interfaz tal como la de la figura 6 (que muestra el cambio de los parámetros de generador). De manera similar, puede usarse la interfaz de la figura 5 para cambiar otros  
10 elementos de sistema, por ejemplo, para modelar un cambio de carga de factor de potencia dentro del sistema. En un ejemplo, se implementa un modelo de generador con dos devanados amortiguadores en el programa de simulación en tiempo real a través de la interfaz de la figura 6. Entonces, la ventana de diálogo de parámetro de generador de la figura 6 aparecerá haciendo clic en el bloque de generador de la figura 5. La aplicación de GUI también está diseñada para controlar el estado abierto/cerrado de disyuntor haciendo clic con el ratón en la posición apropiada en la figura 5. Por tanto, el rendimiento de AVR se evalúa para diversos generadores y configuraciones de sistema como aplicación/rechazo de carga, problemas de arranque de motor y otros sucesos de sistema de alimentación.

20 En una realización preferida, se ha diseñado una pantalla de monitorización para seis estados de sistema,  $V_{gen}$ ,  $E_{fd}$ ,  $I_{fd}$ ,  $V_r$ ,  $P_{gen}$  y  $Q_{gen}$ . Tal como se muestra en la figura 7, se seleccionan seis estados de sistema para monitorizar respuestas de sistema y pueden detenerse para análisis presionando los botones de orden de iniciar monitor y detener monitor dentro de la figura 7. Se visualizan gráficos que presentan los parámetros a lo largo del tiempo y pueden controlarse las características del gráfico seleccionando el número de gráfico, determinando el parámetro que se mostrará en ese número de gráfico, seleccionando las unidades mínima y máxima para el eje Y y manipulando la escala para la escala temporal, todo dentro de la presentación visual de la figura 7. Por tanto, pueden analizarse fácilmente las respuestas de sistema debido a una alteración. La figura 7 muestra la pantalla de monitorización con el ejemplo de una aplicación y rechazo de carga cuando se cierran y se abren el disyuntor de generador y los disyuntores de carga.

30 Cuando se selecciona un modo de desencadenamiento, la tensión de campo de generador se monitoriza de manera continuada para detectar cualquier cambio significativo para la estimación de los parámetros de generador. Se deshabilita la estimación en línea si la potencia de generador es menor del 10%. Para un funcionamiento normal sin ningún cambio considerable en el funcionamiento del sistema, se estiman los parámetros de estado estacionario ( $X_d$  y  $X_q$ ). En la realización preferida, si se detecta un cambio repentino en la tensión de campo, el programa recopila respuestas dinámicas de generador, tensión de campo, posición de rotor, tensiones y corrientes durante 5 segundos. Los valores desencadenados previamente se recopilan también para calcular las condiciones iniciales para la estimación. Esos valores muestreados se usan para estimar los parámetros de generador. Si se detecta cualquier cambio significativo en los parámetros de generador, sus resultados se anuncian al operario. La figura 8 muestra perfiles de estimación en tiempo real típicos cuando se detecta una alteración de sistema.  
40

Las etapas de estimación de parámetro se implementan en el programa de la presente realización tal como se muestra en la figura 8. La interfaz de la figura 8 muestra la estimación de parámetro en línea para una máquina síncrona dada basándose en mediciones de corrientes y tensiones de campo y de estator. Se ha diseñado para seleccionar modos de estimación y monitorizar los valores estimados de seis parámetros de generador en tiempo real. Pueden seleccionarse tres modos desde esta pantalla, modo de respuesta de escalón, modo de desencadenamiento de evento y modo de prueba para someter a prueba la identificación de parámetros de generador en respuesta a sucesos de sistema simulados. El modo de respuesta de escalón se usa para estimar los parámetros de generador mediante un cambio de escalón forzado en el punto de ajuste de tensión de generador. Si se abre el disyuntor de generador, se estima la constante temporal de circuito abierto de generador ( $T'_{do}$ ). Si se conecta al sistema, se estiman seis parámetros, ( $X_d$ ,  $X_q$ ,  $X'_d$ ,  $X'_q$ ,  $T'_{do}$ ,  $T'_{qo}$ ) usando el método propuesto. El modo de prueba se selecciona si se requieren más iteraciones de estimación. Es decir, se realiza una estimación de parámetro basándose en los valores registrados anteriores.  
50

55 Además del gráfico, los valores de parámetro estimados a lo largo del tiempo, la interfaz de la figura 8 (al igual que la interfaz de la figura 7) permite que un usuario altere la escala x y la escala y de los gráficos de parámetro, presenta un estado de simulación actual, permite la manipulación de la configuración del método de estimación, tal como escalón de tensión (%), cambio en la salida (%), tiempo de muestreo (segundos), número de muestras tomadas y tolerancia (%). Adicionalmente, se presentan los presentes valores estimados de parámetros temporales adyacentes a los valores de parámetro de generador registrados (nominales) y se proporcionan indicadores visuales de parámetros que superan los límites aceptables. Los parámetros estimados se presentan y se visualizan de manera continuada con los parámetros de generador dados para detectar fallos incipientes. Si un parámetro está fuera del límite admisible, el valor se presenta en color rojo en la pantalla de parámetro de estimación tal como se muestra en la figura 8 en 800.  
60

65

Entorno operativo informático

Haciendo referencia a la figura 10, un entorno operativo para una realización ilustrada de un sistema y/o método para detectar un fallo incipiente en un generador tal como se describe en el presente documento es un sistema 1000 informático con un ordenador 1002 que comprende al menos una unidad 1004 de procesamiento central (CPU) de alta velocidad, conjuntamente con un sistema 1006 de memoria interconectado con al menos una estructura 1008 de bus, un dispositivo 1010 de entrada y un dispositivo 1012 de salida. Estos elementos están interconectados por al menos una estructura 1008 de bus.

Tal como se abordó anteriormente, los dispositivos de entrada y de salida pueden incluir una interfaz de comunicación que incluye una interfaz gráfica de usuario. Cualquiera o todos los componentes informáticos de la interfaz de red y métodos y sistemas de comunicaciones pueden ser cualquier dispositivo informático incluyendo, pero sin limitarse a, un ordenador portátil, una PDA, teléfono celular/móvil, así como potencialmente un dispositivo dedicado. El software puede implementarse como cualquier "app" en el mismo y encontrarse todavía dentro del alcance de esta divulgación.

La CPU 1004 ilustrada para un sistema para detectar un fallo incipiente de un generador es de diseño familiar e incluye una unidad 1014 lógica aritmética (ALU) para realizar computaciones, una colección de registros 1016 para almacenamiento temporal de datos e instrucciones, y una unidad 1018 de control para controlar el funcionamiento del sistema 1000 informático. Se prefiere igualmente cualquiera de una variedad de procesadores, incluyendo al menos aquellos de Digital Equipment, Sun, MIPS, Motorola, NEC, Intel, Cyrix, AMD, HP y Nexgen, pero se limita a los mismos, para la CPU 1004. Esta realización ilustrada funciona en un sistema operativo diseñado para poder portarse a cualquiera de estas plataformas de procesamiento.

El sistema 1006 de memoria incluye generalmente una memoria 1020 principal de alta velocidad en forma de un medio tal como dispositivos semiconductores de memoria de acceso aleatorio (RAM) y de memoria de solo lectura (ROM) que son típicos en un medio grabable informático no transitorio. La presente divulgación no se limita al mismo y también puede incluir un almacenamiento 1022 secundario en forma de medios de almacenamiento secundario a largo plazo tales como discos flexibles, discos duros, cinta, CD-ROM, memoria flash, etc., y otros dispositivos que almacenan datos usando medios de grabación eléctricos, magnéticos y ópticos u otros. La memoria 1020 principal también puede incluir, en algunas realizaciones, una memoria de presentación de vídeo para presentar imágenes a través de un dispositivo de presentación (no mostrado). Los expertos en la técnica reconocerán que el sistema 1006 de memoria puede comprender una variedad de componentes alternativos que tienen una variedad de capacidades de almacenamiento.

Cuando sea aplicable, también puede proporcionarse un dispositivo 1010 de entrada y un dispositivo 1012 de salida en el sistema tal como se describe en el presente documento o realizaciones del mismo. El dispositivo 1010 de entrada puede comprender cualquier teclado, ratón, transductor físico (por ejemplo, un micrófono), y puede interconectarse al ordenador 1002 por medio de una interfaz 1024 de entrada, tal como una interfaz gráfica de usuario, asociada con o independiente de la interfaz de comunicación descrita anteriormente que incluye la interfaz de antena para comunicaciones inalámbricas. El dispositivo 1012 de salida puede incluir una presentación visual, una impresora, un transductor (por ejemplo, un altavoz), etc., e interconectarse al ordenador 1002 por medio de una interfaz 1026 de salida que puede incluir la interfaz de comunicación descrita anteriormente que incluye la interfaz de antena. Algunos dispositivos, tales como un adaptador de red o un módem, pueden usarse como dispositivos de entrada y/o de salida.

Tal como estarán familiarizados los expertos en la técnica, el sistema 1000 informático incluye además un sistema informático y al menos un programa de aplicación. El sistema informático es el conjunto de software que controla el funcionamiento del sistema informático y la asignación de recursos. El programa de aplicación es el conjunto de software que realiza una tarea deseada por el método de detección de un error incipiente en un generador y/o cualquiera de los procedimientos o etapas de procedimiento descritos anteriormente usando recursos informáticos puestos a disposición a través del sistema operativo.

Según las prácticas de los expertos en la técnica de la programación informática, la presente divulgación se describe a continuación con referencia a representaciones simbólicas de operaciones que se realizan por el sistema 1000 informático. Tales operaciones se refieren a veces como que se ejecutan por ordenador. Se apreciará que las operaciones que se representan simbólicamente incluyen la manipulación mediante la CPU 1004 de señales eléctricas que representan bits de datos y el mantenimiento de bits de datos en ubicaciones de memoria en el sistema 1006 de memoria, así como otro procesamiento de señales. Las ubicaciones de memoria en las que se mantienen bits de datos son ubicaciones físicas que tienen propiedades eléctricas, magnéticas u ópticas correspondientes a los bits de datos. Una o más realizaciones pueden implementarse de forma tangible en un programa o programas definidos por instrucciones ejecutables por ordenador que pueden almacenarse en un medio legible por ordenador. El medio legible por ordenador puede ser cualquiera de los dispositivos o una combinación de los dispositivos, descritos anteriormente en relación con el sistema 1006 de memoria.

Tal como se describe en el presente documento mediante las diversas realizaciones, son posibles un sistema y un método para detectar un fallo incipiente en un generador mediante la monitorización en tiempo real de la

inductancia de magnetización, resistencias de devanado y la razón de transformación de campo con respecto a estator. Basándose en este método de estimación de parámetro de rendimiento de PSO dentro del sistema y el método actuales, pueden tenerse en cuenta medidas de mantenimiento preventivas antes de que se dicte una avería forzada del generador. Tal como se describe en el presente documento, la estimación en tiempo real de los parámetros de rendimiento de generador se prefiere con respecto a la técnica anterior dado que no requiere interrupción de servicio tal como los rechazos de carga parcial requeridos en el enfoque tradicional.

5

**REIVINDICACIONES**

1. Método de detección de un fallo incipiente de un generador en un sistema de alimentación, que comprende las etapas de:
- 5 establecer (200) al menos un parámetro de referencia de generador del generador para su uso como referencia inicial;
- 10 medir (202) al menos un valor de parámetro de funcionamiento del generador;
- 15 usar (204) el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas; y
- 20 determinar (206, 208) si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable.
2. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de determinar si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable comprende además la etapa de establecer para cada parámetro de referencia de generador un valor de tolerancia a partir del parámetro de referencia de generador correspondiente y determinar si los valores presentes estimados del parámetro de rendimiento de corriente de generador se encuentran dentro de un intervalo entre el valor de referencia más el valor de tolerancia y el valor de referencia menos el valor de tolerancia.
- 25 3. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de determinar si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable comprende las etapas de:
- 30 comparar (206) el valor estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador con un parámetro correspondiente de los parámetros de referencia de generador; y
- 35 si el valor estimado no es un valor aceptable, proporcionar una alarma (210) de que un valor estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador es inaceptable.
4. Método según la reivindicación 1, en el que si durante la etapa de determinar si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable se determina que los valores presentes estimados de todos los parámetros de rendimiento de corriente del generador se encuentran dentro de un límite aceptable, realizar la etapa esperando un tiempo predeterminado y repetir las etapas según la reivindicación 1.
- 40 5. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de usar el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas comprende además las etapas de:
- 45 tratar (701) cada valor estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador establecido como una partícula, en el que cada conjunto de valores estimados es una posición diferente de la partícula; y
- 50 para cada nuevo conjunto de parámetros de funcionamiento:
- a. inicializar (702) cada posición de partícula,
  - 55 b. determinar (704) un valor inicial para la tensión de generador directa dinámica y en cuadratura;
  - c. calcular una respuesta (706) del modelo de generador con una posición de partícula seleccionada usando una tensión de campo de funcionamiento recibida,
  - 60 d. determinar una evaluación de idoneidad (708) de la partícula para hallar un valor propio óptimo y un valor óptimo global, y
  - 65 e. actualizar (712) una posición y una velocidad para cada partícula basándose en el valor propio óptimo y el valor óptimo global determinados.

6. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de usar el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas comprende además las etapas de:

5

tratar cada valor estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador establecido como una partícula, en el que cada conjunto de valores estimados es una posición diferente de la partícula; y para cada nuevo conjunto de parámetros de funcionamiento:

10

etapa 0: inicializar los índices de iteración, NOI = 0, J = 0

etapa 1: inicializar cada posición de partícula según la ecuación:

$$\hat{X} = rand() \cdot X_{nominal}$$

15

etapa 2: calcular los valores iniciales para las ecuaciones dinámicas,  $E'_d(0)$  y  $E'_q(0)$ , para los modelos de simulación usando las ecuaciones:

$$E'_d(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_d(k) + R_a i_d(k) - \hat{X}_q i_q(k)$$

20

$$E'_q(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_q(k) + R_a i_q(k) + \hat{X}_d i_d(k)$$

etapa 3: calcular la respuesta del modelo con una posición de partícula seleccionada,  $e_d(k)$  y  $e_q(k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , aplicando las tensiones de campo medidas a las ecuaciones:

25

$$E'_d(k+1) = E'_d(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}_{qo}} \left( -E'_d(k) + i_q(k) (\hat{X}_q - \hat{X}'_q) \right)$$

$$E'_q(k+1) = E'_q(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}_{do}} \left( -E'_q(k) - i_d(k) (\hat{X}_d - \hat{X}'_d) + \hat{K}_{sd} E_{fd}(k) \right)$$

30

$$e_d(k) = E'_d(k) - \hat{R}_a i_d(k) + \hat{X}_q i_q(k)$$

$$e_q(k) = E'_q(k) - \hat{R}_a i_q(k) - \hat{X}_d i_d(k)$$

etapa 4: calcular la función de idoneidad:

35

$$J = \sum_{k=1}^N \left[ (e_{d\_m}(k) - e_d(k))^2 + (e_{q\_m}(k) - e_q(k))^2 \right]$$

para comprobar la partícula óptima basándose en las respuestas de modelo obtenidas en la etapa 3 y las respuestas registradas y si es mejor, actualizar la partícula óptima;

40

etapa 5: hasta que se calculen todas las partículas, incrementar un contador de partícula y repetir las etapas 2, 3 y 4 anteriores para cada partícula;

etapa 6: actualizar la nueva posición y velocidad de partícula usando las ecuaciones:

45

$$v_{k+1} = \alpha_k + \beta_1 rand(x_k^{self} - x_k) + \beta_2 rand(x_k^{global} - x_k)$$

$$x_{k+1} = x_k + v_k$$

50

etapa 7: determinar si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones y si no se ha alcanzado el número máximo de iteraciones, incrementar los contadores de iteración (NOI y J) y avanzar a la etapa 8 y si se alcanza, detener la estimación adicional del valor de parámetro;

## ES 2 681 045 T3

etapa 8: si el índice J es igual a un valor predeterminado, avanzar a la etapa 1, y si el índice J es menor que el valor predeterminado, avanzar a la etapa 0.

- 5 7. Método según la reivindicación 1, en el que los parámetros de referencia de generador comprenden al menos uno de: salida de potencia y tensión nominal de generador,  $R_a$  = resistencia de devanado de inducido,  $R_{fd}$  = resistencia de devanado de campo,  $X_l$  = reactancia de dispersión,  $X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario,  $X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario,  $X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica,  $X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica,  $T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador o  $T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador.
- 10
- 15 8. Método según la reivindicación 1, en el que los parámetros de funcionamiento de generador comprenden al menos uno de:  $E_{fd}$  = tensión de campo,  $I_{fd}$  = corriente de campo,  $E_t$  = tensión entre bornes,  $I_t$  = corriente entre bornes,  $\varphi$  = el ángulo de carga,  $\delta_i$  = el ángulo de potencia (ángulo de rotor interno),  $V_{gen}$  = tensión de generador,  $V_r$  = tensión de referencia,  $P$  = potencia real del generador o  $Q$  = potencia reactiva del generador.
- 20 9. Método según la reivindicación 1, en el que los parámetros de rendimiento de corriente del generador comprenden al menos uno de:  $X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario,  $X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario,  $X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica,  $X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica,  $T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador o  $T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador.
- 25 10. Sistema para detectar un fallo incipiente de un generador (12) en un sistema (10) de alimentación, que comprende:
- 30 un procesador (1004) acoplado de manera operativa a una memoria (1006), una interfaz (1024) de datos de entrada para recibir parámetros de funcionamiento asociados con el generador y una interfaz (1010, 1012) de usuario, siendo el procesador para ejecutar instrucciones ejecutables por ordenador, estando las instrucciones ejecutables por ordenador estructuradas para:
- 35 establecer (200) al menos un parámetro de referencia de generador del generador para su uso como referencia inicial;
- 40 medir (202) al menos un valor de parámetro de funcionamiento del generador;
- usar (204) el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas; y
- 40 determinar (206, 208) si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable.
- 45 11. Sistema según la reivindicación 10, en el que las instrucciones ejecutables por ordenador estructuradas para determinar si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable están estructuradas adicionalmente para establecer para cada parámetro de referencia de generador, un valor de tolerancia a partir del parámetro de referencia de generador correspondiente y determinar si los valores presentes estimados de los parámetros de rendimiento de corriente de generador se encuentran dentro de un intervalo entre el valor de referencia más el valor de tolerancia y el valor de referencia menos el valor de tolerancia.
- 50
- 55 12. Sistema según la reivindicación 10, en el que las instrucciones ejecutables por ordenador estructuradas para determinar si los valores presentes estimados del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador están fuera de un límite aceptable están estructuradas adicionalmente para:
- comparar (206) el valor estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador con un parámetro correspondiente de los parámetros de referencia de generador; y
- 60 si el valor estimado no es un valor aceptable, proporcionar una alarma (210) de que un valor estimado de al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador es inaceptable.
- 65 13. Sistema según la reivindicación 10, en el que las instrucciones ejecutables por ordenador estructuradas para usar el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado del al menos un parámetro de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas están estructuradas adicionalmente para:

tratar cada valor estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador establecido como una partícula, en el que cada conjunto de valores estimados es una posición diferente de la partícula; y

5 estando las instrucciones ejecutables por ordenador, para cada nuevo conjunto de parámetros de funcionamiento, estructuradas para:

a. inicializar cada posición de partícula,

10 b. determinar un valor inicial para la tensión de generador directa dinámica y en cuadratura;

c. calcular una respuesta del modelo de generador con una posición de partícula seleccionada usando una tensión de campo de funcionamiento recibida,

15 d. determinar una evaluación de idoneidad de la partícula para hallar un valor propio óptimo y un valor óptimo global, y

e. actualizar una posición y una velocidad para cada partícula basándose en el valor propio óptimo y el valor óptimo global determinados.

20

14. Sistema según la reivindicación 10, en el que las instrucciones ejecutables por ordenador estructuradas para usar el al menos un valor de parámetro de funcionamiento para calcular un valor presente estimado del al menos un parámetro de rendimiento de corriente del generador usando la técnica de optimización por enjambre de partículas están estructuradas adicionalmente para:

25

tratar cada valor estimado del al menos uno de los parámetros de rendimiento de corriente del generador establecido como una partícula, en el que cada conjunto de valores estimados es una posición diferente de la partícula; y

30

estando las instrucciones ejecutables por ordenador, para cada nuevo conjunto de parámetros de funcionamiento, estructuradas para:

a. inicializar los índices de iteración, NOI = 0, J = 0

35

b. inicializar cada posición de partícula según la ecuación:

$$\hat{X} = rand() \cdot X_{nominal}$$

40

c. calcular los valores iniciales para las ecuaciones dinámicas,  $E'_d(0)$  y  $E'_q(0)$ , para los modelos de simulación usando las ecuaciones:

$$E'_d(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_d(k) + R_a i_d(k) - \hat{X}_q i_q(k)$$

$$E'_q(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_q(k) + R_a i_q(k) + \hat{X}_d i_d(k)$$

45

d. calcular la respuesta del modelo con una posición de partícula seleccionada,  $e_d(k)$  y  $e_q(k)$ ,  $k= 1, \dots, N$ , aplicando las tensiones de campo medidas a las ecuaciones:

$$E'_d(k+1) = E'_d(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}_{qo}} \left( -E'_d(k) + i_q(k) (\hat{X}_q - \hat{X}'_q) \right)$$

50

$$E'_q(k+1) = E'_q(k) + \frac{\Delta t}{\hat{T}_{do}} \left( -E'_q(k) - i_d(k) (\hat{X}_d - \hat{X}'_d) + \hat{K}_{sd} E_{fd}(k) \right)$$

$$e_d(k) = E'_d(k) - \hat{R}_a i_d(k) + \hat{X}_q i_q(k)$$

$$e_q(k) = E'_q(k) - \hat{R}_a i_q(k) - \hat{X}_d i_d(k)$$

55

e. calcular la función de idoneidad:

$$J = \sum_{k=1}^N [(e_{d\_m}(k) - e_d(k))^2 + (e_{q\_m}(k) - e_q(k))^2]$$

5 para comprobar la partícula óptima basándose en las respuestas de modelo obtenidas en (d.) y las respuestas registradas y si es mejor, actualizar la partícula óptima;

10 f. hasta que se calculen todas las partículas, incrementar un contador de partícula y utilizar la estructura de (c.), (d.) y (e.) anteriores para cada partícula; y

g. actualizar la nueva posición y velocidad de partícula usando las ecuaciones:

$$v_{k+1} = \alpha v_k + \beta_1 rand_1(x_k^{propio} - x_k) + \beta_2 rand_2(x_k^{global} - x_k)$$

$$15 \quad x_{k+1} = x_k + v_k$$

h. determinar si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones y si se ha alcanzado, detener la estimación adicional del valor de parámetro.

20 15. Sistema según la reivindicación 10, en el que los parámetros de referencia de generador comprenden al menos uno de: salida de potencia y tensión nominal de generador,  $R_a$  = resistencia de devanado de inducido,  $R_{fd}$  = resistencia de devanado de campo,  $X_l$  = reactancia de dispersión,  $X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario,  $X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario,  $X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica,  $X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica,  $T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador o  $T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador.

30 16. Sistema según la reivindicación 10, en el que los parámetros de funcionamiento de generador comprenden al menos uno de:  $E_{fd}$  = tensión de campo,  $I_{fd}$  = corriente de campo,  $E_t$  = tensión entre bornes,  $I_t$  = corriente entre bornes,  $\varphi$  = el ángulo de carga,  $\delta_i$  = el ángulo de potencia (ángulo de rotor interno),  $V_{gen}$  = tensión de generador,  $V_r$  = tensión de referencia,  $P$  = potencia real del generador o  $Q$  = potencia reactiva del generador.

35 17. Sistema según la reivindicación 10, en el que los parámetros de rendimiento de corriente del generador comprenden al menos uno de:  $X_d$  = reactancia síncrona directa en estado estacionario,  $X_q$  = reactancia síncrona en cuadratura en estado estacionario,  $X'_d$  = reactancia síncrona directa dinámica,  $X'_q$  = reactancia síncrona en cuadratura dinámica,  $T'_{do}$  = constante temporal directa de circuito abierto de generador o  $T'_{qo}$  = constante temporal en cuadratura de circuito abierto de generador.

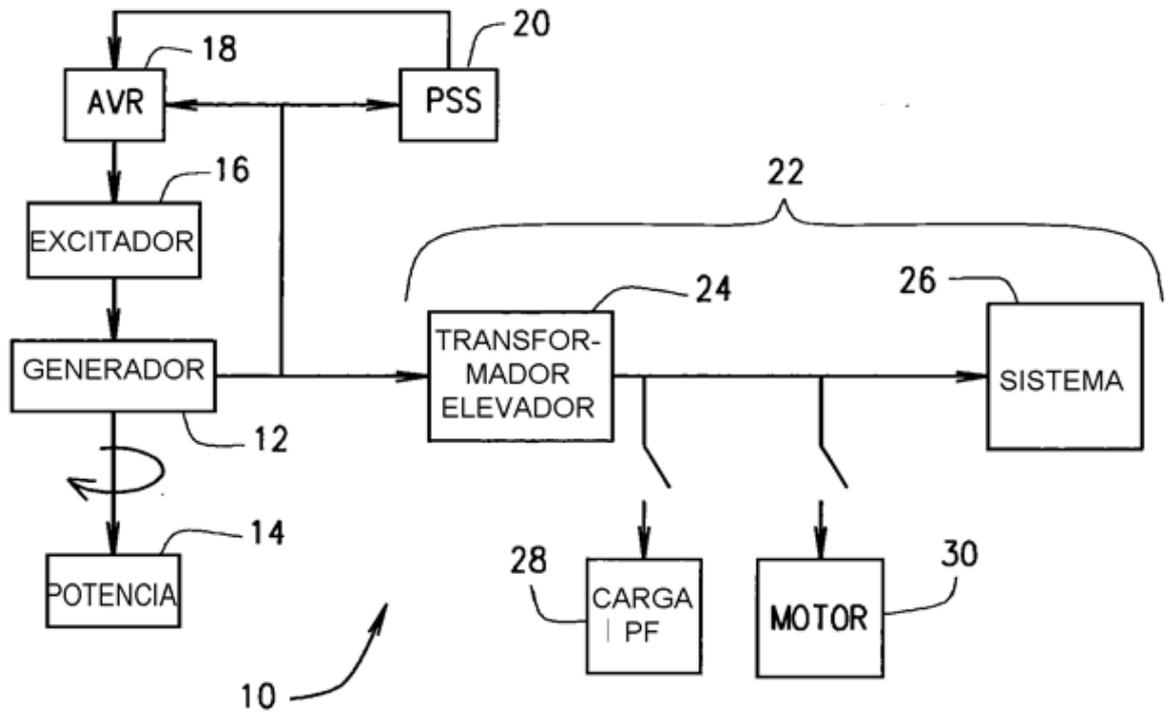


FIG. 1

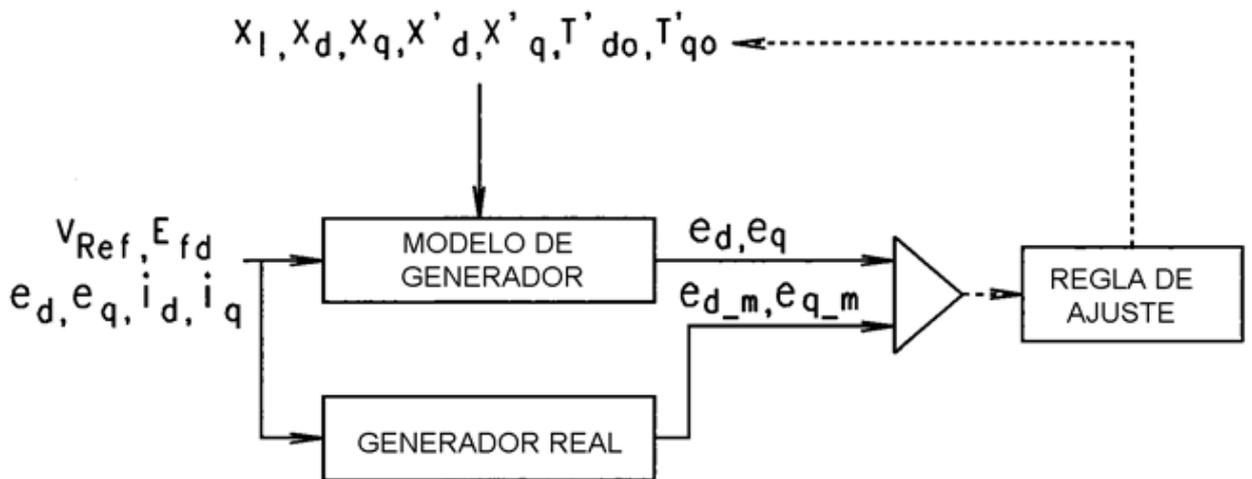


FIG. 3

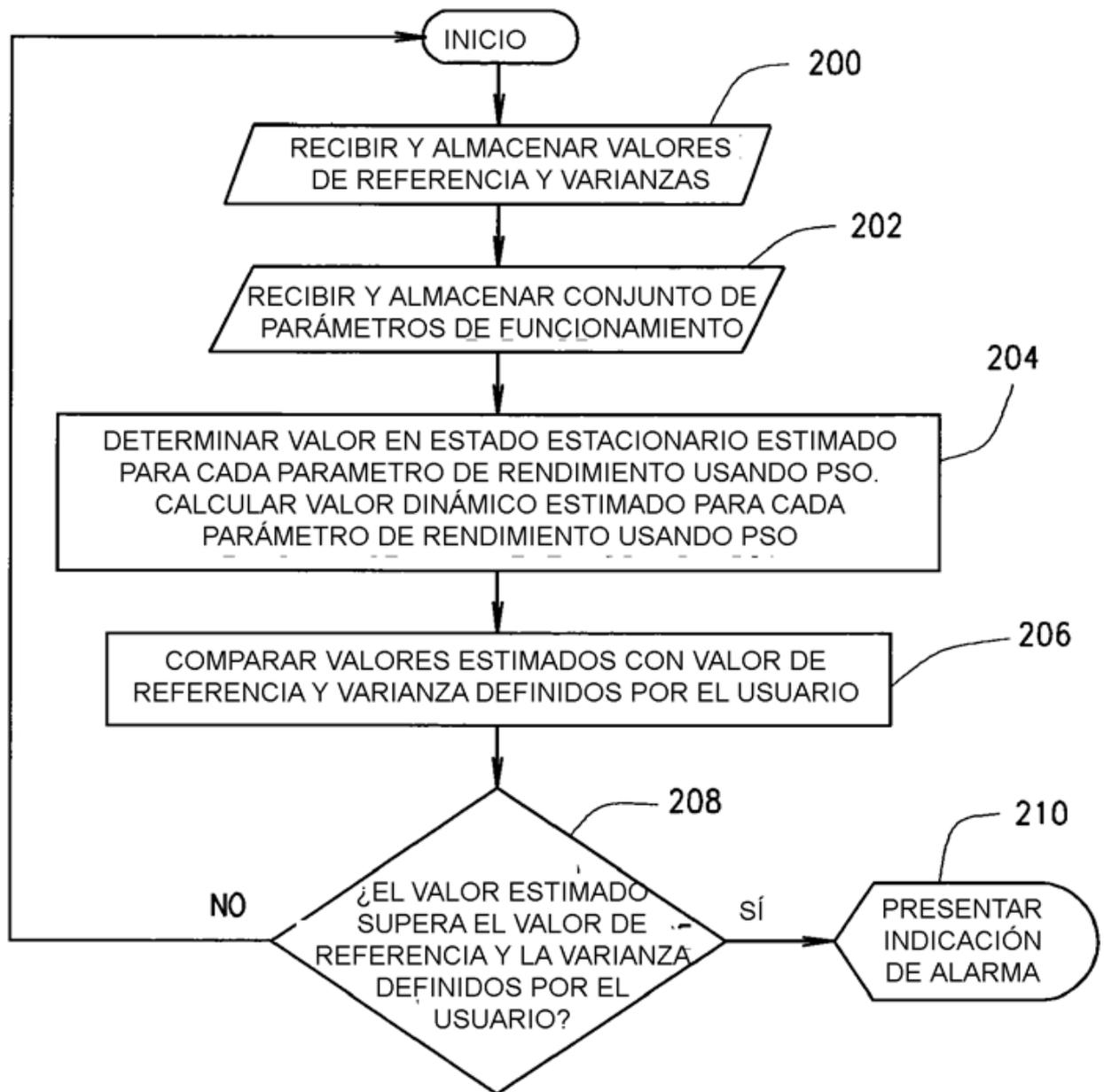


FIG. 2

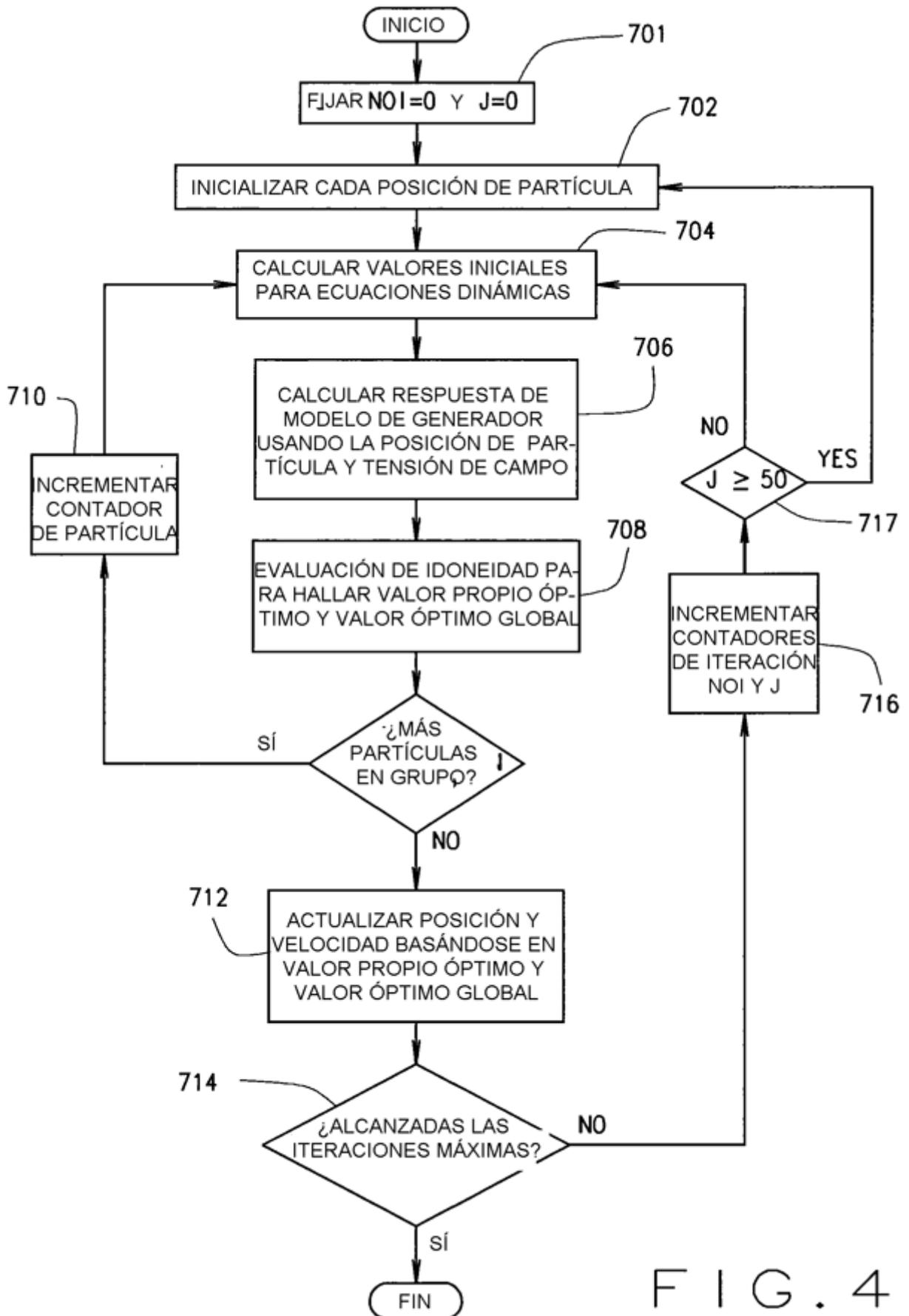


FIG. 4

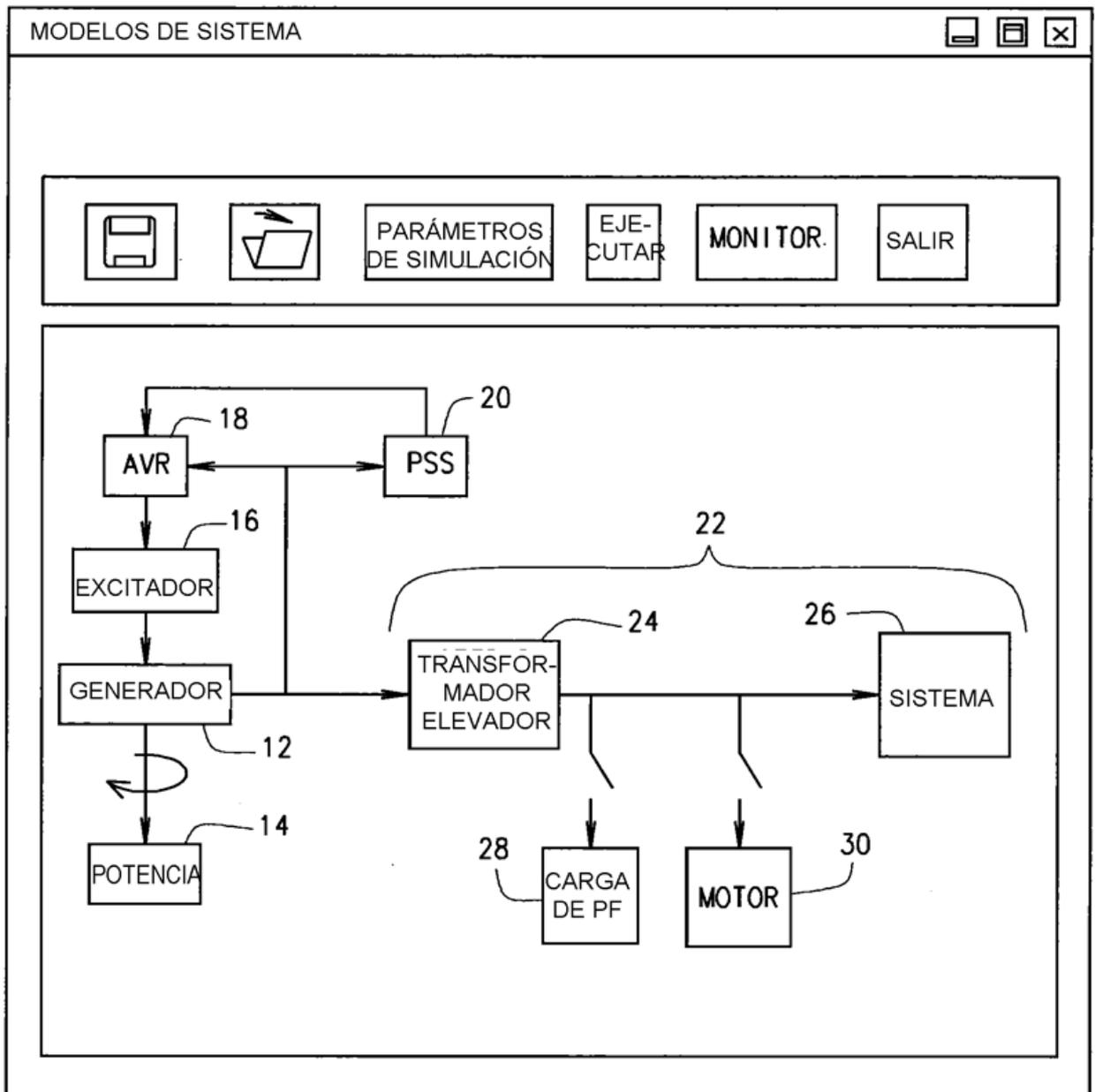


FIG. 5

PARÁMETROS DE GENERADOR

TIPO DE MODELO:

**REACTANCIA SÍNCRONA**  
 $X_d$ :  p.u.       $X_q$ :  p.u.

**REACTANCIA TRANSITORIA**  
 $X'd$ :  p.u.       $X'q$ :  p.u.

**REACTANCIA SUBTRANSITORIA**  
 $X''d$ :  p.u.       $X''q$ :  p.u.

**REACTANCIA OC TRANSITORIA**  
 $T'do$ :  s       $T'qo$ :  s

**REACTANCIA OC SUBTRANSITORIA**  
 $T''do$ :  s       $T''qo$ :  s

**INDUCTANCIA DE DISPERSIÓN DE ESTATOR**  
 $X_l$ :  p.u.

**RESISTENCIA DE ESTATOR**  
 $R_a$ :  p.u.

**CONSTANTE DE INERCIA**  
 $H$ :  p.u.

**COEFICIENTE DE AMORTIGUACIÓN**  
 $K_d$ :  p.u.

**CARACTERÍSTICAS DE SATURACIÓN**  
 $ASat$ :  p.u.       $PSiT$ :  p.u.  
 $BSat$ :  p.u.       $PSiT2$ :  p.u.

FIG. 6

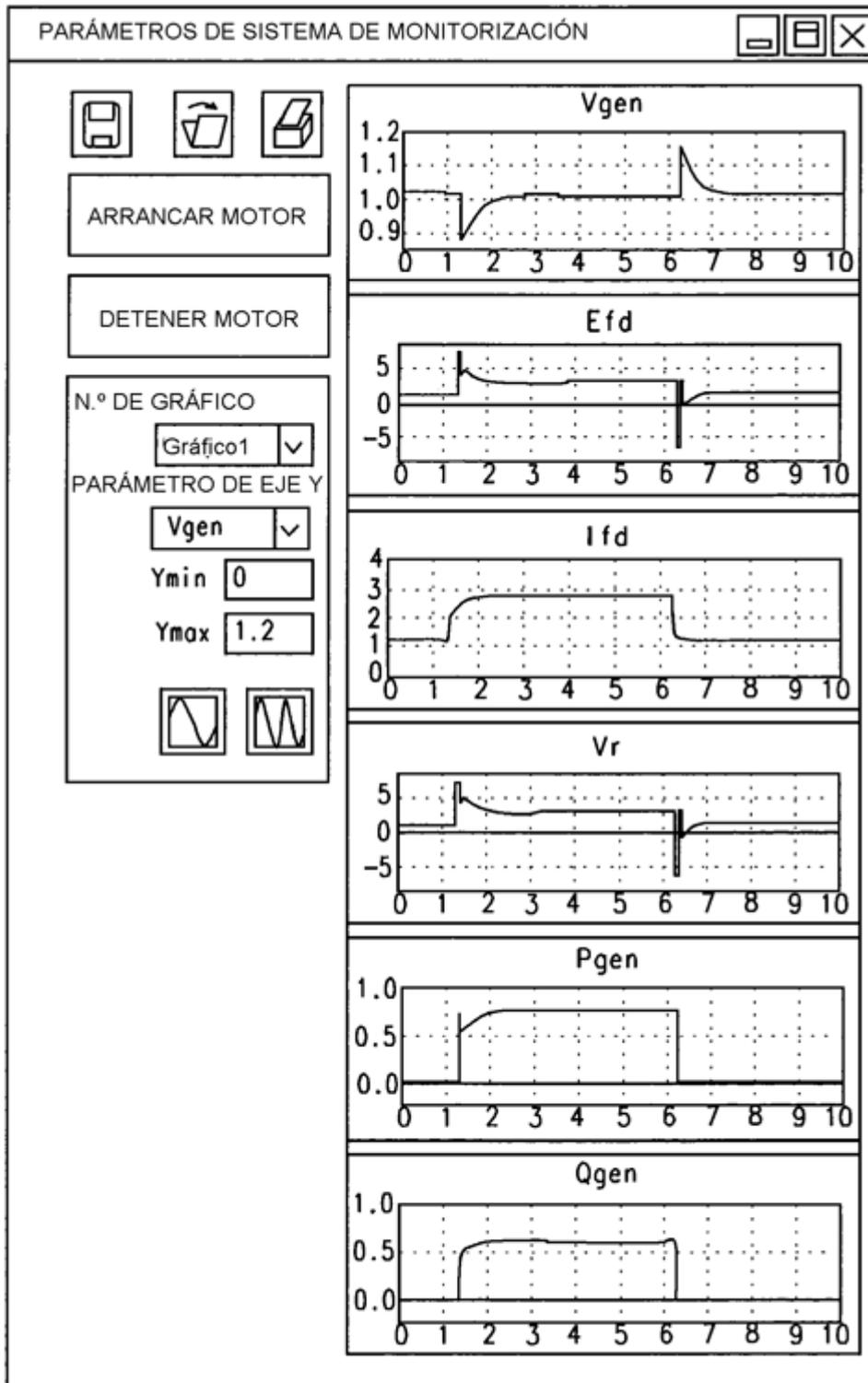


FIG. 7

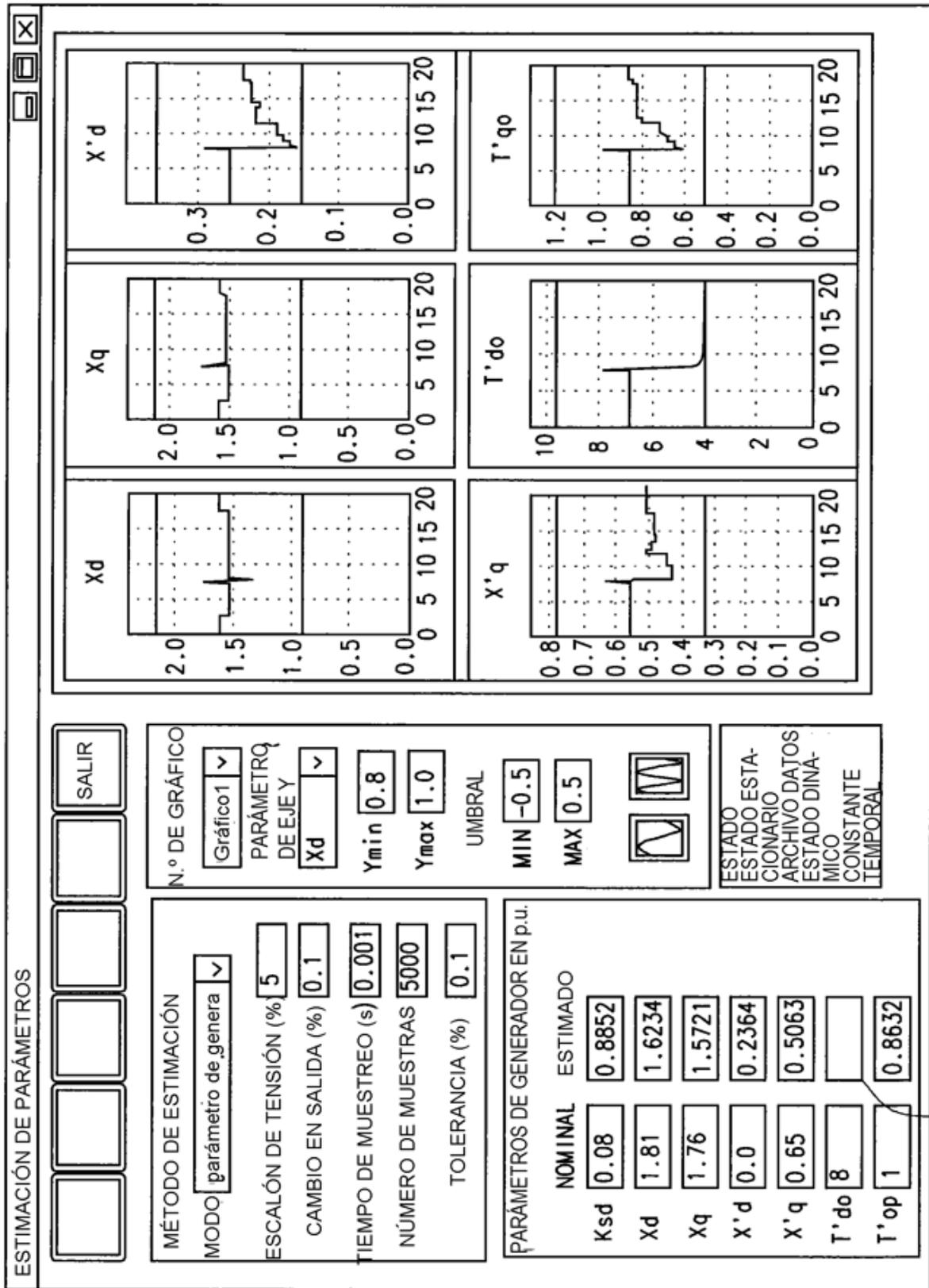


FIG. 8

800

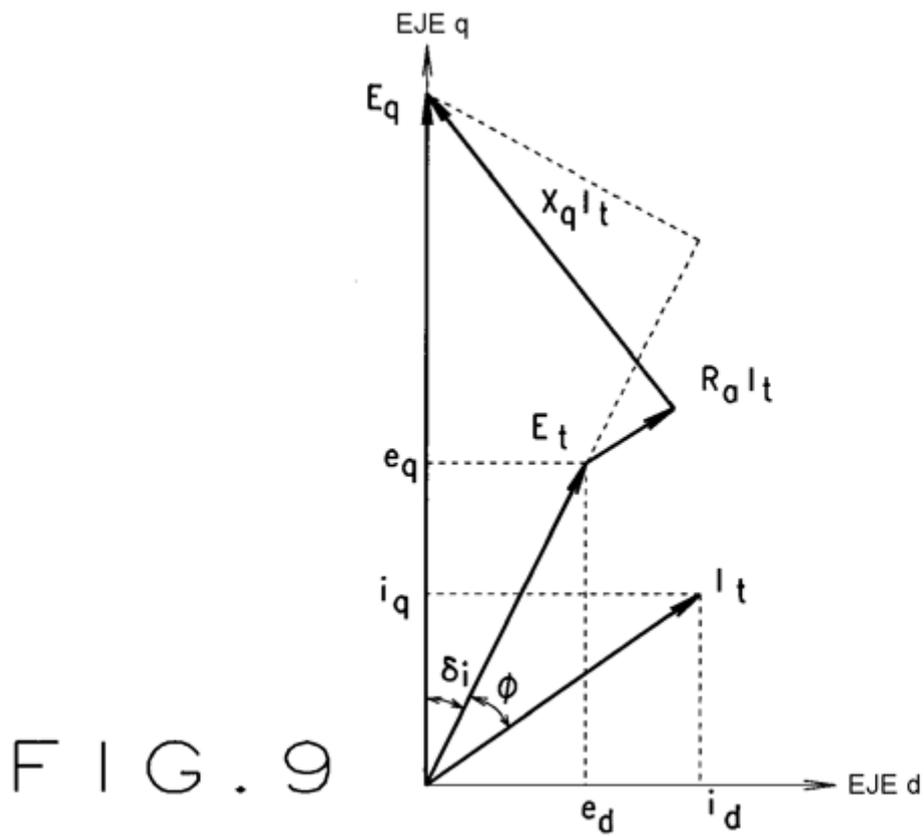


FIG. 9

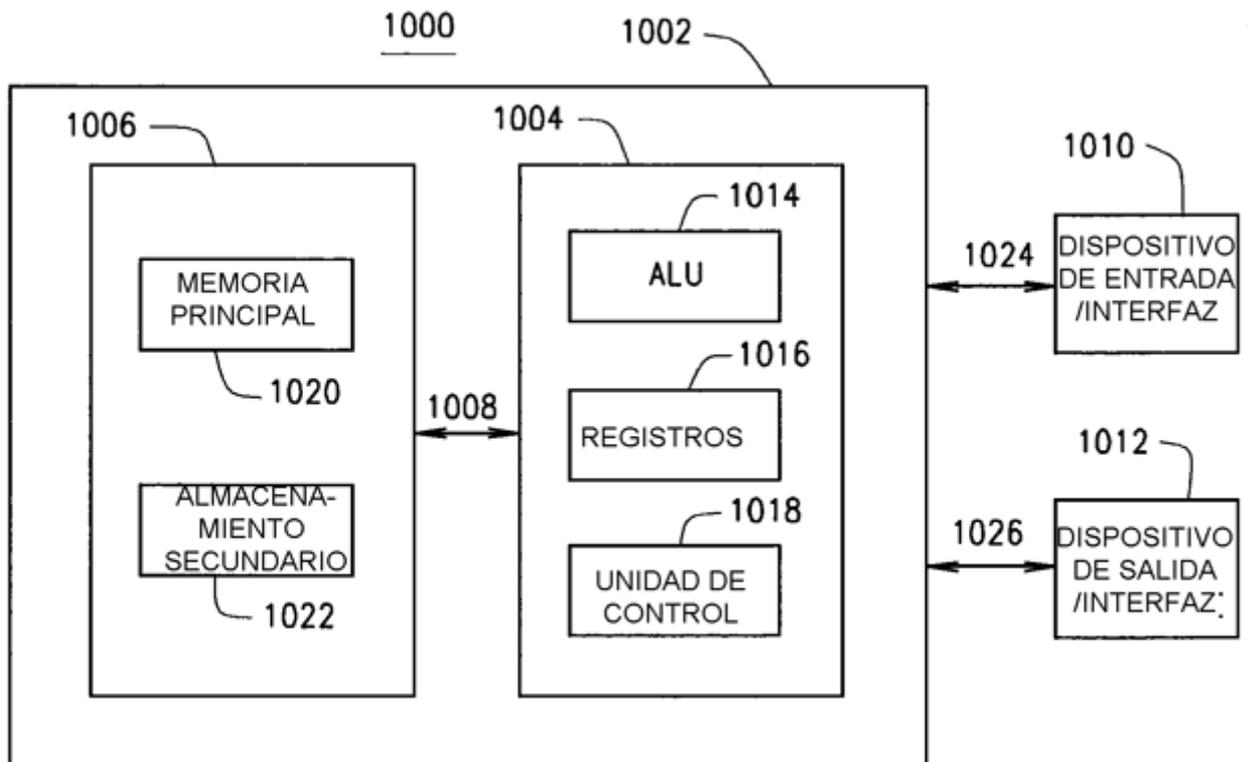


FIG. 10