(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 405 685**

(51) Int. CI.:

G05F 1/67 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2010 E 10711745 (9)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2013 EP 2399179**

(54) Título: **Método para controlar un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes de energía, en particular en fuentes de energía renovables, y el dispositivo controlador relacionado**

(30) Prioridad:

20.02.2009 IT SA20090004

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
03.06.2013

(73) Titular/es:

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO (100.0%)
Via Ponte Don Melillo 1
84084 Fisciano (SA), IT

(72) Inventor/es:

EGIZIANO, LUIGI;
FEMIA, NICOLA;
PETRONE, GIOVANNI;
SPAGNUOLO, GIOVANNI y
VITELLI, MASSIMO

(74) Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

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

DESCRIPCIÓN

Método para controlar un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes de energía, en particular en fuentes de energía renovables, y el dispositivo controlador relacionado.

La invención presente se refiere a un método para controlar un sistema de generación de energía eléctrica, basado en fuentes de energía, en particular en fuentes de energía renovable, de preferencia fuentes fotovoltaicas o de células de combustible, adaptativas dinámicamente por medio de la técnica de Perturb&Observe o P&O (perturbación y observación) realizada sobre la base de dos variables de control al menos, el método es simple, fiable, eficiente, preciso y económico, y optimiza la actuación de todo el sistema por medio de adaptación dinámica a las condiciones instantáneas de operación de la fuente de energía.

La invención presente se refiere además al dispositivo controlador relacionado.

En particular, se describe el método según la invención haciendo referencia a un dispositivo inversor de una sola etapa para un convertidor electrónico, con salida de corriente alterna y entrada de corriente continua (cc-ca), basado en el control de un ciclo de conmutación o técnica de OCC, también llamado control de un ciclo o técnica de OCC, que permite maximizar la energía extraída del campo fotovoltaico por medio de adaptación dinámica a las condiciones instantáneas de operación del campo fotovoltaico, optimizando simultáneamente tanto el control del MPPT como el factor de energía de salida o PF-out del convertidor cc-ca.

Además, el método según la invención se describe haciendo referencia a un dispositivo controlador para una célula de combustible que permite optimizar la eficiencia de la operación de la célula por medio de adaptación dinámica a sus condiciones instantáneas de operación.

Aunque en la siguiente descripción se hace referencia a la aplicación del método de control para controladores electrónicos específicos para fuentes fotovoltaicas y para membranas de electrolito de polímero o células de combustible PEM, debe entenderse que el método de control (y el dispositivo de control relacionado) según la invención puede ser aplicado a cualquier controlador y convertidor, con entrada de cc o de ca y/o salida, ambas de monofase y multifase, para cualquier fuente de energía que opere en modo aislado (suministrando energía eléctrica de cc o ca, ya sea monofase o multifase, a una carga) y/o conectado a una red de distribución de energía eléctrica, en particular una fuente de energía renovable, tal como sistemas fotovoltaicos, células de combustible (también células diferentes de las PEM), turbinas de viento y otras fuentes, que tienen condiciones de operación específicas y particulares consideradas como preferenciales respecto a la energía producida, eficiencia energética, grado de esfuerzo de los componentes, vida, o cualquier otro factor de evaluación, pueden ser escogidos para una fuente específica, y cuyas condiciones son variables, debido a factores climáticos o físicos, o factores de cualquier naturaleza, ya sean controlables o incontrolables, ya sean predecibles o impredecibles, e identificables por medio de uno o más puntos particulares de una o más curvas características eléctricas o no eléctricas de salida de la fuente tales como energía-voltaje, energía-corriente, voltaje-corriente, corriente-voltaje, eficiencia-voltaje, eficiencia-corriente u otras similares a éstas.

Además, en la descripción siguiente se hace referencia específica a una realización del método de control basado en la técnica de P&O realizada sobre la base de dos variables de control, pero debe tenerse en cuenta que el método de control puede realizar la técnica de P&O sobre la base de un número mayor de variables de control.

Actualmente, los inversores fotovoltaicos de etapa única están ganando más interés, respecto a los de multietapa, debido a la simplicidad, fiabilidad y al poco costo del circuito. Un puente H controlado que usa la técnica de OCC ha sido descrito por Y. Chen y K. Ma. Smedley, en “A cost-effective single-stage inverter with máximum power polnt tracking”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, Nº 5, de septiembre de 2004, pp. 1289 - 1294, que introduce el uso de un controlador analógico basado en el OCC para obtener una energía máxima de una fuente fotovoltaica y, simultáneamente, una gran calidad de la forma de onda de la corriente a la salida del inversor que es inyectada al circuito de distribución de energía eléctrica de ca al que está conectado el inversor.

El documento de EE.UU. US 5 798 631 A describe un dispositivo para controlar un sistema de generación de energía eléctrica, en particular una fuente de energía renovable y un método de operación de este dispositivo.

El documento de EE.UU. US 2005/209898 A1 describe un método y un aparato para resolver un problema de optimización de restricciones.

La patente europea EP 0 356 191 A2 describe métodos y aparatos para asignación de recursos optimizando funciones convexas no lineales con restricciones lineales.

Sin embargo, dicho enfoque sufre algunas limitaciones.

Una limitación se debe al hecho de que las ecuaciones de diseño propuestas para modelar el inversor no permiten optimizar éste en términos de la energía entregada y de la calidad de la corriente de salida.

Una segunda limitación es debida a la incapacidad del controlador para seguir el punto de energía máxima de la fuente fotovoltaica cuando varían las condiciones climáticas. En otras palabras, el inversor fotovoltaico propuesto por Chen y Smedley no es capaz de realizar realmente el seguimiento del punto de energía máxima (o MPTT), porque no se modifica ningún parámetro de control según los valores en curso del nivel de irradiación y de temperatura, y por tanto las mejores actuaciones del efecto fotovoltaico son solamente aseguradas por las condiciones climáticas prefijadas. Este hecho causa un fuerte compromiso durante la determinación de parámetros, para extraer la energía máxima de la fuente fotovoltaica con el nivel de luz solar más probable en el sitio de interés mediante la reducción de la penalización en la producción de energía bajo condiciones medioambientales significativamente diferentes de las más probables.

Una solución para superar dichos inconvenientes ha sido propuesta por N. Femia, D. Granozio, Petrone, G. Spagnuolo, y M. Vitelli. en “Optimized One Cycle Control in Photovoltaic Grid Connected Applications”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, Nº 3, de julio de 2006, pp. 963 - 973, y por la solicitud de patente PCT Nº WO2007/007360 A2.

En particular, dichas descripciones proponen una solución que permite establecer los parámetros de diseño del controlador de OCC para obtener una energía próxima a la máxima energía obtenible con el nivel de luz solar deseado, o según una media a lo largo de un intervalo de luz solar, y para fijar el máximo nivel de distorsión de la corriente de salida.

Además, la solución propuesta por estas dos descripciones ha introducido la posibilidad de usar un controlador del MPPT que permite regular el valor de un parámetro adecuado del circuito analógico que realiza la función de OCC, para maximizar la energía fotovoltaica producida bajo condiciones climáticas variables.

M. Fortunato, A. Giustiniani, G. Petrone, G. Spagnuolo, y M. Vitelli, en su “Máximum Power Point Tracking in a One Cycle Controlled Single Stage Photovoltaic Inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Nº 7, de julio de 2008, pp. 2684 - 2693, han propuesto consideraciones adicionales a la solución ilustrada, para comprender el potencial del inversor que tiene dispuesto el controlador del MPPT de variable única con respecto al inversor más simple, cuya actuación depende estrictamente de la función de actuación elegida para realizar la optimización y de los resultados de dicho método.

Entrando en mayores detalles, en la Figura 1 se muestra el diagrama del circuito de una estructura clásica de un inversor de OCC de etapa única (según se describe en las cuatro descripciones anteriores), en donde un convertidor cc-ca, conectado por su entrada a la fuente fotovoltaica 1 y por su salida a la red de distribución 2, comprende un puente H que tiene cuatro conmutadores de energía de semiconductores M1 – M4 (de preferencia realizados por medio de MOSFETs o IGBTs respectivos), un condensador masivo de alta capacidad C que sostiene un canal de comunicación cc, también conocido por la expresión “bus”, y un inductor de filtro de salida L. El inversor está controlado por una unidad de activación 8 según las señales que proceden de un dispositivo de control 19, que opera según la técnica de OCC de ciclo de conmutación único de los conmutadores, que tiene una estructura de circuito analógico simple que incluye un integrador reajustable 9.

El inversor de Chen and Smedley ha sido mejorado en gran medida por N. Femia y otros, y por el documento WO2007/007360 A2 mediante la introducción del conjunto de desigualdades siguientes, usadas para expresar las restricciones funcionales y la calidad de la corriente de salida del inversor:

$$R_1 C_1 = \tau < T_s \qquad [1]$$

$$V_c \geq K_g V_g + \frac{(2V_{o,\max} - V_g) R_s \tau}{2L} \qquad [2]$$

$$V_c > K_g (V_g + \Delta V_g) \qquad [3]$$

$$V_g - \Delta V_g > (1 + K) \cdot V_{o,\max} \qquad [4]$$

$$K\left(1 - \frac{P_o(S)}{\alpha \cdot P_{g,MPP}(S_{\max})}\right) \cdot (1-\gamma) \leq \left.\frac{V_m}{V_g}\right|_{\min} \leq \left.\frac{V_m}{V_g}\right|_{\max} \leq K\left(1 - \frac{P_o(S)}{\alpha \cdot P_{g,MPP}(S_{\max})}\right) \cdot (1+\gamma) \qquad [5]$$

en las que:

- $\tau = R_1 C_1$ es la constante de tiempo del integrador 9,

- T_s es el período de conmutación de la etapa de potencia, esto es, de los conmutadores del inversor M1 – M4,
- V_c es el voltaje de control,
- R_s es la ganancia del sensor 3 para detectar la corriente de salida,
- K_g es la ganancia del sensor 5 para detectar el voltaje del campo fotovoltaico 1,
- V_g indica el valor medio del voltaje instantáneo $v_g(t)$ generado por el campo fotovoltaico 1, calculado a lo largo de un periodo T_{grid} del voltaje de ca $v_0(t)$ de la red de distribución 2;
- $V_{0,máx}$ es el valor máximo asumido por el voltaje de salida $V_0(t)$;
- ΔV_g es el valor de la amplitud de pico a pico de la oscilación de 120Hz/100Hz, que está representado por:

$$\Delta V_g = \frac{P_g(S)}{\omega_{grid} V_g C} \qquad [6]$$

en la que ω_{grid} es la frecuencia de la pulsación de la red de distribución 2 (en rad/s), C es la capacitancia del condensador de amortiguación, y P_g es la energía extraída del campo fotovoltaico 1 en correspondencia a un cierto nivel de luz solar S;

- K es la ganancia del sensor 4 para detectar el voltaje de salida del inversor;
- $P_0(S)$ es la energía media de salida del inversor inyectada en la red de distribución 2 en correspondencia a cierto nivel de luz solar S;
- $P_{g,MPP}(S_{máx})$ es la energía máxima que puede entregar el campo fotovoltaico 1 en correspondencia al nivel de luz solar máximo $S = S_{máx}$ y al voltaje V_g correspondiente;
- El coeficiente α (siendo $\alpha \geq 1$) expresa la capacidad de sobrecarga del inversor con respecto a la energía máxima de entrada $P_{g,MPP}(S_{máx})$ suministrada por el campo fotovoltaico 1;
- V_m indica el valor medio de un voltaje $v_m(t)$, definido como:

$$v_m(t) = \left(\frac{V_c - K_g \cdot v_g(t)}{R_l C_l} \right) \cdot T_s$$

cuyo valor medio se calcula a lo largo de un período de tiempo T_{grid};

- $$\left.\frac{V_m}{V_g}\right|_{min} = \frac{V_c - K_g \cdot (V_g + \Delta V_g)}{V_g + \Delta V_g} \cdot \frac{T_s}{\tau} = \left(\frac{V_c}{V_g + \Delta V_g} - K_g \right) \cdot \frac{T_s}{\tau} \qquad [7]\ ;$$
- $$\left.\frac{V_m}{V_g}\right|_{max} = \frac{V_c - K_g \cdot (V_g - \Delta V_g)}{V_g - \Delta V_g} \cdot \frac{T_s}{\tau} = \left(\frac{V_c}{V_g - \Delta V_g} - K_g \right) \cdot \frac{T_s}{\tau} \qquad [8];$$
- el coeficiente γ (siendo $\gamma < 1$) define los límites admisibles del intervalo de la relación V_m/V_g determinada por ΔV_g.

Como ha sido descrito por Chen y Smedley, la primera y segunda desigualdades aseguran, respectivamente, una condición de trabajo estacionaria de la técnica de OCC no lineal y la estabilidad del inversor, mientras que la tercera desigualdad tiene en cuenta el efecto de la oscilación, típicamente a una frecuencia de 120Hz/100Hz, del voltaje V_g del campo fotovoltaico 1 causada por la conexión de la salida del inversor a la red de distribución 2.

La desigualdad 4 asegura el comportamiento óptimo del inversor cuando éste opera como un convertidor de compensación, mientras que la desigualdad 5 asegura una alta salida del factor de energía o PF-out del convertidor.

En el documento de N. Femia y otros, y en el documento WO2007/007360 A2 se ha propuesto un enfoque de optimización único basado en funciones indicadoras de la actuación definido con el objeto de obtener la mayor energía fotovoltaica en las condiciones climáticas preferidas, p. ej. al máximo y al mínimo nivel de luz solar y a lo largo de la media de un intervalo de variación dado. Se ha dedicado una atención particular a la función indicadora de la actuación obtenida de la diferencia entre la energía máxima $P_{g,MPP}(S_{máx})$ del campo fotovoltaico 1 y la energía de salida del inversor $P_0(S_{máx})$ al máximo nivel $S_{máx}$ de la luz solar relacionada con el intervalo de interés $[S_{mín}, S_{máx}]$, dado por:

$$\Psi_2 = P_{g,MPP}(S_{máx}) - P_0(S_{máx}) \qquad [9]$$

El problema mencionado anteriormente de maximización restringida ha sido analizado en detalle por N. Femia y otros, y en el documento WO2007/007360 A2, ofreciendo la solución óptima correspondiente al conjunto de los parámetros mostrados en la Tabla I, indicados a continuación como la "hipótesis de solución", que minimiza Ψ_2, obtenida por medio del conocido algoritmo Genocop de búsqueda genética.

K	K_g	R_g [Ω]	V_c [V]	τ [μs]	Energía de salida [W]
0,031161	0,01327885	0,305412	3,6291	9,570	**$P_o(S_{máx})$ = 916,5764**

Tabla I

La Figura 2 muestra las curvas características del inversor correspondientes a la hipótesis de solución junto con las curvas características del campo fotovoltaico usadas para simular el sistema. Es claramente evidente que se ha obtenido un buen punto de intersección, cercano al punto de MPP, para el máximo nivel de luz solar $S_{máx}$, elegido igual a 1kW/m^2, mientras que la energía producida en cualquier otra parte por el campo está muy lejos del punto real del MPP encontrándose la mayor parte de ella dentro del intervalo intermedio de [300, 600]W/m^2.

Las restricciones [1] - [5] dependen del nivel de luz solar a través del voltaje V_g del campo fotovoltaico 1 y de la salida de energía P_0, por lo que la adecuación de un conjunto dado de parámetros de circuito depende del nivel de luz solar considerado para su evaluación. En consecuencia, para alcanzar una solución óptima que sea apropiada no solamente para un nivel de luz solar específico, según N. Femia y otros, y en el documento WO2007/007360 A2, se consideran apropiados un conjunto de parámetros del circuito si se cumplen las restricciones [1] - [5] para un número dado de niveles de luz solar entre un mínimo $S_{mín}$ y un máximo $S_{máx}$, y se han considerado diez niveles de luz solar dentro del intervalo [0,1, 1]kW/m^2. Esto significa que la hipótesis de solución óptima es apropiada dentro de todo el intervalo de luz solar y proporciona simultáneamente la mayor energía fotovoltaica para el nivel máximo $S_{máx}$.

Sin embargo, dichas descripciones reconocen que la hipótesis de solución necesita un ajuste adicional, ya que el nivel de luz solar durante el instante de tiempo en curso t* es igual a un valor específico S* = S(t*), y no a todo un intervalo [$S_{mín}$, $S_{máx}$], por lo que las restricciones [1] - [5] deben cumplirse instantáneamente sólo a un nivel específico S*. En consecuencia, una corrección adecuada de la hipótesis de solución puede conducir a un aumento de producción de energía fotovoltaica al nivel específico S*, con tal de que las restricciones [1] - [5] se sigan cumpliendo. Además, dicho ajuste debe considerar también variaciones adicionales de condiciones climáticas y físicas del sistema, tales como, por ejemplo, la temperatura del panel.

Según N. Femia y otros, y en el documento WO2007/007360 A2, han propuesto un primer método para corregir la hipótesis de solución por medio de la así llamada técnica de Perturb&Observe o P&O.

La técnica de P&O se basa en el bien conocido método de "escalando la colina" y está muy adaptada para optimizar sistemas dinámicos en tiempo real. Como se muestra en la Figura 3, esta técnica permite buscar continuamente el valor óptimo (p. ej. un mínimo o un máximo) de una función dada f(p) indicadora de la actuación del sistema de variante de tiempo para el control, con tal de que se haya elegido para perturbar un parámetro adecuado p. Con la hipótesis de que f(p) muestra un valor de signo óptimo (p. ej. un máximo) dentro del intervalo en que p es hecho variar, la técnica de P&O es capaz de escalar la curva característica desconocida (f(p), con tal de que se aplique una perturbación de p continua durante un período de tiempo dado T_p y de que se cumpla una condición adecuada para detectar la cima de la colina.

Como se muestra en la Figura 4, la técnica de P&O opera según se describe a continuación. El valor del parámetro perturbado p es aumentado repetidas veces (o disminuido) si el valor de f(p) aumenta progresivamente (véanse los puntos 1 a 5 de la Figura 4). Esto significa que el punto de operación del sistema ha sido movido para que su actuación expresada por f(p) se aproxime a su valor óptimo. Por tanto p debe ser perturbado en el mismo sentido. De otra manera, si el valor de f(p) (que expresa la actuación del sistema) disminuye, el punto de operación del sistema ha sido alejado de la actuación óptima (véanse los puntos 5 y 6 de la Figura 4) y, por tanto se debe invertir el sentido de la perturbación de p. En cuanto se consigue el estado estacionario correspondiente a la actuación óptima, la operación del punto de operación del sistema desciende repetidamente y escala el máximo de f(p) (véanse los puntos 4, 5 y 6 en la Figura 4).

Dicho movimiento dinámico alrededor del punto de operación óptimo es de una importancia fundamental para asegurar el seguimiento del valor óptimo de f(p) cada vez que la variación de una o más variables exógenas modifica la función indicadora de la actuación y cambia el valor de p correspondiente al valor óptimo de f(p).

Por tanto, la técnica propuesta por N. Femia y otros, y en el documento WO2007/007360 A2, plantea variar el valor del voltaje de control V_c, aprovechando la facilidad para regular el mismo, y demuestra que las características de OCC pueden ser consecuentemente modificadas para realizar un seguimiento real del MPPT incluso cuando varían

las condiciones climáticas, en particular la luz solar S y la temperatura θ. En la Figura 5 se muestra el efecto de la variación de V_c.

Sin embargo, como se muestra en las Figuras 6 – 9, también es posible modificar otros parámetros del inversor de la Figura 1, en lugar del voltaje de control V_c, para hacer dicho seguimiento del MPPT. Dichas Figuras muestran gráficos obtenidos variando sólo un parámetro en la anteriormente mencionada hipótesis de solución dentro de un intervalo dado centrado en el valor nominal dado en la Tabla I. Dichos gráficos no tienen en cuenta las restricciones [1] - [5].

El análisis de las Figuras 5 – 9 muestra que, excepto por la variación de la ganancia R_s del sensor 3, la variación de un parámetro del inversor es capaz de proporcionar una curva característica del inversor de OCC que cubre la región en donde los puntos MPP de la curva característica del campo fotovoltaico están situados cuando varían las condiciones de la luz solar.

Sin embargo, en presencia de las restricciones [1] - [5], la perturbación de un único parámetro controlable del inversor podría hacer que fuera imposible la extracción de la máxima energía permitida por el campo fotovoltaico.

Entre las fuentes de energía renovables, también las células de combustible tienen en la actualidad una difusión creciente. En particular, la membrana de electrolito de polímero o células de combustible PEM son cada vez más usadas en muchas aplicaciones, tanto en las independientes (stand-alone) como en las conectadas a una red de distribución de energía eléctrica de ca (conectadas a la red), tales como, por ejemplo, unidades de suministro de energía para sistemas portátiles o unidades de suministro de energía en el caso de fallo de la red, en aplicaciones de automoción, para telecomunicaciones, en aplicaciones militares, y en la electrónica de consumo.

La Figura 10 muestra un sistema de célula de combustible PEM, o FCS, que en lo sucesivo se indica también como PEM-FCS.

En la sección de aire, un compresor 20 controlado por un motor eléctrico suministra aire presurizado a los canales del cátodo 22 de la célula 23. Un intercambiador de calor y una cámara de humidificación (no mostrados) están situados entre el compresor 20 y la entrada del cátodo 22 para regular la temperatura y la humedad relativa, respectivamente, del flujo de aire entrante. La presión de aire dentro de la célula 23 es regulada por la combinación de la acción de una válvula de contrapresión 26 con la velocidad del compresor 20,

El compresor de aire 20 desempeña una misión importante en el sistema de FCS, debido a la influencia positiva del aumento de la presión del cátodo 22 sobre la reacción electroquímica. Ya que la energía absorbida por el compresor 20 representa la pérdida de energía principal de todo el sistema de FCS (hasta el 25% de la energía bruta de la célula), es necesaria una evaluación apropiada de dicha contribución parásita para mejorar la estimación de la actuación del sistema de FCS.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que el compresor 20 se caracteriza por un comportamiento dinámico bien conocido, por una energía absorbida y por una eficiencia que dependen de las condiciones de la operación y de los límites de la operación que dependen de las características de la realización y de la tecnología usada (p. ej. condiciones de surge o sobrepresión y choke o estrangulación de los compresores centrífugos). Usualmente esta información la proporciona, también por medio de mapas experimentales, el fabricante del sistema del compresor 20. Las enseñanzas emanadas con relación a la invención presente siguen siendo válidas independientemente del modelo de polarización de la célula y del tipo y modelo del compresor usado.

Las aplicaciones de las células de combustible pueden ser incluso más amplias si son capaces de garantizar una vida más larga, esto es, si son capaces de asegurar una buena actuación durante un tiempo más largo.

Especialmente después de un gran número de horas de operación, los niveles de actuación insatisfactorios se deben con frecuencia a un control basto del sistema de FCS, p. ej. respecto a la presión y al flujo del aire. De hecho, los puntos de reglaje más eficientes con respecto a la corriente y a la presión de la célula se determinan con frecuencia en el laboratorio sobre la base de la actuación y del comportamiento nominal de la célula. Empezando a partir de estos análisis de laboratorio, se han hecho muchos esfuerzos de investigación para asegurar la operación del sistema de FCS en las condiciones óptimas (o sea, las más eficientes).

En enfoques de control de prealimentación se desarrollan típicamente dos tablas de referencia para estimar la velocidad ω_{cmd} del compresor 20 y la abertura β de la válvula de contrapresión 26 del cátodo 22 dependiendo de la corriente 1.

Otros estudios han tenido en cuenta la mejora del comportamiento del sistema FCS durante transitorios desarrollando métodos de control de bucle cerrado adecuados.

Sin embargo, ya que los puntos de reglaje obtenidos a partir de las tablas de referencia no varían nunca, dichos enfoques no son capaces de garantizar las mismas actuaciones de los sistemas de FCS durante mucho tiempo, debido al fuerte efecto, por ejemplo, del desgaste del sistema y de la deriva de parámetros.

A modo de ejemplo, los efectos del envejecimiento no pueden ser tenidos en cuenta por las tablas de referencia. Además, las características eléctricas de los sistemas de FCS son muy sensibles a estas derivas que afectan a la temperatura y a la humedad de la membrana así como a la superficie electroactiva de la membrana.

Esto significa que es necesario un sistema de control adaptativo, que asista a las tablas de referencia para conseguir una mejor adaptación a las condiciones de operación reales, para obtener una actuación óptima incluso si el sistema está operando lejos de los puntos de reglaje nominales. Además, una técnica de control adaptativa garantiza que se consiga una operación óptima sobre todo el dominio de operación de las membranas PEM, mientras que los métodos clásicos de realimentación son menos efectivos en condiciones significativamente diferentes de las del punto de llinealización.

Es por tanto un objetivo de la invención presente controlar un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes de energía, en particular en fuentes de energía renovables, que permitan optimizar la actuación de todo el sistema a lo largo de un amplio intervalo de condiciones de operación de la fuente de energía, teniendo en cuenta las variaciones de las variables exógenas.

Es todavía un objetivo de la invención presente realizar dicho control del sistema de generación de energía eléctrica de una manera simple, fiable, eficiente, precisa, y económica.

Es un objetivo particular de la invención presente optimizar la energía extraída de un campo fotovoltaico e introducida en una red de distribución, siguiendo de una manera altamente fiable, precisa, y flexible el punto de energía máxima de la fuente fotovoltaica cuando varían unas variables exógenas tales como la luz solar y la temperatura.

Es además un objetivo particular de la invención presente optimizar de una manera altamente fiable, precisa, y flexible la actuación de una célula de combustible.

Es una materia sujeto específica de la invención presente un método para controlar un sistema de generación de energía eléctrica basado en una fuente de energía al menos, según se define en la reivindicación 1.

En las reivindicaciones dependientes se definen realizaciones adicionales del método según la invención.

Es todavía una materia sujeto de la invención presente un dispositivo controlador para controlar un sistema de generación de energía eléctrica, basado en una fuente de energía al menos, según se define en la reivindicación 11.

El método de control adaptativo, y el dispositivo controlador relacionado, según la invención, aplicado a un sistema de generación de energía eléctrica basado en una fuente fotovoltaica realiza un seguimiento del MPPT basado en la técnica de P&O operando sobre la base de dos parámetros de circuito del inversor del dispositivo al menos y verificando el cumplimiento de las restricciones de operación necesarias para el correcto y seguro comportamiento del inversor del dispositivo, ofreciendo ventajas significativas respecto a la energía extraída del campo fotovoltaico y a la calidad de la corriente inyectada en la red de ca (o suministrada a una carga de ca), que implica un aumento despreciable de la complejidad del control. En particular, la energía fotovoltaica es maximizada con la variación de las condiciones de operación impuestas por los valores reales de la luz solar y de la temperatura.

De manera similar, el método de control adaptativo, y el dispositivo controlador relacionado, según la invención, aplicados a un sistema de célula de combustible realiza un control según la técnica de P&O, empezando por valores proporcionados por tablas de referencia para dos variables controlables del sistema al menos, de preferencia la velocidad del compresor ω_{cmd} y la abertura β de la válvula de contrapresión, mejorando grandemente de esta manera la actuación y la fiabilidad del sistema sometido a la variación de las condiciones de operación impuestas por variables exógenas, tales como el envejecimiento de la célula, y/o variables endógenas incontrolables tales como la superficie electroactiva, contenido de agua y temperatura de la membrana a las que la actuación de la célula es extremadamente sensible. En particular, el método de control es simple y robusto a la hora de conseguir la actuación deseada, del sistema de FCS, optimizando dinámicamente este sistema de una manera efectiva y fiable.

Se describe a continuación la invención presente, a modo de ilustración y no a modo de limitación, según sus realizaciones preferidas, haciendo referencia particular a las Figuras de los dibujos adjuntos en los que:

La Figura 1 muestra esquemáticamente un dispositivo inversor de OCC de etapa única de la técnica anterior;

La Figura 2 muestra las curvas características energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con un primer reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando varía el nivel de la luz solar;

La Figura 3 muestra esquemáticamente un sistema dinámico;

La Figura 4 muestra el gráfico de una función de actuación del sistema dinámico de la Figura 3 cuando un parámetro controlable del sistema varía y se obtiene una secuencia de puntos sobre el gráfico por medio del método “escalando la colina” cuando varían las perturbaciones de dicho parámetro.

La Figura 5 muestra las curvas características de energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con el reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando el nivel de luz solar varía y cuando el voltaje de control V_c varía dentro del intervalo [90%, 160%] con respecto al valor de la Tabla I (los valores de V_c están expresados en voltios);

La Figura 6 muestra las curvas características de energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con el reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando el nivel de luz solar varía y cuando la ganancia K varía dentro del intervalo [20%, 110%] con respecto al valor de la Tabla I;

La Figura 7 muestra las curvas características de energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con el reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando el nivel de luz solar varía y cuando la ganancia K_g varía dentro del intervalo [40%, 110%] del valor de la Tabla I;

La Figura 8 muestra las curvas características de energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con el reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando el nivel de luz solar varía y cuando la ganancia R_s varía dentro del intervalo [20%, 150%] del valor de la Tabla I (los valores de R_s están expresados en ohmios);

La Figura 9 muestra las curvas características de energía-voltaje de salida del dispositivo de la Figura 1, con el reglaje de parámetros según la Tabla I, y los puntos de operación relacionados cuando el nivel de luz solar varía y cuando la constante de tiempo τ varía dentro del intervalo [20%, 190%] del valor de la Tabla I (los valores de τ están expresados en microsegundos);

La Figura 10 muestra un diagrama de bloques esquemático de un sistema PEM-FCS de la técnica anterior;

La Figura 11 muestra un mapa de viabilidad (Figura 11a) del dispositivo de la Figura 1 cuando el voltaje de control V_c y la ganancia K varían, y con el reglaje de uno de los parámetros según la Tabla I, para satisfacer las restricciones [1] - [5], y el camino (Figura 11b) seguido en dicho mapa por un par de valores de V_c y de K perturbados en una simulación de una realización preferida del método de control según la invención (las barras coloreadas laterales hacen referencia a los valores de la energía fotovoltaica producida);

La Figura 12 muestra la variación del voltaje de control V_c obtenido por medio de una simulación PSIM del método de P&O de variable única (operando sobre el voltaje V_c) que controla el dispositivo de la Figura 1 con el reglaje de los otros parámetros según la Tabla I, para satisfacer las restricciones [1] – [5];

La Figura 13 muestra las variaciones del voltaje de control V_c (Figura 13a) y de la ganancia K (Figura 13b) obtenidas por medio de una simulación de una realización preferida del método según la invención que controla el dispositivo de la Figura 1 con el reglaje de los otros parámetros según la Tabla I, para satisfacer las restricciones [1] - [5];

La Figura 14 muestra las variaciones de la energía fotovoltaica producida en la simulación de la Figura 13 (Figura 14a) y en la simulación de la Figura 12 (Figura 14b);

La Figura 15 muestra un gráfico de tiempo indicador de si la restricción [5] de la simulación de la Figura 13 ha sido violada o no;

La Figura 16 muestra un mapa de viabilidad (Figura 16a) del dispositivo de la Figura 1 cuando el voltaje de control V_c y la ganancia K varían, y con un segundo reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5], y el camino (Figura 16b) seguido en dicho mapa por un par de valores de V_c y de K perturbados en una simulación de la realización preferida del método de control según la invención (las barras coloreadas laterales hacen referencia a los valores de la energía fotovoltaica producida);

La Figura 17 muestra la variación del voltaje de control V_c obtenida por medio de una simulación del método de variable única de P&O (operando sobre el voltaje V_c) que controla el dispositivo de la Figura 1 con el segundo reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5];

La Figura 18 muestra las variaciones del voltaje de control V_c (Figura 18a) y de la ganancia K (Figura 18b) obtenidas por medio de una simulación de la realización preferida del método según la invención que controla el dispositivo de la Figura 1 con el segundo reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5];

La Figura 19 muestra las variaciones de la energía fotovoltaica producida en la simulación de la Figura 17 (Figura 19a) y en la simulación de la Figura 18 (Figura19b);

La Figura 20 muestra un mapa de viabilidad (Figura 20a) del dispositivo de la Figura 1 cuando el voltaje de control V_c y la ganancia K varían, y con un tercer reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5], y el camino (Figura 20b) seguido en dicho mapa por el par de valores de V_c y de K perturbados en una simulación de la realización preferida del método de control según la invención (las barras coloreadas laterales hacen referencia a los valores de la energía fotovoltaica producida);

La Figura 21 muestra la variación del voltaje de control V_c obtenida mediante una simulación del método de variable única de P&O (operando sobre el voltaje V_c) que controla el dispositivo de la Figura 1 con el tercer reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5];

La Figura 22 muestra las variaciones de la energía fotovoltaica producida en la simulación de la Figura 21 (Figura 22a) y en una simulación de la realización preferida del método según la invención que controla el dispositivo de la Figura 1 con el segundo reglaje de los otros parámetros, para satisfacer las restricciones [1] - [5] (Figura 22b);

La Figura 23 muestra un gráfico de tiempo (Figura 23a) indicador de si la restricción [5] en la simulación de la Figura 22b ha sido violada o no, y las variaciones del voltaje de control V_c (Figura 23b) y de la ganancia K (Figura 23c) obtenidas en la simulación de la Figura 22b; y

La Figura 24 muestra un diagrama de bloques esquemático de la arquitectura de control de un sistema de FCS al que se le ha aplicado una segunda realización preferida del método de control según la invención.

En las Figuras, los elementos similares están indicados por los mismos números de referencia.

Como ya se ha indicado, los inventores han desarrollado un método de P&O adaptativo que, regulando dos o más variables de operación, mantiene el punto de operación del sistema de generación de energía eléctrica dentro de una región de viabilidad definida por el cumplimiento de una o más restricciones de operación y que, simultáneamente, mueve el sistema hacia la zona que asegura que se consigue el valor óptimo de la actuación operativa (p. ej. en el caso de un sistema que comprende una fuente fotovoltaica, el método asegura que se consigue la máxima energía fotovoltaica que puede generar el sistema, esto es, es un método de MPPT de P&O) en las condiciones de operación en curso (p. ej. en las condiciones medioambientales en curso). Por medio de un ejemplo, sin que éste suponga de ninguna manera una limitación, para el caso de un sistema que comprende una fuente fotovoltaica, el método puede, por ejemplo, perturbar el par de variables {K, V_c} y observar la energía fotovoltaica y las restricciones [1] – [5] hasta el final de la maximización de la primera y el cumplimiento de las últimas.

Como ya se ha descrito previamente, la hipótesis de solución correspondiente al conjunto de los parámetros mostrados en la Tabla I para un inversor de etapa única fotovoltaico parece viable (en el sentido de que cumple todas las restricciones [1] - [5]) dentro del intervalo de luz solar de S [0,1, 1] kW/m^2 y a una temperatura θ = 310K. En las condiciones de operación impuestas por una luz solar S = 100W/m^2 y una temperatura θ = 285K, la hipótesis de solución es todavía viable pero, debido al hecho de que el procedimiento de optimización (según se describe en el documento WO2007/007360 A2) ha sido hecho dentro de un intervalo de luz solar pero a un valor fijado de la temperatura, no es capaz de extraer la máxima energía fotovoltaica con diferentes pares de valores de {S, θ}.

A modo de ejemplo, cuando las condiciones de operación son S = 100W/m^2 y θ = 280K, el gráfico de la Figura 11a representa el mapa de viabilidad y muestra el sitio de dicha hipótesis de solución (correspondiente al cuadrado negro) y la zona con los puntos en rojo oscuro representa, conforme a la barra de color lateral, la región con la máxima energía fotovoltaica producida. La hipótesis de solución sigue siendo viable, incluso si está cerca del borde inferior de la región de aceptabilidad definida por las restricciones [1] - [5], pero la presencia de un borde no lineal en el lado izquierdo indica una dificultad para alcanzar la región rojo oscuro variando solamente el voltaje de control V_c. Este hecho está confirmado por el gráfico de la Figura 12, relacionado con el mismo caso de la Figura 11, y obtenido por medio de una simulación PSIM usando el método de control de variable única de P&O operando sobre el voltaje V_c, según se describe en el documento WO2007/007360 A2: dicho método aumenta el valor del voltaje V_c hasta que se alcanza una violación de la restricción, y en ese instante (concretamente, después de 1,7 segundos), el método aumenta y disminuye repetidamente el valor del voltaje V_c, pasando continuamente desde el último valor viable hasta el primero no viable y viceversa. El resultado mostrado en la Figura 12 tiene en cuenta los valores instantáneos de las cantidades eléctricas y por tanto muestra la consecución de la restricción no lineal situada en el lado izquierdo de la Figura 11a, obtenida de manera diferente por medio de un modelo de valor medio analítico, para valores de V_c inferiores a los que se infieren de la Figura 11a.

De una manera diferente, el método de control adaptativo según la invención basado en la técnica de P&O de múltiples variables permite maximizar las restricciones de cumplimiento de la energía fotovoltaica [1] - [5]. En particular, el método perturba alternativamente el voltaje de control V_c y la ganancia K según se muestra a continuación.

Una variable es perturbada repetidamente con el mismo signo de perturbación (ya sea un aumento o una disminución) hasta que se detecta una reducción de la energía fotovoltaica. En ese punto, en lugar de cambiar el signo de la perturbación (como en el método descrito en el documento WO2007/007360 A2), se perturba la otra variable con un signo opuesto al de la última perturbación de la misma variable.

Este hecho se muestra en la Figura 11b y en la parte final de las formas de onda de la Figura 13, las dos referidas siempre al mismo ejemplo (S = 100W/m^2 y θ = 280K): una secuencia de perturbaciones de incrementos del valor de V_c es seguida por una perturbación única de disminución del valor de K; a continuación, una secuencia de perturbaciones de disminución del valor de V_c (por tanto con signo opuesto al de la última perturbación de V_c

precedente) es seguida por una perturbación única de aumento del valor de K (por tanto con signo opuesto al de la última perturbación de K precedente). Este proceso conduce a una especie de "ciclo límite" que rodea la zona de máxima energía fotovoltaica: el camino del punto de operación con el ciclo final converge hacia la región con la máxima energía fotovoltaica, según se muestra en la Figura 11b.

La Figura 14 compara las energías fotovoltaicas producidas por medio del método de control de P&O de variable única del documento WO2007/007360 A2 y por medio del método de control P&O de múltiples variables según la invención presente, destacando la ventaja de una ganancia significativa de energía fotovoltaica, mayor de 30%.

El gráfico de la Figura 15 destaca cómo el método según la invención maneja las violaciones de las restricciones, mostrando la violación temporal de la restricción [5], que ocurre cuando el gráfico de la Figura 15 desciende por debajo de cero (esto es, cuando el gráfico invade la región sombreada): cuando la restricción [5] es violada, se congela temporalmente la variable perturbada (p. ej. V_c en la Figura 13); seguidamente, se perturba la otra variable (p. ej. K en la figura 13) para detectar una manera nueva que conduzca a mejoras adicionales de la energía fotovoltaica sin violar ninguna restricción [1] - [5]. De preferencia, cuando una perturbación de una variable causa la violación de las restricciones, se restablece el valor de la misma variable al último valor de antes de la perturbación (que causó la violación de las restricciones), esto es, la misma variable es restablecida y congelada al último valor que cumplía las restricciones (esto es, que aseguraba la viabilidad) y la otra variable es perturbada en el mismo sentido (esto es, con el mismo signo) de su última perturbación (esto es, de su perturbación inmediatamente precedente).

En general, una primera realización preferida del método de control adaptativo según la invención, basada en la técnica de P&O realizada con dos variables, indicadas como X e Y, comprende por este orden los siguientes pasos de ejemplo, en donde los signos SX y SY de las perturbaciones asumen valores '*' y '$\overline{*}$', que representan '+' y '-', y en donde P es una función indicadora de actuación cuyo valor debe ser maximizado (p. ej. en caso de un inversor conectado a un generador fotovoltaico, ésta función puede ser la energía extraída del generador):

A. se parte de un par de valores iniciales {X, Y}, y se asume éste como el par de valores en curso, y se inicializan los signos SX y SY de las perturbaciones relacionadas a uno de los dos valores '+' y '-';

B. se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y}, esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad: si la verificación produce un resultado negativo, se realiza el paso L, en el otro caso se prosigue con el paso C;

C. se perturba la variable X con el signo SX;

D. después de un período de tiempo T_{wait_x}, se observa la diferencia ΔP del valor de la función P después de la perturbación de X;

E. si $\Delta P > 0$, se realiza el paso B (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso B);

F. si $\Delta P < 0$, se congela la variable X a su valor en curso (después de la perturbación) y se establece SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo SX de la perturbación de X);

G. se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad): si la verificación produce un resultado negativo, se realiza el paso L, en el otro caso se prosigue con el paso H;

H. se perturba la variable Y con el signo SY;

I. después de un período de tiempo T_{wait_y}, se observa la diferencia ΔP del valor de la función P después de la perturbación de Y;

J. si $\Delta P > 0$, se realiza el paso G (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso G);

K. si $\Delta P < 0$, se congela la variable Y a su valor en curso (después de la perturbación), se establece SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo SY de la perturbación de Y), y se realiza el paso B (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso B);

L. si la última variable perturbada es X, se realizan los pasos M, en el otro caso (la última variable perturbada es Y) se realizan los pasos N;

M.1 se perturba la variable Y con el signo SY;

M.2 después de un período de tiempo T_{wait_y}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

M.3 si la verificación M.2 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se realiza el paso H (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso H);

M.4 si la verificación M.2 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de Y (esto es, se restablece el valor precedente de Y), se establece SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo de SY de la perturbación de Y) y se perturba la variable Y con el signo SY;

M.5 después de un período de tiempo T_{wait_y}, se verifica la viabilidad del par de valores {X, Y} en curso (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

M.6 si la verificación M.5 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se realiza el paso H (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso H);

M.7 si la verificación M.5 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de Y (esto es, se restablece el valor precedente de Y) y la última perturbación de X (esto es, se restablece el valor precedente de X), se establece SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo SY de la perturbación de Y), y se realiza el paso G (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso G);

N.1 se perturba la variable X con el signo SX;

N.2 después de un período de tiempo T_{wait_X}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

N.3 si la verificación N.2 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se realiza el paso C (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso C);

N.4 si la verificación N.2 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de X (esto es, se restablece el valor precedente de X), se establece SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo SX de la perturbación de X) y se perturba la variable X con el signo SX;

N.5 después de un período de tiempo T_{wait_X}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

N.6 si la verificación N.5 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se realiza el paso C (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso C);

N.7 si la verificación N.5 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de X (esto es, se restablece el valor precedente de X) y la última perturbación de Y (esto es, se restablece el valor precedente de Y), se establece SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo SX de la perturbación de X), y se realiza el paso B (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso B);

Las Figuras 11 y las 13 – 23 se refieren a dicha primera realización preferida del método.

Se puede realizar una segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención, en la que cuando una perturbación de una variable causa la violación de las restricciones, el valor de la misma variable es restablecido al último valor de antes de la perturbación (que ha provocado la violación de las restricciones) antes de congelar la misma variable, y la otra variable es perturbada en el mismo sentido (esto es, con el mismo signo) de su última perturbación (esto es, de su perturbación inmediatamente precedente), en lugar de en el sentido opuesto como en la primera realización preferida, por medio de los mismos pasos desde el A al L, en este orden, de la primera realización preferida, mientras que los pasos M y N pueden ser modificados como se expone a continuación, teniendo también en cuenta las dos variables temporales adicionales LAST_SX y LAST_SY que son también adecuadamente inicializadas y actualizadas en los pasos A, F, y K. En este sentido, la segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención establece que: el paso A sea modificado como se explica a continuación:

A'. con un par de valores iniciales {X, Y}, y suponiendo éste par como el par de valores en curso, se inicializan los signos SX y SY de las perturbaciones relacionadas a uno o dos de los dos valores '+' y '-', y se inicializan las variables temporales LAST_SX y LAST_SY para que tengan los mismos valores de los signos de SX y de SY (LAST_SX = SX, LAST_SY = SY);

el paso F se modifica según se explica a continuación:

F'. si $\Delta P < 0$, se congela la variable X a su valor en curso (después de la perturbación), se establece LAST_SX = SX y se establece SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo de SX de la perturbación de X);

y el paso K se modifica como sigue a continuación:

K'. si $\Delta P < 0$, se congela la variable Y a su valor en curso (después de la perturbación), se establece LAST_SY = SY, se establece SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo de SY de la perturbación de Y), y se realiza el paso B (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso B).

Los pasos M son modificados de la manera siguiente:

M'.1 se perturba la variable X con el signo opuesto a LAST_SX (esto es, igual a SX, para restablecer el valor X al último valor de antes de la última perturbación, que ha provocado la violación de las restricciones) y se congela la variable X a dicho valor;

M'.2 se perturba la variable Y con el signo igual a LAST_SY (esto es, opuesto a SY);

M',3 después de un período de tiempo T_{wait_y}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

M'.4 si la verificación M'.3 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se establece SY = LAST_SY y se realiza el paso H (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso H).

Aunque es muy improbable que la verificación M'.3 ofrezca un resultado negativo, sin embargo la segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención comprende preferentemente además los pasos siguientes después del paso M'.4:

M'.5 si la verificación M'.3 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de Y (esto es, se restablece el valor precedente de Y), se establece LAST_SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo LAST_SY de la última perturbación de Y), y se perturba la variable Y con el signo LAST_SY;

M'.6 después de un período de tiempo T_{wait_Y}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

M'.7 si la verificación M'.6 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se establece SY = LAST_SY y se realiza el paso H (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso H);

M'.8 si la verificación M'.6 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de Y (esto es, se restablece el valor precedente de Y), se establece LAST_SY = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo LAST_SY de la última perturbación de Y), y se realizan los pasos N.

Se modifican los pasos N de la manera siguiente en la segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención:

N'.1 se perturba la variable Y con el signo opuesto a LAST_SY (esto es, igual a SY, para restablecer el valor de Y al último valor de antes de la última perturbación que ha provocado la violación de las restricciones) y se congela la variable Y a dicho valor;

N'.2 se perturba la variable X con el signo igual a LAST_SX (esto es, opuesto a SX);

N',3 después de un período de tiempo T_{wait_X}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

N'.4 si la verificación N'.3 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se establece SX = LAST_SX y se realiza el paso C (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso C).

Aunque es muy improbable que la verificación N'.3 ofrezca un resultado negativo, sin embargo la segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención comprende preferentemente además los siguientes pasos después del paso N'.4:

N'.5 si la verificación N'.3 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de X (esto es, se restablece el valor precedente de X), se establece LAST_SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo LAST_SX de la última perturbación de X) y se perturba la variable X con el signo LAST_SX;

N'.6 después de un período de tiempo T_{wait_X}, se verifica la viabilidad del par de valores en curso {X, Y} (esto es, se verifica que se cumplen una o más restricciones de viabilidad);

N'.7 si la verificación N'.6 ofrece un resultado positivo ({X, Y} viable), se establece SX = LAST_SX y se realiza el paso C (esto es, se vuelve a realizar el método comenzando desde el paso C);

N'.8 si la verificación N'.6 ofrece un resultado negativo ({X, Y} no viable), se retira la última perturbación de X (esto es, se restablece el valor precedente de X), se establece LAST_SX = $\overline{*}$ (esto es, se invierte el signo de LAST_SX de la última perturbación de X), y se realizan los pasos M.

La segunda realización preferida del método de control adaptativo según la invención tiene una dinámica de convergencia mejorada con respecto a la primera realización preferida.

Resulta inmediato adaptar los pasos ejemplares precedentes al caso de un número de variables de control superior a 2; por ejemplo, para el sistema fotovoltaico de la Figura 1, las variables de control pueden ser cualquier subconjunto seleccionado del grupo que comprende, además del voltaje de control V_c y de la ganancia K del sensor 4 para detectar el voltaje de salida del inversor, también la ganancia K_g del sensor 5 para detectar el voltaje del campo fotovoltaico, la ganancia R_s del sensor 3 para detectar la corriente de salida del inversor, y la constante de tiempo τ del integrador 9. De manera similar, resulta inmediato adaptar los pasos ejemplares precedentes al caso de una optimización diferente de la función indicadora de la actuación como, por ejemplo, en el caso en el que la optimización consiste en una minimización de la función P o en mantener un valor deseado (como se ilustra a continuación haciendo referencia a la aplicación del método de control según la invención a un sistema de célula de combustible).

En este sentido, resulta inmediato generalizar los pasos del ejemplo precedente estableciendo que en el método según la invención se perturban dos variables controlables al menos para obtener una función indicadora de la actuación de cualquier sistema de generación de electricidad (en el caso previo, la función P) asumiendo un valor tan próximo al valor óptimo como sea posible (que en el caso previo es un valor máximo, pero que en otros casos puede ser un valor mínimo o un valor objeto de la función indicadora de la actuación); en particular, una primera variable es perturbada repetidamente con un signo de perturbación constante cuando se detecta que la distancia del valor de la función indicadora de la actuación (obtenida después de la perturbación) del valor óptimo está disminuyendo, mientras que, en cuanto se detecta que dicha distancia aumenta, una segunda variable diferente de la primera variable es perturbada con un signo de perturbación opuesto al de la última perturbación de la misma segunda variable. En el caso en el que el valor óptimo es un valor máximo, la distancia es igual a la diferencia entre el valor máximo obtenible para la función P y el valor de P en curso; dicha distancia disminuye si $\Delta P > 0$ y aumenta si $\Delta P < 0$; obviamente, en el caso en el que el valor óptimo es un valor mínimo la distancia aumenta si $\Delta P > 0$ y disminuye si $\Delta P < 0$: finalmente, el método generalizado tiene preferentemente en cuenta una o más restricciones que deben ser cumplidas cuando están sometidas a las perturbaciones impuestas a dos variables controladas al menos, anticipando, por decirlo así, la alternación de la perturbación entre las variables controlables, si es violada una de dichas restricciones al menos.

Para mejorar la actuación del inversor en intervalos dados de la luz solar S y de la temperatura θ, p. ej. la actuación incluida dentro de los valores de límite $S_{mín}$ =100W/m^2, $S_{máx}$ = 1kW/m^2 y $\theta_{mín}$ = 280K, $\theta_{máx}$ = 310K, los inventores han realizado una simulación siguiendo el método de Montecarlo para buscar nuevos conjuntos de los parámetros {K, K_g, V_c, R_s, τ} en el mismo espacio de búsqueda del documento WO2007/007360 A2, que ha sido definido para que tenga en cuenta la discretización de los valores de los componentes. En la Tabla II se muestran los intervalos e incrementos (o pasos) de los parámetros.

	K	K_g	V_c [V]	R_s [Ω]	$\tau = R_1C_1$ [μs]
Intervalos	[0, 0,15]	[0, 0,07]	[0, 24]	[0, 1,965]	[0,3, 30,3]
Incrementos	0,001	0,001	0,1	0,001	0,1

Tabla II

78 Después de 10^4 ensayos, se han determinado diez soluciones posibles, entre ellas han sido seleccionadas las dos mostradas en la Tabla III. Estas soluciones aseguran la máxima (solución 1) y la mínima (solución 2) suma de energías fotovoltaicas producidas a los niveles de luz solar $S_{mín}$ y $S_{máx}$ y a la temperatura $\theta_{máx}$. La productividad a la máxima temperatura ha sido considerada según el criterio de optimización del documento WO2007/007360 A2.

	K	K_g	V_c [V]	R_s [Ω]	$\tau = R_1C_1$ [μs]
Solución 1	0,080	0,026	18,0	0,373	29,3
Solución 2	0,071	0,009	12,3	0,367	16,7

Tabla III

79 Asumiendo la Solución 1 de la Tabla III como nueva hipótesis de solución, en las condiciones de operación de S = 100W/m^2 y θ = 280K, el gráfico de la Figura 16a representa el mapa de viabilidad y muestra la posición de dicha hipótesis de solución (correspondiente al cuadrado negro) y la zona con los puntos rojos oscuros que representa, según la barra de color lateral, la región con la más alta energía fotovoltaica producida. Dicha hipótesis de solución

es viable y parece posible que sólo un aumento del voltaje V_c es capaz de conducir a la región con la más alta energía fotovoltaica. No obstante, el voltaje V_c debe permanecer por debajo de 24V (véase la Tabla III) debido a las restricciones físicas de implementación, para que la máxima energía fotovoltaica absoluta no pueda ser alcanzada por el método de control de P&O de variable única sobre el voltaje V_c, según se describe en el documento WO2007/007360 A2, según se muestra en las Figuras 16a y 17.

De una manera diferente, el método de control adaptativo según la invención basado en la técnica de P&O de múltiples variables todavía demuestra ser ventajoso, según se confirma mediante los resultados obtenidos con las simulaciones PSIM mostradas en las Figuras 16b y 18, en donde es evidente que la perturbación de K a t = 13 aproximadamente segundos aumenta un 5% la producción de energía fotovoltaica, según se muestra en la Figura 19.

De manera similar, asumiendo la Solución 2 de la Tabla III como nueva hipótesis de solución, en condiciones de operación de S = 1000W/m^2 y θ = 280K, el gráfico de la Figura 20a representa el mapa de viabilidad y muestra el lugar de dicha hipótesis de solución (correspondiente al cuadrado negro), señalando las dificultades para alcanzar la zona con los puntos rojo oscuro que representa, según la barra de color lateral, la región con la mayor energía fotovoltaica producida por medio del método de P&O de variable única operando solamente sobre el voltaje V_0, según se describe en el documento WO2007/007360 A2 y se muestra en la Figura 21.

De una manera diferente, según se muestra en la Figura 22, el método de control adaptativo según la invención basado en la técnica de P&O de múltiples variables permite obtener un aumento de un 50% de la energía fotovoltaica. En particular, las Figuras 20b y 23 muestran cómo el método según la invención permite al sistema de generación fotovoltaica moverse a lo largo de los bordes de la región de viabilidad definidos por las restricciones [1] - [5] por medio de las perturbaciones de K (véanse las flechas de la Figura 23) correspondientes a un valor temporalmente congelado de V_c y a una perturbación de K en cuanto la restricción [5] es violada. En lugar de esto, el método de control de P&O de variable única que opera solamente sobre el voltaje V_c, permanece atrapado en el borde impuesto por las restricciones con V_c moviéndose alrededor del valor límite impuesto por la restricción [5] (véase la Figura 21).

Una segunda realización preferente del método de control adaptativo de P&O según la invención se aplica a un sistema PEM-FCS.

Un método de control adaptativo por medio de la técnica de P&O es capaz de mejorar grandemente la actuación y fiabilidad de los sistemas FCS regulando dos variables de control de las células PEM constituidas, por ejemplo, por la velocidad ω_{cmd}, controlada por el controlador del compresor, y de la abertura β de la válvula de contrapresión 26 del cátodo 22.

En particular, la segunda realización preferida del método de la invención presente propone operar sobre los actuadores del sistema FCS que son regulados para hacer que el sistema FCS opere con los puntos de reglaje óptimos, según se determina imponiendo que el exceso de aire λ sea igual a 2 aproximadamente, según han descrito J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, y H. Peng en “Control of fuel cell breathing”, IEEE Control Systems Magazine, de abril de 2004, pp. 30 - 46.

La técnica de P&O propuesta en el documento WO2007/007360 A2 puede ser aplicada al control de las células de combustible con referencia a la regulación de ya sea la velocidad ω_{cmd} controlada por el controlador del compresor o a la abertura β de la válvula de contrapresión del cátodo.

En este sentido, los inventores han realizado algunas simulaciones del sistema FCS controlado adaptativamente para demostrar la efectividad de la técnica de P&O cuando se compara con la técnica de control de prealimentación clásica basada en el uso de tablas de referencia.

Un control basado en la combinación de las tablas de referencia con la técnica de P&O mejora la actuación del sistema de FCS con relación al mantenimiento de un nivel prefijado de energía objeto. La técnica de P&O reduce la diferencia ΔP entre la energía neta efectiva y la energía objeto en presencia de variaciones de parámetros, p. ej. de la superficie electroactiva, con respecto al valor correspondiente calculado solamente con las tablas de referencia. En cualquier caso, esto se hace cumpliendo con las restricciones sobre el valor de exceso de aire que garantizan la correcta operación de la célula.

Sin embargo, la sola perturbación de la velocidad del compresor ω_{cmd} no siempre asegura el mantenimiento de la energía objeto P_{target}; consideraciones similares son válidas en el caso en el que se hace el control de P&O con la abertura β de la válvula de contrapresión, manteniendo constante el valor de la velocidad del compresor ω_{cmd}, de preferencia igual al valor proporcionado por las tablas de referencia.

La Figura 24 muestra un diagrama de bloques de la arquitectura utilizada para controlar un sistema FCS al que se le aplica la segunda realización preferida del método de control adaptativo de P&O según la invención. Dicha arquitectura comprende un controlador de P&O 60 que, basándose en las tablas de referencia 51 y en la energía de salida del sistema FCS 41, regula de una manera adaptativa los valores de la velocidad del compresor ω_{cmd} y de la

abertura β de la válvula de contrapresión de la célula del sistema FCS 41 provistos por las tablas de referencia 51, perturbándolos según la técnica de P&O, para tener en cuenta las incertidumbres del sistema y las derivas de los parámetros de reacción electroquímica con respecto a las condiciones de operación “nominales”.

Los inventores han realizado algunas simulaciones fijando el nivel de P_{target} deseado, de la energía de salida del sistema FCS 41 y simulando la variación de algunos parámetros, entre ellos el valor de la superficie electroactiva, que no son realmente ni controlables ni medibles y que afectan a la energía eléctrica producida por el sistema FCS.

Las variables de control ω_{cmd} y β son perturbadas, empezando por valores proporcionados por las tablas de referencia 51, con una frecuencia suficientemente baja con respecto a la dinámica de todo el sistema FCS (p. ej. igual a la mitad de la frecuencia con la que termina el transitorio del sistema FCS). De manera similar a lo que ya se ha visto, las variables ω_{cmd} y β no son perturbadas simultáneamente, sino que se realiza la perturbación con la misma estrategia descrita anteriormente con referencia a la primera realización del método aplicado a una fuente fotovoltaica. Dicha perturbación alternada de las dos variables asegura un cambio gradual del comportamiento del sistema FCS y un estado estacionario que se aproxima a un ciclo límite. La operación de las restricciones, fijadas para asegurar una operación segura de la célula, p. ej, respecto tanto a presiones y exceso de aire como al compresor, es la misma que se ha descrito anteriormente con referencia a la fuente fotovoltaica.

Los resultados de las simulaciones confirman también en este caso que la energía de salida neta del sistema FCS obtenida por medio del control de P&O de múltiples variables según la invención está siempre más cerca del valor objeto que la asegurada por un control de prealimentación convencional, estabilizando el punto de operación del sistema FCS con diferencias de ΔP menores incluso bajo condiciones un tanto severas.

Como en el caso fotovoltaico, la secuencia de pares $\{\omega_{cmd}, \beta\}$ en el estado estacionario determina una especie de “ciclo límite” rectangular constituido por una secuencia de puntos de operación (p. ej. pares $\{\omega_{cmd}, \beta\}$) que se siguen cíclicamente uno a otro. Una realización adicional del método de control adaptativo de P&O de múltiples variables dispone que las amplitudes de las perturbaciones sean dependientes del valor absoluto de la diferencia ΔP, p. ej. usando las relaciones lineales siguientes:

$$\Delta\beta = a + b \cdot \Delta P$$

$$\Delta\omega_{cmd} = c + d \cdot \Delta P$$

De manera similar al caso fotovoltaico, por tanto, el método de control adaptativo, y el dispositivo controlador relacionado, según la invención, aplicados a un sistema PEM-FCS realizan un control de acuerdo con la técnica de P&O, partiendo de los valores proporcionados por las tablas de referencia, de dos variables controlables del sistema al menos, de preferencia la velocidad del compresor ω_{cmd} y la abertura β de la válvula de contrapresión, mejorando grandemente de esta manera la actuación y fiabilidad del sistema PEM-FCS con la variación de las condiciones de operación impuestas por variables incontrolables o no medibles exógenas y/o endógenas que afectan la actuación de la célula.

La presente invención ha sido descrita, a modo de ilustración y no a modo de limitación, según su realización preferida, pero es evidente que las personas expertas en la técnica pueden hacer variaciones y/o cambios, sin apartarse del ámbito de protección relacionado, según se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método para controlar un sistema de generación de energía eléctrica, basado en una fuente de energía al menos, en particular una fuente de energía renovable, de preferencia una fuente fotovoltaica o una fuente de célula de combustible, operando dicho sistema según una actuación de operación representable por una función de energía de salida al menos, indicadora de la actuación, que tiene un valor óptimo al menos, siendo dependiente la operación de dicho sistema de dos parámetros controlables (X; Y) al menos, el método se **caracteriza por que** perturba los valores de dos parámetros controlables (X; Y) al menos siguiendo los pasos siguientes:

a) asume preliminarmente para cada uno de dichos dos parámetros controlables (X; Y) al menos, un signo de perturbación (SX, SY) seleccionado entre un signo positivo y un signo negativo como signo de la perturbación inmediatamente precedente del parámetro controlable respectivo, y asume un parámetro controlable en curso seleccionado entre dichos dos parámetros controlables (X; Y) al menos;

b) aplica una o más perturbaciones al parámetro controlable en curso con el mismo signo de perturbación en curso, en donde antes de cada perturbación del parámetro controlable en curso (X; Y) se verifica si la operación de dicho sistema cumple una o más restricciones de operación, y cuando se detecta que al menos una de dichas una o más restricciones ha sido violada se ejecuta el paso c), siendo aplicadas dichas una o más perturbaciones al parámetro controlable en curso con tal de que se detecte que, después de cada perturbación aislada, decrece una distancia de un valor al menos de dicha función indicadora de la actuación de dicho un valor óptimo, mientras que cuando se detecta que dicha distancia aumenta, se ejecuta el paso c);

c) asume como parámetro controlable en curso un parámetro controlable seleccionado entre dichos dos parámetros controlables (X; Y) al menos que es diferente del parámetro perturbado durante el paso b);

d) asume como signo de perturbación en curso del parámetro controlable en curso el signo opuesto al signo de la perturbación inmediatamente precedente del mismo parámetro controlable en curso, y retorna al paso b).

2. Método según la reivindicación 1, **caracterizado por que**, en el paso c), el parámetro controlable en curso (X; Y) es perturbado por una cantidad respectiva de perturbación en curso dependiendo dicha distancia de un valor detectado de dicha una función indicadora de actuación (P; ΔP) al menos de dicho un valor óptimo (P_{target}) al menos.

3. Método según la reivindicación 1 ó la 2, **caracterizado por que**, cuando en el paso b) se detecta que una de dichas una o más restricciones al menos ha sido violada, el método ejecuta, antes del paso c), los pasos siguientes:

e) restablece el parámetro controlable en curso al valor que precedía a la perturbación inmediatamente precedente;

f) asume como parámetro controlable en curso un parámetro controlable seleccionado entre dichos dos parámetros controlables (X; Y) al menos que sea diferente del parámetro perturbado durante el paso b);

g) asume como signo de perturbación en curso del parámetro controlable en curso el mismo signo de la perturbación inmediatamente precedente del mismo parámetro controlable en curso, y retorna al paso b).

4. Método según la reivindicación 1 ó la 2, **caracterizado por que**, cuando en el paso b) se detecta que una de dichas una o más restricciones al menos ha sido violada el método ejecuta, antes del paso c), los pasos siguientes:

e') restablece el parámetro controlable en curso al valor que precedía a la perturbación inmediatamente precedente;

f') asume como parámetro controlable en curso un parámetro controlable seleccionado entre dichos dos parámetros controlables (X; Y) al menos que sea diferente del parámetro perturbado durante el paso b);

g') asume como signo de perturbación en curso del parámetro controlable en curso el mismo signo de la perturbación inmediatamente precedente del mismo parámetro controlable en curso;

h) aplica una perturbación al parámetro controlable en curso con el signo de la perturbación en curso;

i) verifica si la operación de dicho sistema cumple una o más restricciones de operación;

j) cuando en el paso i) se detecta que se cumplen dichas una o más restricciones, retorna al paso b);

k) cuando en el paso i) se detecta que una de dichas una o más restricciones al menos ha sido violada, restablece el parámetro controlable en curso al valor precedente de la perturbación inmediatamente precedente, asumiendo como signo de la perturbación en curso del parámetro controlable en curso el signo opuesto

al signo de la perturbación inmediatamente precedente del mismo parámetro controlable en curso, y retorna al paso b).

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el sistema de generación de energía eléctrica comprende una fuente fotovoltaica (1) conectada a un dispositivo inversor de una etapa, comprendiendo medios de conmutación (M1 – M4), conectados a su vez a una red o circuito eléctrico de ca (2) que tiene al menos una fase, de frecuencia de pulsación ω_{grid}, en el que los medios de conmutación (M1 – M4) se conectan periódicamente, con periodo T_s menor que el periodo T_{grid} correspondiente a la frecuencia de pulsación ω_{grid}, a la fuente (1), capaz de entregar un voltaje $v_g(t)$ de valor medio V_g, a la red (2) para que la corriente de salida $i_0(t)$ de cada fase del dispositivo inversor esté en fase con el voltaje $v_0(t)$ de la misma fase que la red (2), cuyo valor máximo es $V_{0,máx}$, estando controlados los medios de conmutación (M1 – M4) por medios electrónicos de control (10, 20) que operan según un control sobre un ciclo de conmutación único de los medios de conmutación (M1 – M4), percibiendo el dispositivo inversor una inductancia de salida L y comprendiendo un sensor para detectar una corriente de salida del dispositivo inversor que tiene una ganancia R_s que está conectada en serie a la red (2), comprendiendo los medios de control electrónicos (10, 20):

- un circuito integrador reajustable (9) que tiene una constante de tiempo τ tal que $\tau < T_s$, cuya entrada recibe una señal de voltaje ($V_c – K_g*v_g$) igual a la diferencia entre un voltaje de control V_c y un voltaje proporcional mediante un primer factor K_g al voltaje de salida $v_g(t)$ de la fuente (1),

- medios de comparación (14), capaces de entregar una señal indicadora de la comparación de un voltaje [$R_s \cdot i_0(t)$] suministrado por dicho sensor para detectar una corriente de salida con la suma de la señal de salida del circuito integrador (9) y un voltaje [$K \cdot v_0(t)$] proporcional mediante un segundo factor K al voltaje $v_0(t)$ de la rejilla (2), y

- medios de generación (11, 12, 13) capaces de recibir la señal de salida de los medios de comparación (14) y una señal indicadora de la fase de la red (2) para proporcionar una o más señales para controlar los medios de conmutación (M1 – M4),

siendo el sistema de generación de energía eléctrica capaz de cumplir con las restricciones de operación siguientes:

- $V_c \geq K_g V_g + \frac{(2V_{o,\max} - V_g)R_s \tau}{2L}$,

- la señal de entrada del circuito integrador (9) es siempre positiva,

- en cualquier instante, el voltaje de entrada del dispositivo inversor es mayor que el voltaje de salida de éste, y

- $$K\left(1 - \frac{P_o(S)}{\alpha \cdot P_{g,MPP}(S_{\max})}\right) \cdot (1-\gamma) \leq \frac{V_m}{V_g}\bigg|_{\min} \leq \frac{V_m}{V_g}\bigg|_{\max} \leq K\left(1 - \frac{P_o(S)}{\alpha \cdot P_{g,MPP}(S_{\max})}\right) \cdot (1+\gamma)$$

en donde:

$$v_m = \left(\frac{V_c - K_g \cdot v_g}{\tau}\right) \cdot T_s$$

$P_0(S)$ es la energía media de salida del dispositivo para un conjunto S de condiciones de operación,

$P_{g,MPP}(S_{máx})$ es la energía máxima suministrable por la fuente (1),

α es un primer coeficiente de sobrecarga, siendo $\alpha \geq 1$, y

γ es un segundo coeficiente, siendo $\gamma < 1$.

el método se **caracteriza por que** dicha una función indicadora de la actuación del sistema al menos es una energía fotovoltaica generada por el sistema, **por que** un valor óptimo al menos es una energía fotovoltaica máxima generable por el sistema, **y por que** dichos dos parámetros controlables al menos han sido seleccionados de un grupo que comprende la ganancia R_s del sensor para detectar una corriente de salida del dispositivo inversor, la constante de tiempo τ, el voltaje de control V_c, el primer factor K_g, y el segundo factor K.

6. Método según la reivindicación 5, en el que el dispositivo inversor de etapa única está conectado, en lugar de a una red o circuito eléctrico de ca (2) que tiene una fase al menos, a una carga de ca que tiene una fase al menos, de frecuencia de pulsación ω_{grid}, y en el que el voltaje $v_0(t)$ es, en lugar del voltaje de una fase de la red (2), un voltaje de referencia de una fase de dicha carga.

7. Método según la reivindicación 5 ó la 6, **caracterizado por que** el sistema de generación de energía eléctrica es capaz de cumplir además una al menos de las dos restricciones de operación siguientes:

- el voltaje de control V_c y el primer factor K_g son tales que:

$V_c > K_g (V_g + \Delta V_g)$

donde ΔV_g es la amplitud de pico a pico de la oscilación del voltaje $v_g(t)$;

- el segundo factor K es tal que:

$V_g - \Delta V_g > (1 + K) \cdot V_{0,máx}$

8. Método según cualquiera de las reivindicaciones de la 5 a la 7, **caracterizado por que** dichos dos parámetros controlables al menos consisten en o comprenden el voltaje de control V_c y el segundo factor K.

9. Método según cualquiera de las reivindicaciones de la 1 a la 4, en el que el sistema de generación de energía eléctrica es un sistema de célula de combustible o FCS, comprendiendo una pila de células (23), a las que un compresor (20) suministra aire presurizado, estando regulada una presión dentro de la pila (23) por una velocidad ω_{cmd} del compresor (20) y una abertura β de una válvula de contrapresión (26), comprendiendo el sistema un controlador (60) que recibe de una o más tablas de referencia (51) valores nominales respectivos de la velocidad ω_{cmd} y de la abertura β correspondientes a un valor objeto P_{target} de la energía de salida del sistema, el método se **caracteriza por que** una función indicadora de la actuación al menos es una energía de salida P_{net} generada por el sistema, **por que** dicho al menos un valor óptimo es el valor de la energía objeto P_{target}, **y por que** dichos dos parámetros controlables al menos consisten en o comprenden la velocidad ω_{cmd} del compresor (20) y la abertura β de la válvula de contrapresión (26).

10. Método según la reivindicación 9, **caracterizado por que** dicha una o más restricciones operativas han sido seleccionadas del grupo que comprende las tres restricciones siguientes:

- la velocidad ω_{cmd} del compresor (20) no difiere del valor nominal respectivo en más de un primer valor umbral,

- dicha presión dentro de la pila (23) no excede un valor máximo respectivo, y

- la abertura β de la válvula de contrapresión (26) no difiere del valor nominal respectivo en más de un segundo valor umbral.

11. Un dispositivo controlador (60) para controlar un sistema de generación de energía eléctrica, basado en una fuente de energía al menos, en particular una fuente de energía renovable, de preferencia una fuente fotovoltaica o una fuente de célula de combustible, operando dicho sistema según la actuación de operación representable por una función de energía de salida al menos, indicadora de la actuación, teniendo un valor óptimo al menos, siendo dependiente la operación de dicho sistema de dos parámetros controlables (X; Y) al menos por el dispositivo controlador, el dispositivo controlador **se caracteriza por que** comprende medios electrónicos de proceso para ejecutar el método según cualquiera de las reivindicaciones de la 1 a la 10.

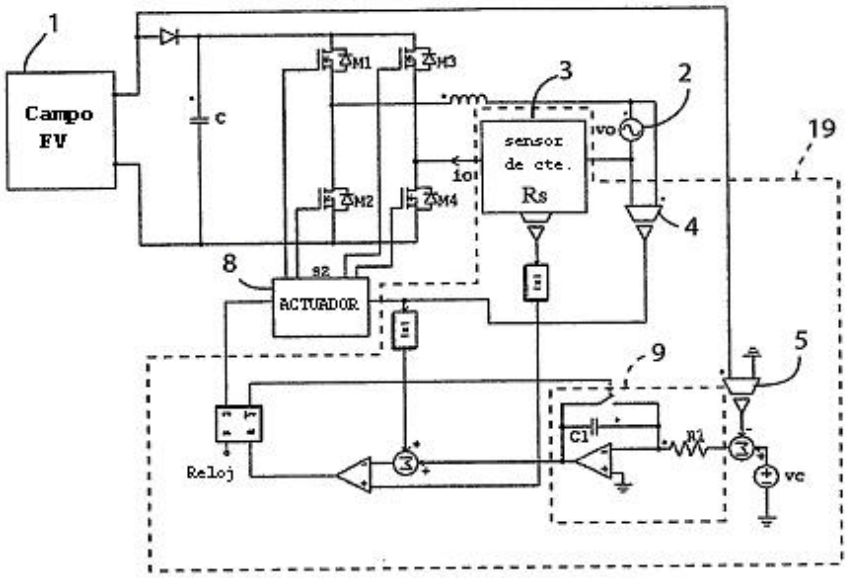


Fig. 1

Fig. 3

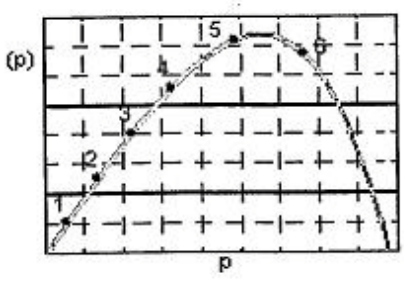


Fig. 4

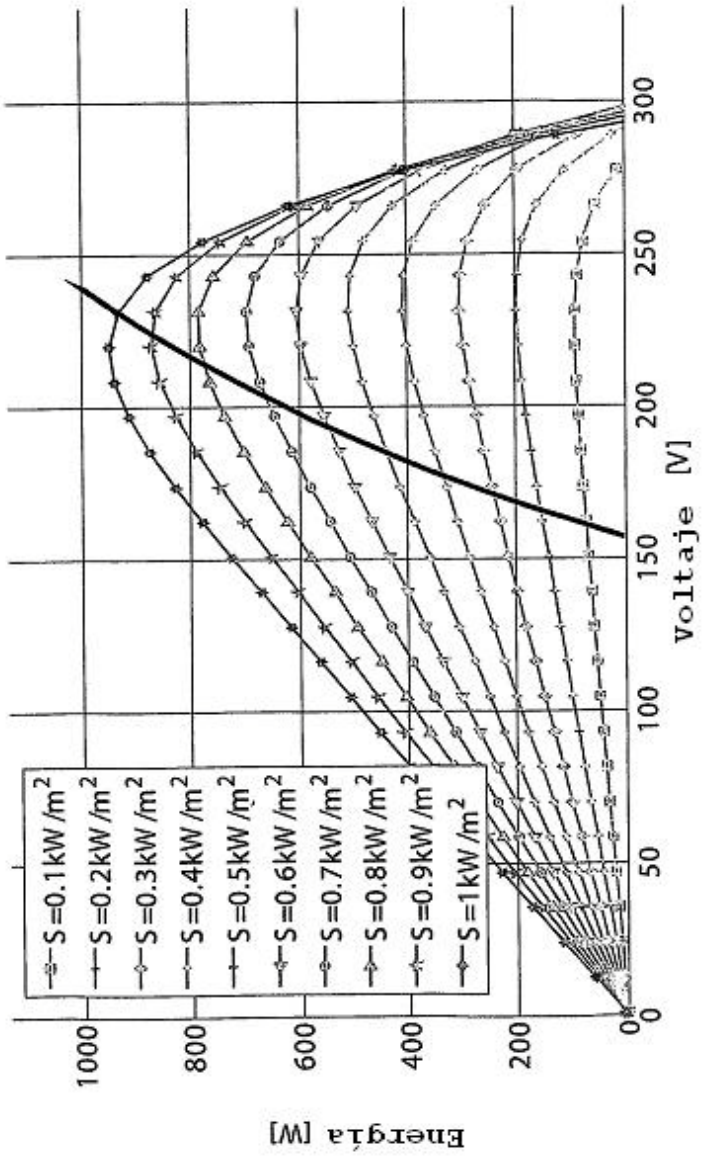

Energía [W]
Voltaje [V]
S=0.1kW/m²
S=0.2kW/m²
S=0.3kW/m²
S=0.4kW/m²
S=0.5kW/m²
S=0.6kW/m²
S=0.7kW/m²
S=0.8kW/m²
S=0.9kW/m²
S=1kW/m²

Fig. 2

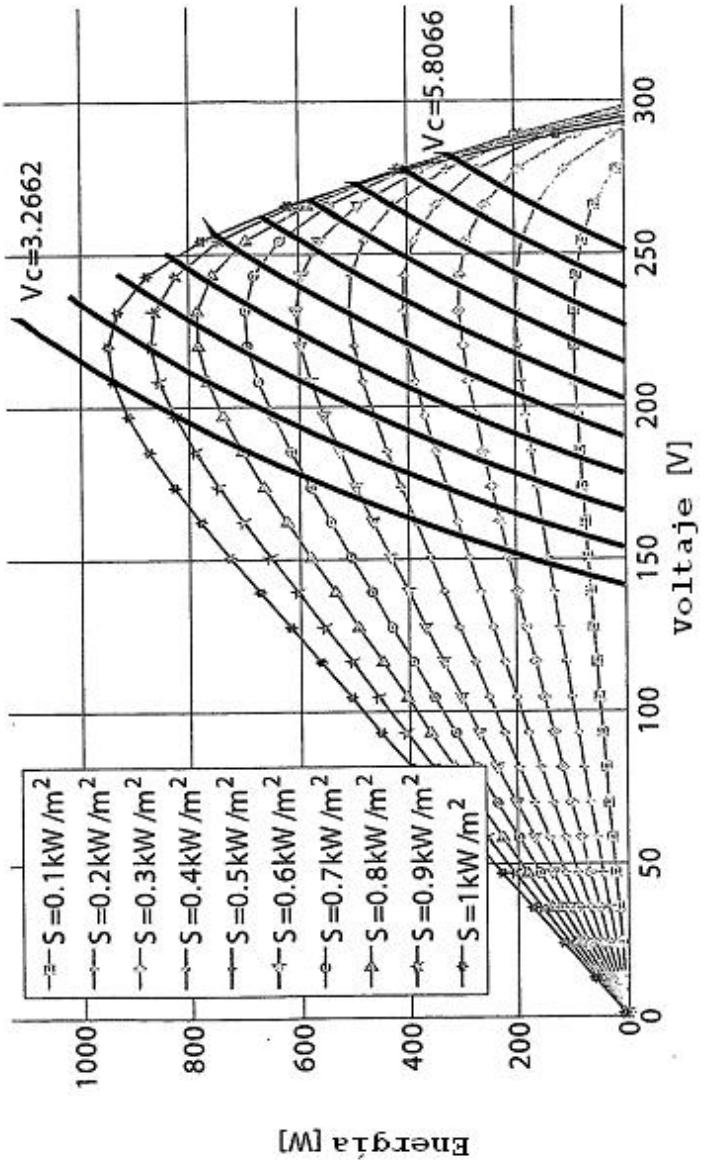

Vc=3.2662
Vc=5.8066
S=0.1kW/m2
S=0.2kW/m2
S=0.3kW/m2
S=0.4kW/m2
S=0.5kW/m2
S=0.6kW/m2
S=0.7kW/m2
S=0.8kW/m2
S=0.9kW/m2
S=1kW/m2
Energía [W]
Voltaje [V]
0
50
100
150
200
250
300
200
400
600
800
1000

Fig. 5

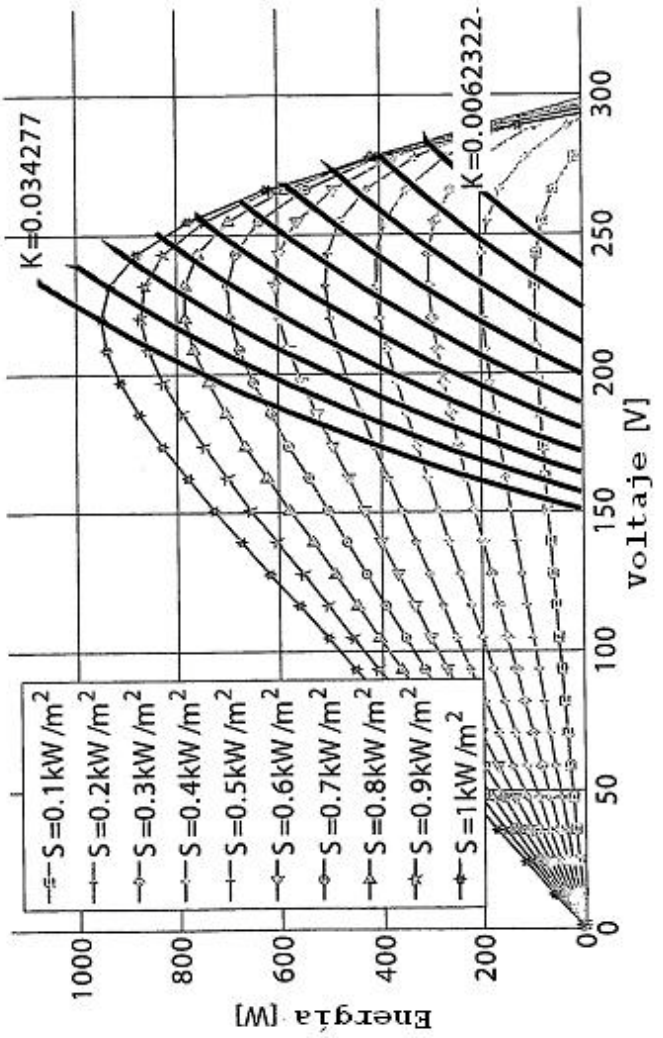

K=0.034277
K=0.0062322
S=0.1kW/m2
S=0.2kW/m2
S=0.3kW/m2
S=0.4kW/m2
S=0.5kW/m2
S=0.6kW/m2
S=0.7kW/m2
S=0.8kW/m2
S=0.9kW/m2
S=1kW/m2
Energía [W]
Voltaje [V]
0
50
100
150
200
250
300
200
400
600
800
1000

Fig. 6

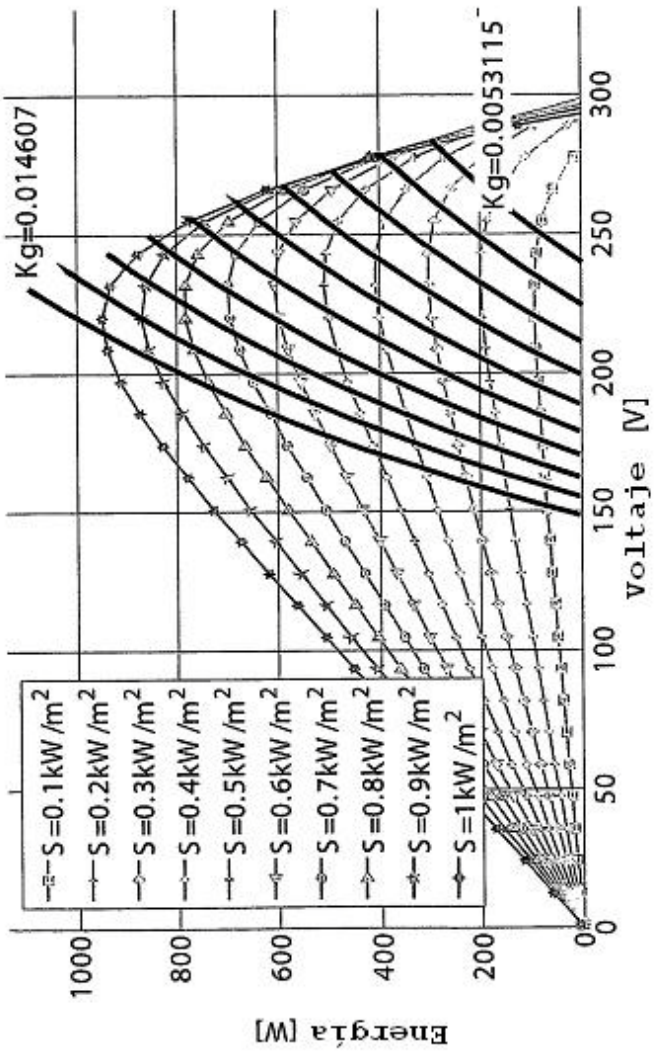

Kg=0.014607
Kg=0.0053115
S=0.1kW/m2
S=0.2kW/m2
S=0.3kW/m2
S=0.4kW/m2
S=0.5kW/m2
S=0.6kW/m2
S=0.7kW/m2
S=0.8kW/m2
S=0.9kW/m2
S=1kW/m2
Energía [W]
Voltaje [V]
0
50
100
150
200
250
300
200
400
600
800
1000

Fig. 7

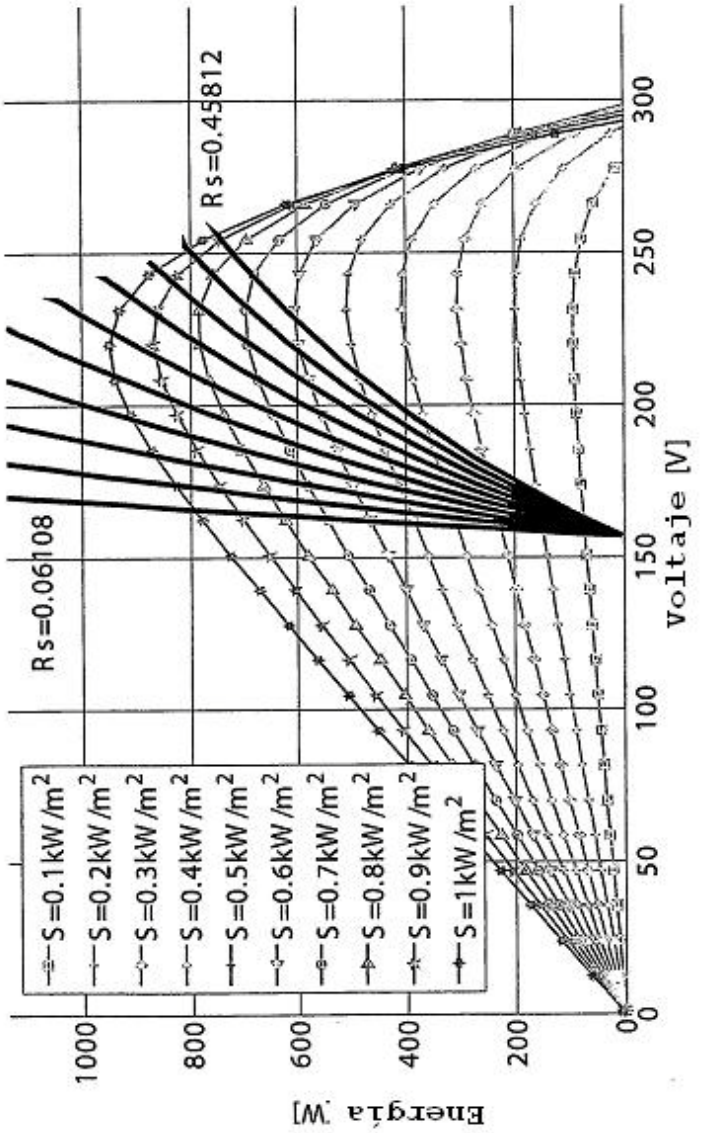

Rs=0.06108
Rs=0.45812
S=0.1kW/m2
S=0.2kW/m2
S=0.3kW/m2
S=0.4kW/m2
S=0.5kW/m2
S=0.6kW/m2
S=0.7kW/m2
S=0.8kW/m2
S=0.9kW/m2
S=1kW/m2
Energía [W]
Voltaje [V]
0
200
400
600
800
1000
0
50
100
150
200
250
300

Fig. 8

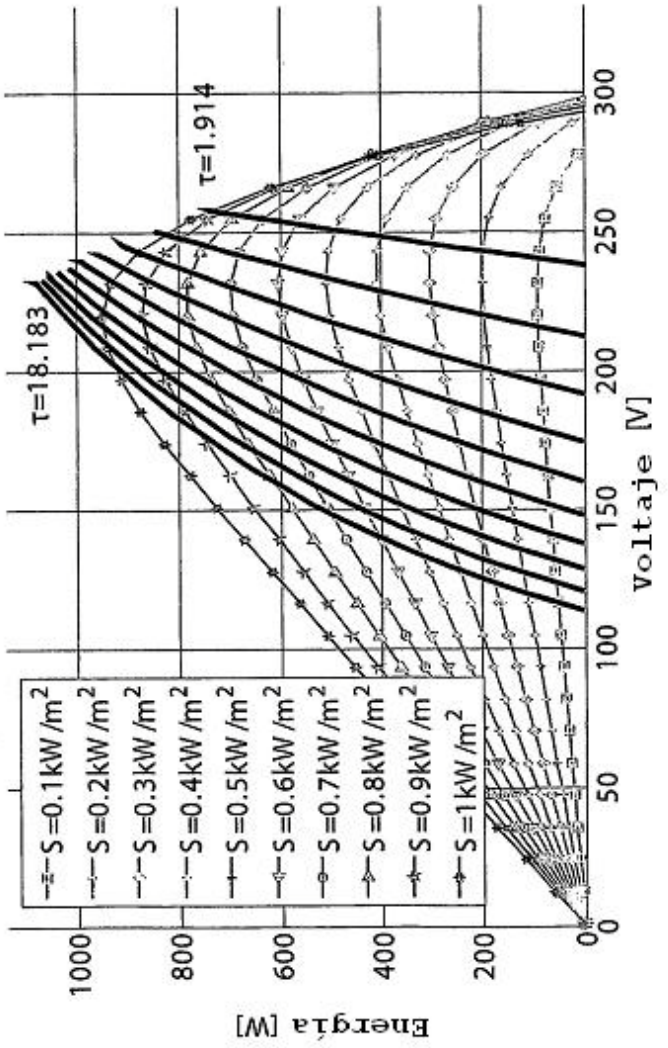

τ=18.183
τ=1.914
S=0.1kW/m²
S=0.2kW/m²
S=0.3kW/m²
S=0.4kW/m²
S=0.5kW/m²
S=0.6kW/m²
S=0.7kW/m²
S=0.8kW/m²
S=0.9kW/m²
S=1kW/m²
Energía [W]
Voltaje [V]
0
50
100
150
200
250
300
200
400
600
800
1000

Fig. 9

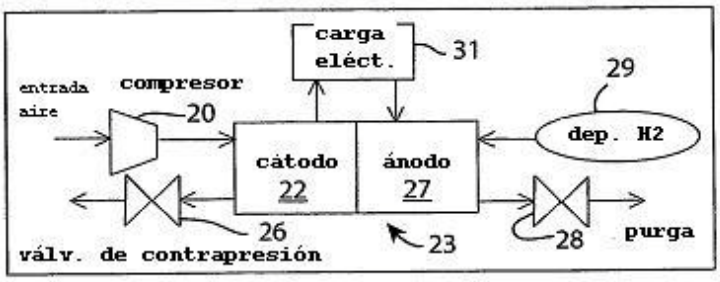

carga
eléct.
31
29
entrada
aire
compresor
20
cátodo
22
ánodo
27
dep. H2
26
23
28
purga
válv. de contrapresión

Fig. 10

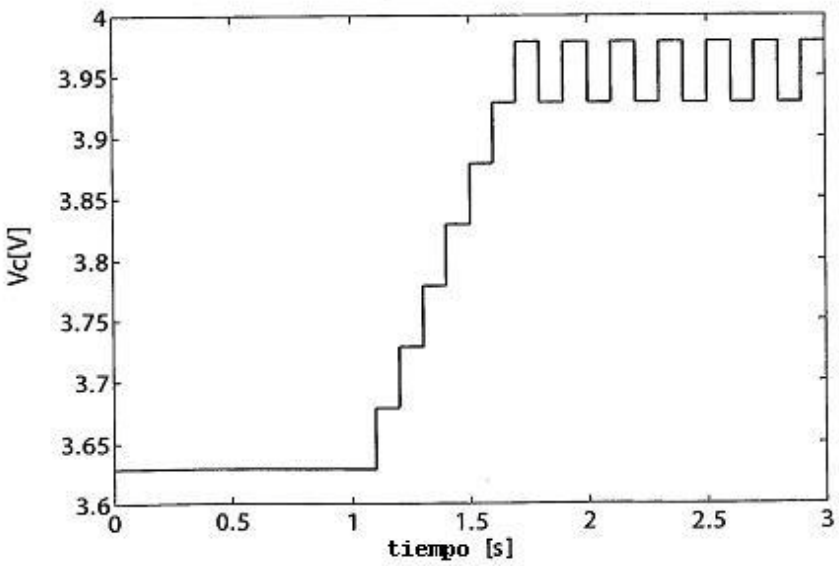

Vc[V]
4
3.95
3.9
3.85
3.8
3.75
3.7
3.65
3.6
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
tiempo [s]

Fig. 12

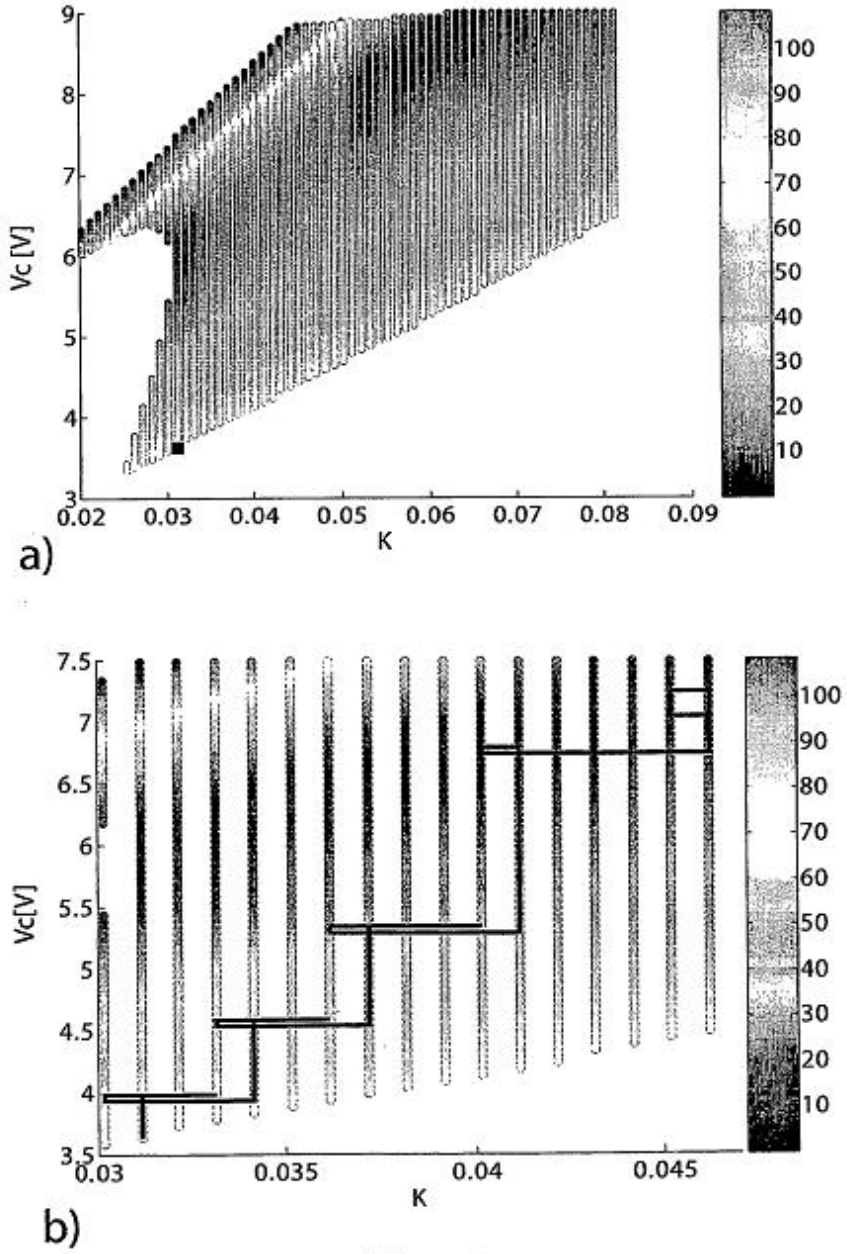
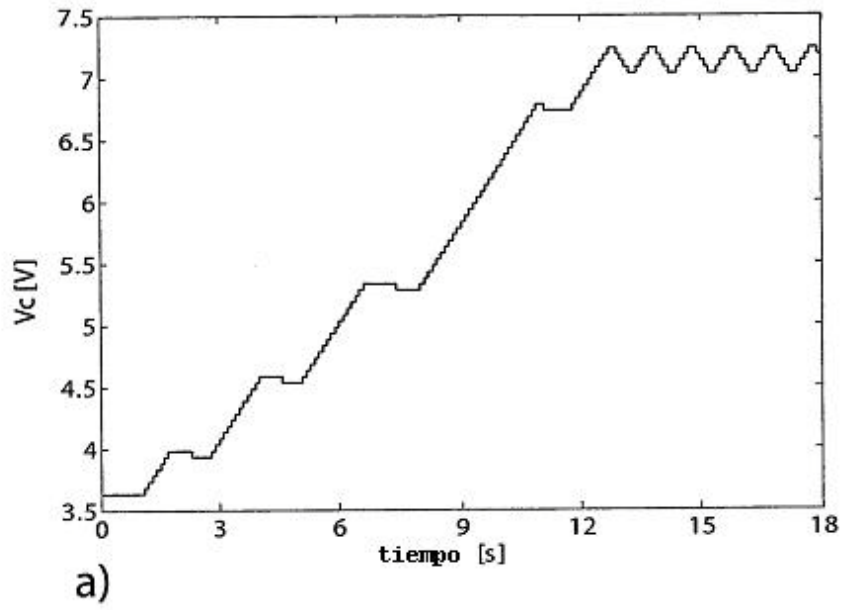
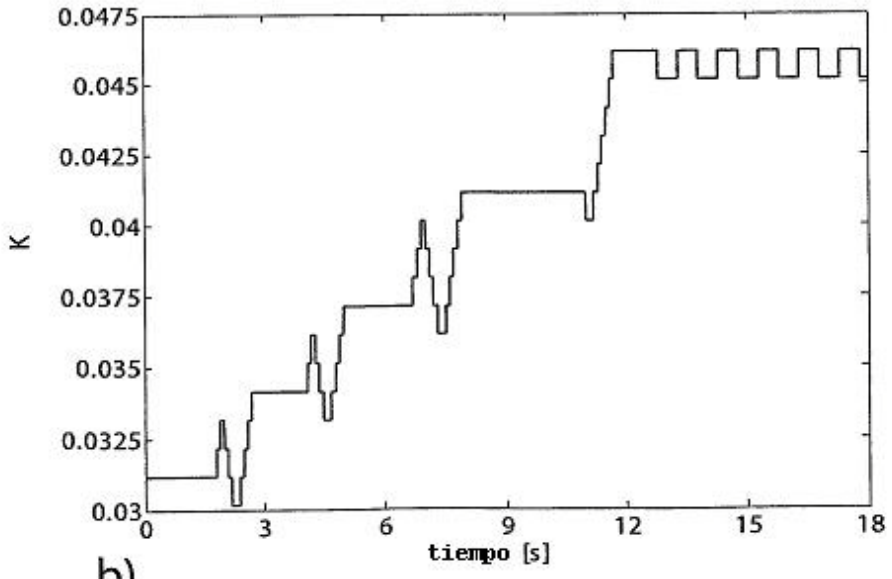


Fig. 11

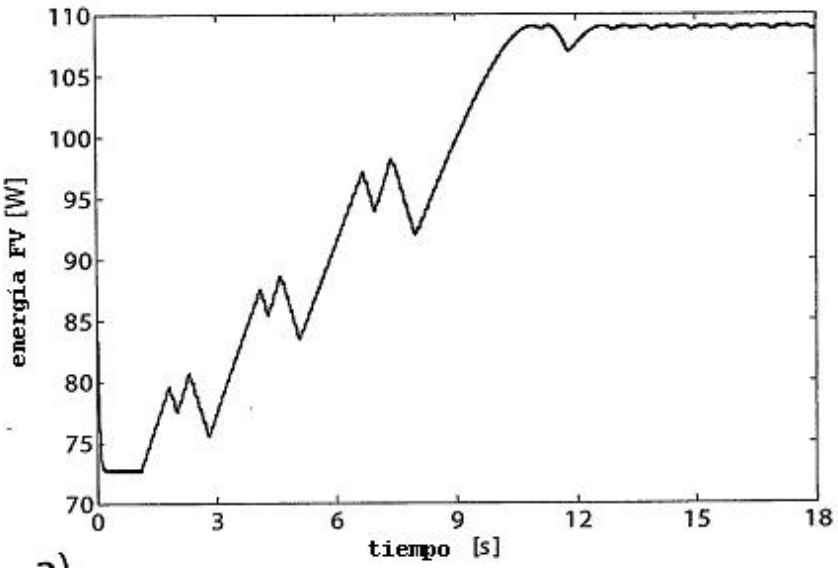

7.5
7
6.5
6
5.5
5
4.5
4
3.5
Vc [V]
0
3
6
9
12
15
18
tiempo [s]

a)

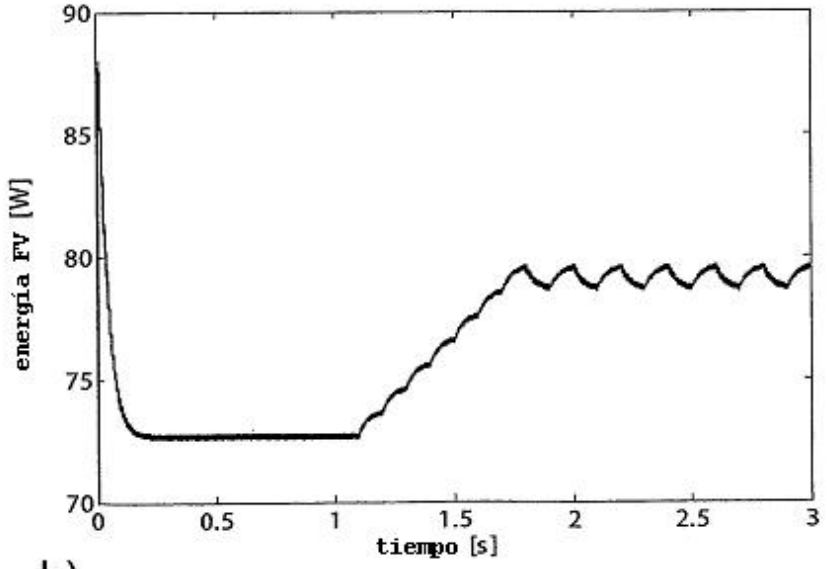

0.0475
0.045
0.0425
0.04
0.0375
0.035
0.0325
0.03
K
0
3
6
9
12
15
18
tiempo [s]

b)

Fig. 13


energía FV [W]
tiempo [s]
110
105
100
95
90
85
80
75
70
0
3
6
9
12
15
18

a)


energía FV [W]
tiempo [s]
90
85
80
75
70
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

b)

Fig. 14

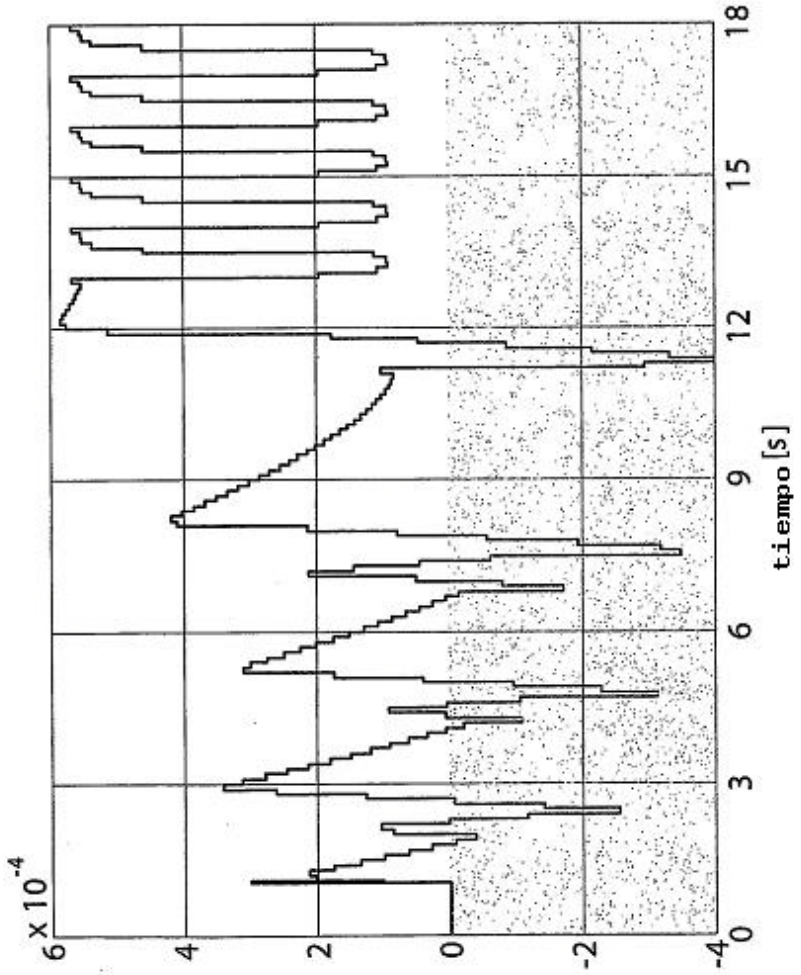
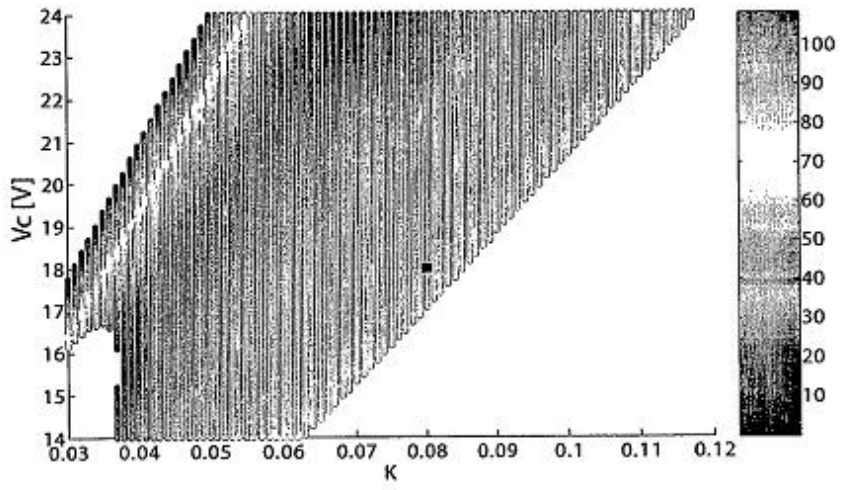
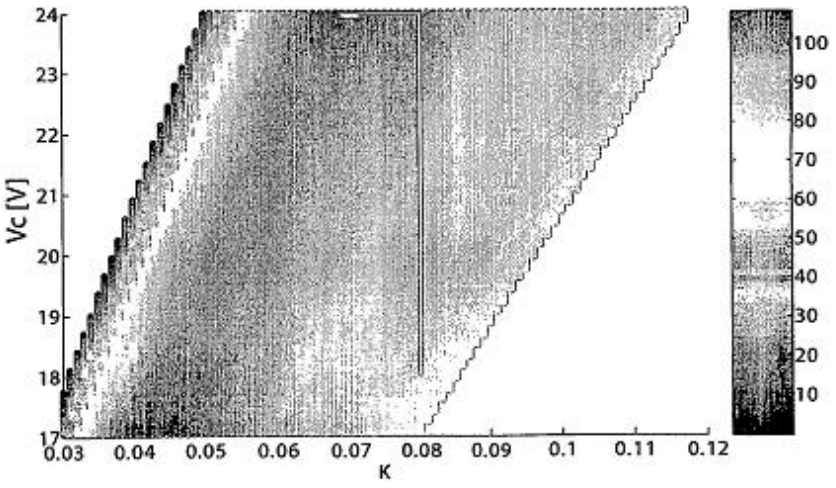


Fig. 15


Vc [V]
K
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
0.11
0.12
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10

a)


Vc [V]
K
24
23
22
21
20
19
18
17
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
0.1
0.11
0.12
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10

b)

Fig. 16

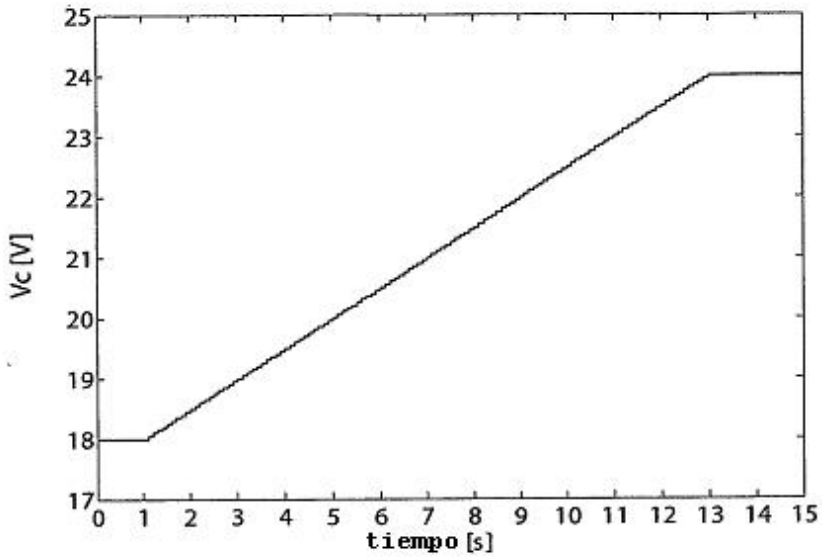

Vc [V]
tiempo [s]
25
24
23
22
21
20
19
18
17
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

Fig. 17

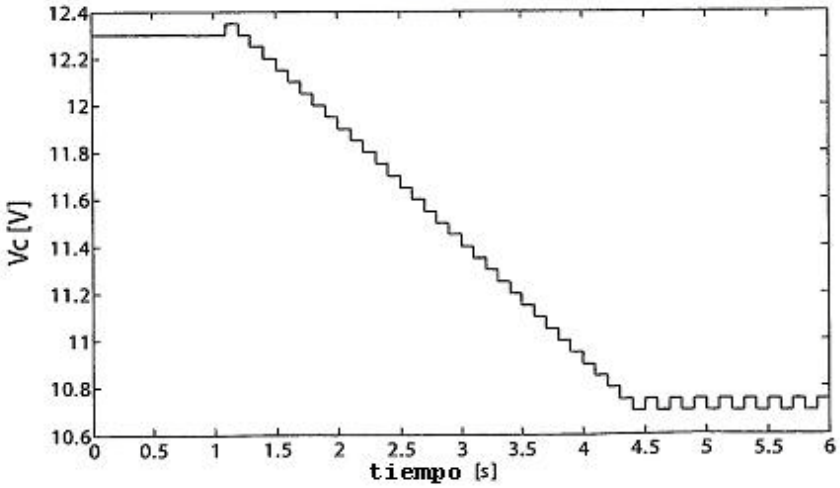
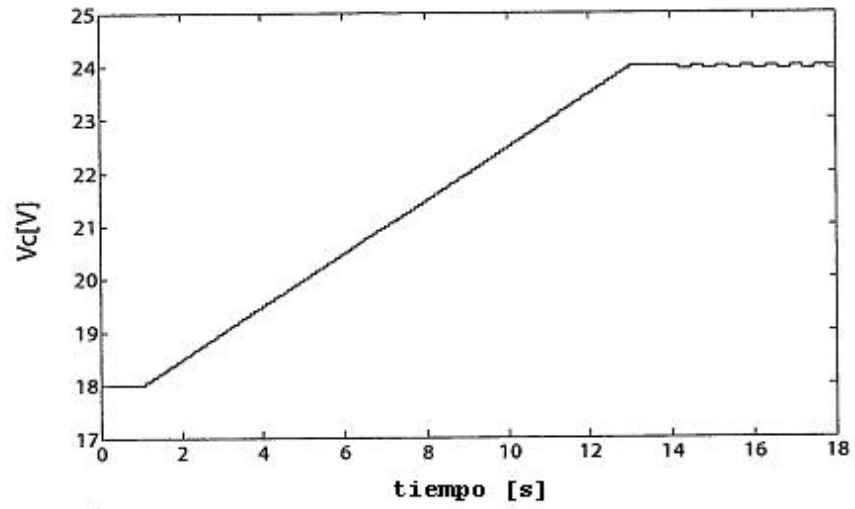
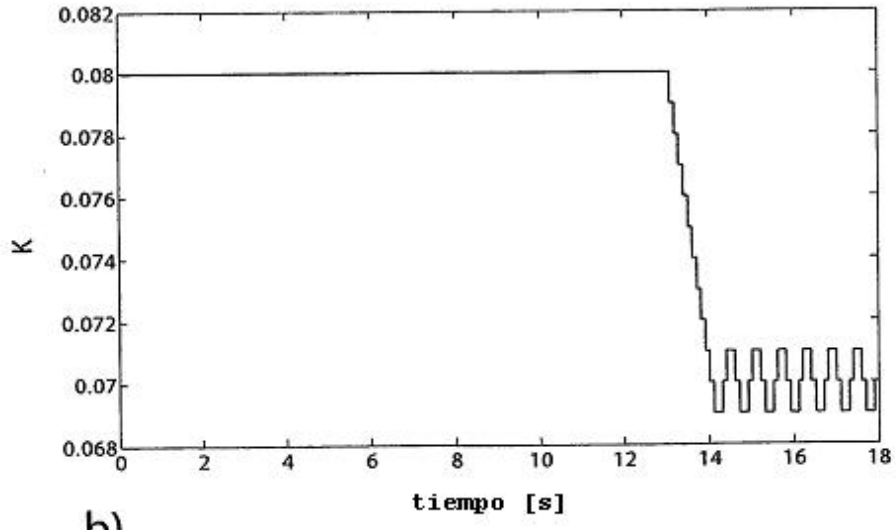

Vc [V]
tiempo [s]
12.4
12.2
12
11.8
11.6
11.4
11.2
11
10.8
10.6
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6

Fig. 21

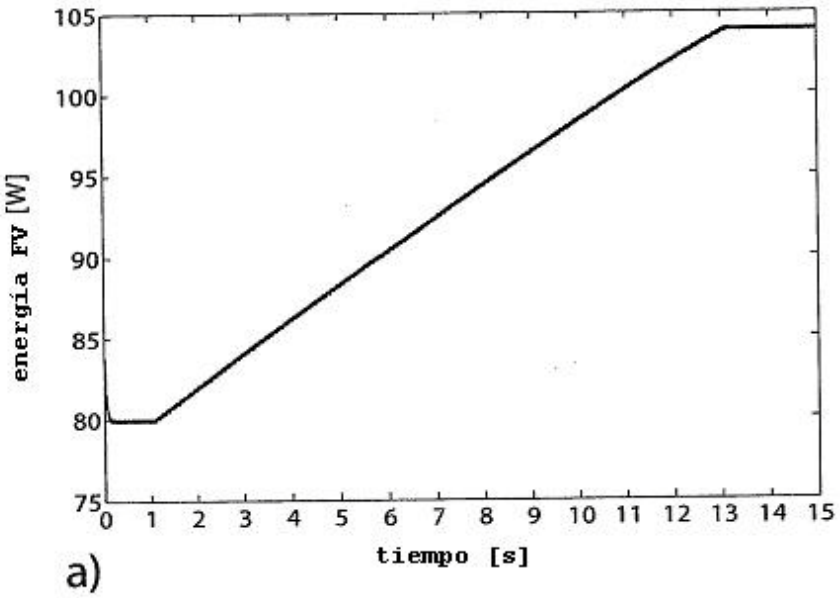


a)

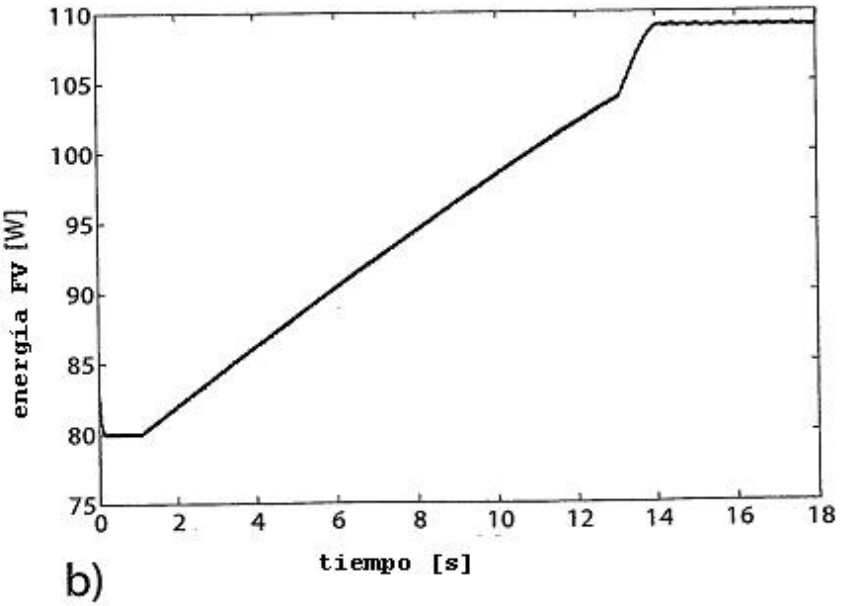


b)

Fig. 18


105
100
95
90
85
80
75
energía FV [W]
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
tiempo [s]

a)


110
105
100
95
90
85
80
75
energía FV [W]
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
tiempo [s]

b)

Fig. 19

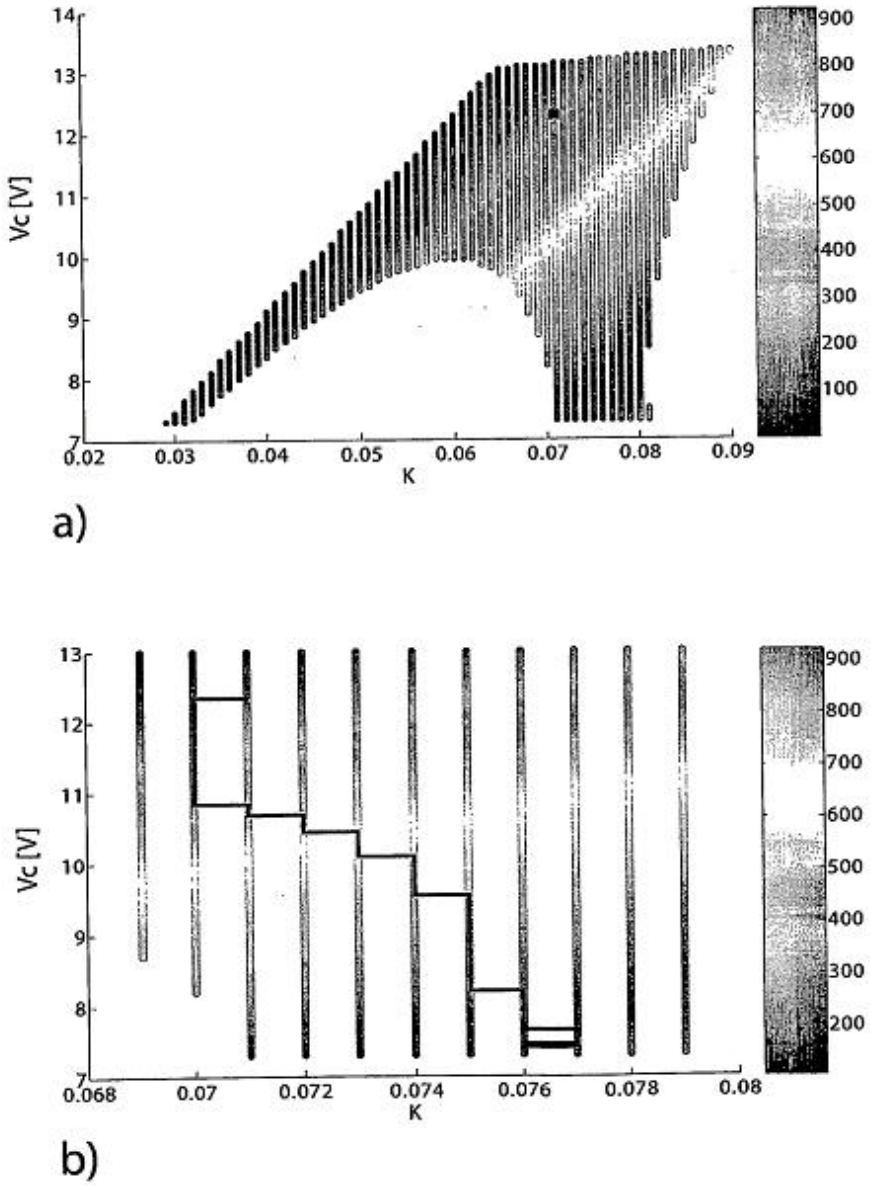
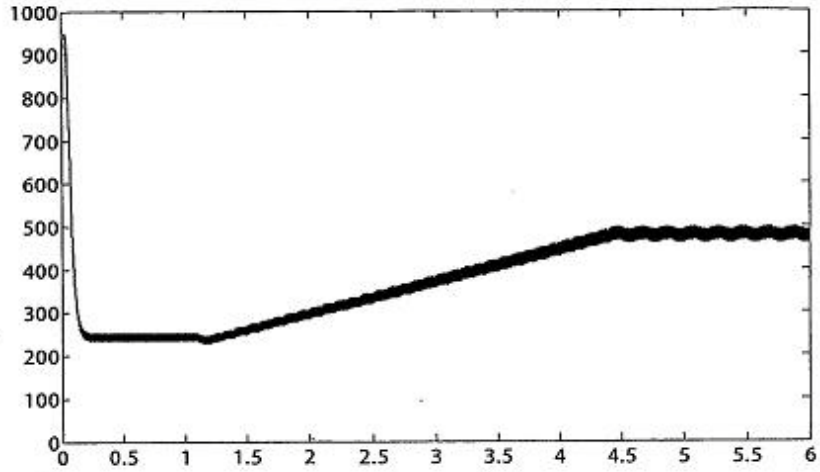
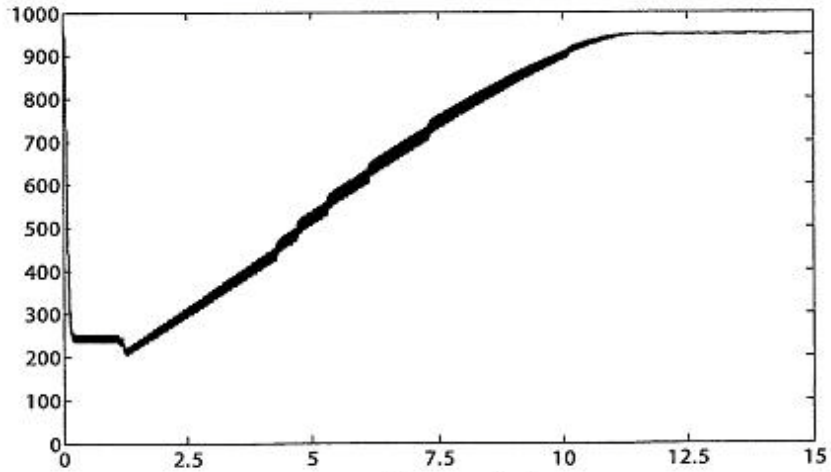


Fig. 20


1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5 5.5 6
tiempo [s]

a)


1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
0 2.5 5 7.5 10 12.5 15
tiempo [s]

b)

Fig. 22

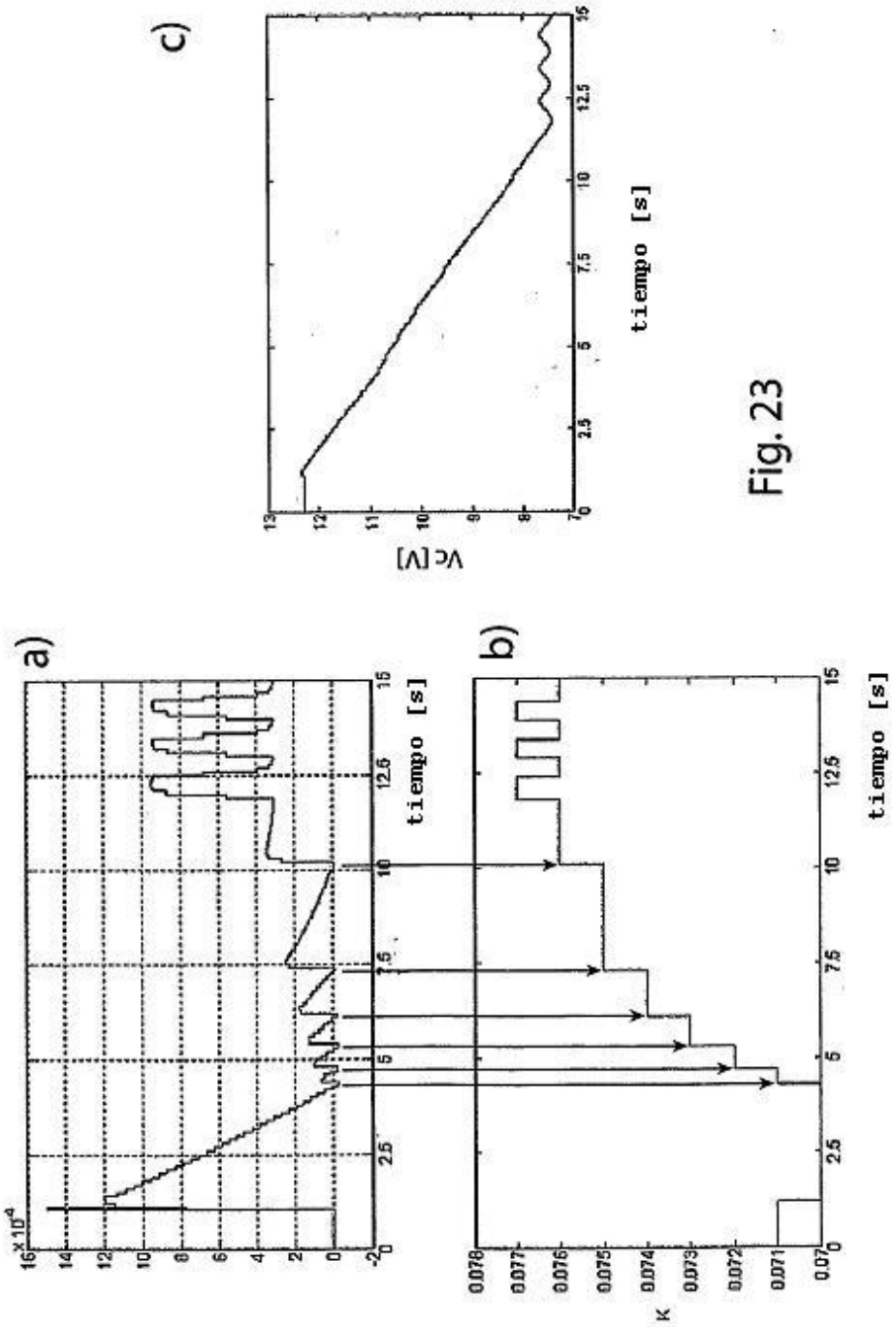


Fig. 23

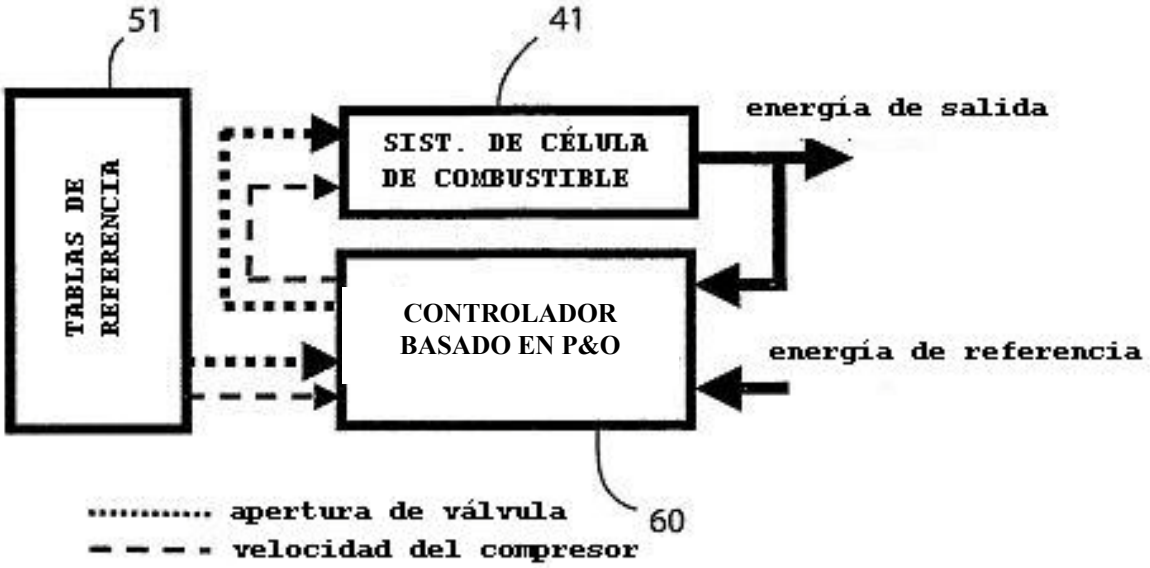

51
41
TABLAS DE REFERENCIA
SIST. DE CÉLULA DE COMBUSTIBLE
energía de salida
CONTROLADOR BASADO EN P&O
energía de referencia
60
apertura de válvula
velocidad del compresor

Fig. 24