(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 521 540**

(51) Int. CI.:

G01R 31/36 (2006.01)
H01M 8/04 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2010 E 10704376 (2)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.06.2014 EP 2401623**

(54) Título: **Procedimiento de caracterización de un sistema eléctrico mediante espectroscopia de impedancia**

(30) Prioridad:

24.02.2009 FR 0951165

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
12.11.2014

(73) Titular/es:

HELION (33.3%)
Domaine du Petit Arbois Bâtiment Jules Verne
B.P. 71
13545 Aix en Provence Cedex 4, FR;
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (INPT) (33.3%) y
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (33.3%)

(72) Inventor/es:

TURPIN, CHRISTOPHE;
RAKOTONDRAINIBE, ANDRÉ y
PHLIPPOTEAU, VINCENT

(74) Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de caracterización de un sistema eléctrico mediante espectroscopia de impedancia

Campo técnico

La presente invención se refiere al campo general de los sistemas eléctricos, y se refiere más especialmente a un procedimiento de caracterización de dicho sistema eléctrico mediante espectroscopia de impedancia.

El sistema eléctrico puede ser un dispositivo electroquímico, tal como una pila de combustible, un electrolizador, una batería primaria o recargable, incluso cualquier otro tipo de sistema eléctrico.

Estado de la técnica anterior

La espectroscopia de impedancia es una técnica de caracterización utilizada en numerosos campos técnicos.

A título ilustrativo, la espectroscopia de impedancia se utiliza en los campos de la corrosión, por ejemplo para estimar la tasa de corrosión de una pieza metálica, de electrodeposición, o incluso para la determinación de un estado de salud de un dispositivo electroquímico tal como una pila de combustible.

En este último caso, la técnica de la espectroscopia de impedancia se puede utilizar para detectar la obstrucción y la desecación de una pila de combustible, tal como lo describe el artículo de Fouquet et ál. titulado “Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via ac impedance measurements” y publicado en 2006 en el Journal of Power Sources, 159, 905-913.

Como se ha representado en la figura 1, se aplica una corriente ie a la pila 1, que presenta una secuencia de perturbaciones sinusoidales alrededor de un punto de polarización (figura 2). La corriente ie se aplica mediante una carga activa 2 que proporciona una corriente continua a la que se superponen dichas perturbaciones. La frecuencia de éstas se controla mediante un dispositivo de análisis de impedancia 3. Las perturbaciones presentan una amplitud reducida y cubren un amplio intervalo de frecuencias.

La tensión en respuesta a estas perturbaciones se mide en los terminales de la pila. El analizador de impedancia 3 da la evolución en el plano de Nyquist de la parte imaginaria de la impedancia en función de su parte real.

Las perturbaciones se aplican clásicamente de manera que barran un amplio intervalo de frecuencias, yendo desde las altas frecuencias hasta las bajas frecuencias, estando espaciadas las frecuencias de manera logarítmica. El intervalo de frecuencias puede ir desde algunos milihercios a algunas decenas de kilohercios.

De ese modo, la parte de las altas frecuencias es barrida muy rápidamente, mientras que para las bajas frecuencias, el tiempo de medición se convierte en no despreciable. Por ejemplo, es suficiente un segundo para pasar de 10 kHz a 500 Hz con aproximadamente cien puntos por década, mientras que son necesarios varios minutos para las mediciones de frecuencias inferiores a 1 Hz.

La explotación de los datos experimentales necesita que la pila permanezca estable durante el tiempo de aplicación de dichas perturbaciones, es decir que el valor medio de la corriente de polarización y de la tensión de respuesta permanezcan constantes en el tiempo.

Ahora bien, esta hipótesis no puede verificarse, particularmente durante degradaciones o fallos momentáneos del sistema eléctrico. A título de ejemplo, la desecación y el atascamiento de la pila de combustible del tipo PEM hace inestable la pila, lo que hace imposible el aprovechamiento de la medición de la impedancia.

El artículo de X. Yuan et ál. titulado “AC Impedance technique in PEM fuel cell diagnoses- A review” publicado en la revista International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 2007, páginas 4365-4380, describe un procedimiento de caracterización de una pila de combustible del tipo PEM, mediante espectroscopia de impedancia aplicando una secuencia de perturbaciones sinusoidales según un barrido de un intervalo de frecuencias.

La técnica actual de espectroscopia de impedancia presenta el inconveniente de no permitir identificar directamente, durante el barrido del intervalo de frecuencias, un cambio en la condición de estabilidad del sistema eléctrico.

Exposición de la invención

El objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento de caracterización del sistema eléctrico mediante espectroscopia de impedancia, que permita verificar simple y rápidamente la estabilidad de dicho sistema, durante el barrido del intervalo de frecuencias.

Para hacer esto, la invención tiene por objetivo un procedimiento de caracterización de un sistema eléctrico que

comprende las etapas que consisten en:

- aplicar a dicho sistema eléctrico una señal de entrada que comprende una secuencia de perturbaciones sinusoidales de corriente o de tensión, alrededor de un punto de polarización de dicho sistema eléctrico, teniendo cada perturbación una frecuencia diferente que pertenece a un conjunto principal de frecuencias;

- medir una señal de salida de dicho sistema eléctrico en respuesta a dicha señal de entrada para cada una de dichas perturbaciones aplicadas;

- estimar una magnitud característica de la impedancia de dicho sistema eléctrico para cada una de dichas perturbaciones aplicadas, caracterizando el conjunto de dichas estimaciones de la magnitud característica de la impedancia a dicho sistema eléctrico.

Según la invención, las perturbaciones de dicha secuencia se aplican de manera que se barra por turnos una pluralidad de subconjuntos de frecuencias extraídos de dicho conjunto principal, siendo cada uno de dichos subconjuntos (A^1, ..., A^n) un conjunto de frecuencias extraído del conjunto principal (A), siendo la intersección de dichos subconjuntos igual al conjunto vacío, estando cada subconjunto de dicha pluralidad entrelazado con al menos otro subconjunto de la misma pluralidad, de manera que comprenda al menos una frecuencia comprendida entre dos frecuencias consecutivas de dicho otro subconjunto con el que está entrelazado.

De ese modo, el hecho de que los subconjuntos de frecuencias estén entrelazados llega a formar una zona de envolvente entre dos subconjuntos considerados, contiguos o no uno del otro. Una discontinuidad en los valores de la impedancia situada en esta zona de envolvente pone directamente en evidencia la inestabilidad del sistema eléctrico estudiado. La condición de estabilidad del sistema eléctrico puede verificarse por lo tanto simple y rápidamente, durante el barrido del conjunto de frecuencias determinado.

Preferentemente, cada subconjunto de dicha pluralidad está entrelazado con todos los otros subconjuntos de la misma pluralidad.

Las perturbaciones de dicha secuencia se aplican de manera que se barran de manera monótona o aleatoria las frecuencias de cada subconjunto.

Las perturbaciones de dicha secuencia se aplican de manera que se barra de madera monótona, o aleatoria, dichos subconjuntos de frecuencias de dicha pluralidad.

Dicho sistema eléctrico puede ser cualquier dispositivo electroquímico, como, por ejemplo, un electrolizador o una pila de combustible.

La invención trata igualmente de un procedimiento de control de un sistema eléctrico tal como se define en la reivindicación 9.

Surgirán otras ventajas y características de la invención en la descripción detallada a continuación, no limitativa.

Breve descripción de los dibujos

Se describirán ahora, a título de ejemplos no limitativos, unos modos de realización de la invención, con referencia a los dibujos adjuntos, entre los que:

la figura 1, ya descrita, es una representación esquemática de una pila de combustible conectada a una fuente de corriente y a un analizador de impedancia;

la figura 2, ya descrita, es un gráfico que representa la aplicación de una perturbación de corriente a la pila de combustible de la figura 1, alrededor de un punto de polarización;

las figuras 3A y 3B son los gráficos que representan la evolución de la impedancia en función de las perturbaciones aplicadas, en caso de estabilidad (figura 3A) y de inestabilidad (figura 3B) del sistema eléctrico;

la figura 4 es un ejemplo de entrelazado de las frecuencias barridas mediante una secuencia de perturbaciones.

Exposición detallada de un modo de realización preferido

El sistema eléctrico es, en lo que sigue de la descripción, una pila de combustible del tipo de membrana de intercambio de protones.

El sistema eléctrico no está sin embargo limitado a una pila de combustible, sino que puede ser un electrolizador, una batería primaria o recargable, cualquier otro tipo de dispositivo electroquímico, así como cualquier sistema

eléctrico que pueda recibir o suministrar energía eléctrica.

La pila de combustible se conecta a un dispositivo de potencia que permita imponer una corriente eléctrica, tal como una carga activa o un convertidor estático de interfaz con una aplicación. La carga activa presenta una banda pasante que cubre al menos el conjunto de frecuencias a estudiar.

La pila se conecta a un dispositivo de análisis de impedancias. Éste puede ser un analizador de impedancias comercial, un ordenador que comprenda unas tarjetas síncronas de generación y de adquisición de corrientes y/o de tensión que pueda embarcarse o no.

Se aplica una secuencia de perturbaciones sinusoidales de corriente a la pila de combustible, alrededor de un punto de polarización.

El punto de polarización permanece, preferentemente, constante a todo lo largo de la aplicación de la secuencia de perturbaciones.

Cada perturbación comprende, preferentemente, algunos periodos para que se amortigüe un régimen transitorio eventual, después de algunos periodos, para el cálculo de la impedancia.

Cada perturbación tiene una frecuencia diferente, de manera que la secuencia de perturbaciones barra un conjunto principal A de frecuencias $A = \{f_1, f_2, ..., f_N\}$. Más precisamente, la secuencia de perturbaciones comprende al menos una perturbación para cada frecuencia del conjunto A.

El intervalo del conjunto principal A de frecuencias puede ir desde algunos milihercios a algunas decenas de kilohercios, y comprende N frecuencias a barrer, por ejemplo, un centenar de frecuencias.

La amplitud de las perturbaciones es suficientemente reducida para que la respuesta de la pila permanezca lineal. Para esto, la amplitud es sensiblemente inferior al 10% del valor de la corriente en el punto de funcionamiento considerado, y es preferentemente del orden de un porcentaje de este valor.

Un dispositivo de análisis de impedancia da la impedancia compleja de la pila para cada una de las frecuencias del conjunto principal A. Es posible entonces trazar la evolución de la parte imaginaria de la impedancia en función de la parte real en un plano de Nyquist.

Se ha de observar que, en el caso de que la señal de entrada sea la tensión en los bornes de la pila, el dispositivo de análisis de impedancia deduce la admitancia compleja de la pila, y no la impedancia compleja. La impedancia puede ser en cualquier caso fácilmente deducida de la admitancia.

Según la invención, las frecuencias de dicho conjunto principal A están distribuidas de manera que formen una pluralidad de subconjuntos $A^1, ..., A^n$ de frecuencias.

Por subconjunto $(A^1)_{i=1...n}$ de frecuencias, se entiende un conjunto de frecuencias extraídas, o resultantes, del conjunto principal A:

$$A^i = \left\{ f_j^i / f_j^i \in A \right\}$$

La reunión de subconjuntos $(A^1)_{i=1...n}$ corresponde al conjunto principal A de frecuencias:

$$A = \bigcup_{i=1}^{n} A^i$$

Preferentemente, cada subconjunto no contiene frecuencias en común con otros subconjuntos:

$$\bigcap_{i=1}^{n} A^i = \varnothing$$

Preferentemente, cada subconjunto $(A^i)_{i=1...n}$ de frecuencias comprende N^i frecuencias, de manera que la suma de las N^i frecuencias iguale el número N de frecuencias del conjunto principal A:

$$\sum_{i=1}^{n} N^i = N$$

Cada subconjunto A^i presenta un intervalo de frecuencias. Por intervalo G^i del subconjunto A^i, se entiende el

conjunto de las frecuencias del subconjunto considerado comprendido entre la frecuencia más alta y la frecuencia más baja de dicho subconjunto. De ese modo:

$$Gi = \left\{ f_j^i \middle| \forall j \in \left[1, N^i\right], f_{(\min)}^i \leq f_j^i \leq f_{(\max)}^i \right\}$$

con

$$f_{(\min)}^i = \min(A_i) \quad f_{(\max)}^i = \max(A_i)$$

Cada subconjunto A^i de dicha pluralidad de subconjuntos está entrelazado con al menos otro subconjunto Ai' de la misma pluralidad.

Por entrelazado de dos subconjuntos A^i y $A^{i'}$, se entiende la presencia de al menos una frecuencia de un primer subconjunto entre dos frecuencias consecutivas del segundo subconjunto.

Más precisamente, hay entrelazado entre los subconjuntos A^i y $A^{i'}$ tales que

$$A^i = \left\{ f_j^i \right\}_{j \in [1, N^i]} \text{ y } A^{i'} = \left\{ f_k^{i'} \right\}_{k \in [1, N^{i'}]}$$

si:

$$\exists j_0 \,/\, f_k^{i'} \leq f_{j_0}^i \leq f_{k+1}^{i'}$$

o si:

$$\exists k_0 \,/\, f_j^i \leq f_{k_0}^{i'} \leq f_{j+1}^{i'}$$

En el primer modo de realización de la invención, cada subconjunto está entrelazado con todos los otros subconjuntos de dicha pluralidad.

Cada subconjunto es recorrido por una secuencia de perturbaciones de manera monótona, en la misma dirección, preferentemente desde las altas frecuencias hacia las bajas frecuencias.

Además, dicha pluralidad de subconjuntos de frecuencias es recorrido de manera monótona. Por orden monótono, se entiende que la pluralidad de subconjuntos de frecuencias es recorrido de subconjunto en subconjunto contiguo, siguiendo una clasificación ordenada de subconjuntos. Preferentemente, dichos subconjuntos están clasificados siguiendo el orden decreciente de la frecuencia máxima de cada subconjunto.

A título de ejemplo, y como lo ilustran las figuras 3A y 3B, el conjunto principal A de frecuencias a barrer es de 2Hz a 10kHz, y comprende 12 frecuencias. También, el conjunto A es: A = {10kHz, 5kHz, 2kHz, 1kHz, 500Hz, 200Hz, 100Hz, 50Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz}.

Se forman tres subconjuntos A^1, A^2, A^3 a partir del conjunto principal A mediante el diezmado de una frecuencia de cada tres:

A^1 = {10kHz, 1kHz, 100Hz, 10Hz}

A^2 = {5kHz, 500Hz, 50Hz, 5Hz}

A^3 = {2kHz, 200Hz, 20Hz, 2Hz}

Según este modo de realización, cada subconjunto de frecuencias presenta al menos una frecuencia comprendida entre dos frecuencias consecutivas de otro subconjunto. Hay entonces un entrelazado entre cada uno de los tres subconjuntos, y no solamente entre dos subconjuntos contiguos.

De ese modo, en lugar de aplicar la secuencia de perturbaciones de manera que se barran de modo continuo las N frecuencias del conjunto principal A, como en la solución clásica de la técnica anterior descrita anteriormente, la secuencia de perturbaciones recorre por turnos los tres subconjuntos de frecuencias.

La secuencia de perturbaciones recorre sucesivamente, preferentemente, las frecuencias del subconjunto A^1 posteriormente las del subconjunto A^2, etc.

De ese modo, entrelazando dichos subconjuntos, el procedimiento permite conocer rápidamente si el sistema ha permanecido estable durante la duración de las mediciones.

En efecto, en caso de inestabilidad de la pila de combustible, durante la aplicación del subconjunto A^i, los puntos experimentales de la impedancia para las frecuencias de este subconjunto no se sitúan en la continuidad de los puntos correspondientes a la impedancia medida para el subconjunto precedente A^{i-1}.

Por ejemplo, como lo ilustran las figuras 3A y 3B, la aplicación de perturbaciones que barran el subconjunto A^1 permite obtener los valores de la impedancia $Z(A^1)$ para las frecuencias consideradas: Z(10 kHz), Z(1 kHz), Z(100 Hz),...

Los valores de la impedancia $Z(A^2)$ para las frecuencias del subconjunto A^2 deberían situarse, si la pila ha estado estable en el tiempo de la medición, en continuidad con las de $Z(A^1)$. Como lo muestra la figura 3A (pila estable), los valores de la impedancia para cada subconjunto de frecuencias se sitúan de modo continuo a lo largo de una curva dada (trazado continuo).

Si la pila se convierte en inestable entre los subconjuntos A^1 y A^2, surge una discontinuidad entre $Z(A^1)$ y $Z(A^2)$ en la zona de la envolvente entre los intervalos de estos dos subconjuntos. La figura 3B ilustra esta discontinuidad. Los valores de $Z(A^2)$ se colocan sobre una curva (trazado de puntos) diferente a la de $Z(A^1)$ (trazado continuo). La discontinuidad surge desde el primer valor de $Z(A^2)$ correspondiente a la primera frecuencia aplicada del subconjunto A^2.

Se puede evaluar simplemente la discontinuidad en la zona de envolvente considerada. De ese modo, se sitúa una primera frecuencia f^1_i de un primer subconjunto A^1 entre dos frecuencias consecutivas f^2_i y f^2_{i+1} de un segundo subconjunto A^2. El primer y segundo subconjuntos A^1 y A^2 están por tanto entrelazados.

Se calcula un valor de la impedancia para la primera frecuencia $Z_{int}(f^1_i)$ a partir de las impedancias que corresponden a dos frecuencias $Z(f^2_i)$ y $Z(f^2_{i+1})$ del segundo subconjunto. Este cálculo se puede realizar, por ejemplo, mediante interpolación lineal, cúbica (por “spline” cúbica) o polinomial.

Se calcula a continuación una desviación entre el valor de la impedancia estimada para la primera frecuencia $Z(f^1_i)$ y el valor de la impedancia obtenida mediante interpolación $Z_{int}(f^1_i)$.

Se compara finalmente la desviación calculada con una desviación de umbral predeterminada. Cuando esta desviación sobrepasa la desviación de umbral, se deduce una inestabilidad de la pila de combustible.

De ese modo, la secuencia de perturbaciones permite saber rápidamente si el sistema ha permanecido estable durante la duración de las mediciones.

Además, el hecho de requerir de nuevo las altas frecuencias, en este caso al comienzo de cada subconjunto, permite localizar eventuales fenómenos físicos rápidos a todo lo largo de la medición.

Por supuesto, este ejemplo no se da más que a título ilustrativo. Es posible incrementar o disminuir el número de subconjuntos, y por tanto disminuir o, respectivamente, incrementar el número de frecuencias en cada subconjunto.

Por ejemplo, para un conjunto principal que comprenda 400 frecuencias, la secuencia de perturbaciones puede recorrer una veintena de subconjuntos de frecuencias que comprenda cada uno una veintena de frecuencias.

Según un segundo modo de realización de la invención, cada subconjunto A^i de frecuencias no está entrelazado más que con el o los subconjunto(s) contiguo(s) A^{i-1} y A^{i+1}. Con la excepción de esta diferencia, el segundo modo de realización permanece similar al primer modo.

A título de ejemplo para el conjunto principal siguiente A = {10kHz, 5kHz, 2kHz, 1kHz, 500Hz, 200Hz, 100Hz, 50Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz}, los subconjuntos pueden ser:

A^1 = {10kHz, 2kHz}

A^2 = {5kHz, 500Hz}

A^3 = {1kHz, 100Hz}

A^4 = {200Hz, 20Hz}

A^5 = {50Hz, 5Hz}

A^6 = {10Hz, 2Hz}

La secuencia de perturbaciones barre los subconjuntos por turnos, siguiendo el orden decreciente de las frecuencias más altas, como en la figura 4 que ilustra un ejemplo de entrelazado de las frecuencias para el segundo modo de realización de la invención.

De ese modo, la secuencia de las perturbaciones presenta un movimiento que presenta una sucesión de idas y vueltas, mientras se va progresivamente desde las altas frecuencias hacia las bajas frecuencias.

Como se ha descrito anteriormente, en caso de inestabilidad de la pila, surge una discontinuidad en los valores de la impedancia en unas zonas de envolvente entre subconjuntos contiguos.
Esta discontinuidad se puede aprovechar para diagnosticar un fallo naciente, como por ejemplo un desecado o un atascamiento de una pila de combustible, y conducir a una retroalimentación para el control y mando de la pila de combustible.

Para los diferentes modos de realización descritos anteriormente, las frecuencias de cada subconjunto A^i pueden ser barridas, no de manera monótona, sino aleatoria, por dicha secuencia de perturbaciones.

De la misma manera, dicha pluralidad de subconjuntos de frecuencias A^1, ..., A^n puede ser recorrido de manera aleatoria por dicha secuencia de perturbaciones.

Se ha de observar que una espectroscopia entrelazada, cualesquiera que sean los modos de realización descritos anteriormente, presenta un resultado idéntico, cuando la pila permanece estable, al de una espectroscopia clásica.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de caracterización del sistema eléctrico que comprende unas etapas que consisten en:

- aplicar a dicho sistema eléctrico una señal de entrada que comprende una secuencia de perturbaciones sinusoidales de corriente o de tensión, alrededor de un punto de polarización de dicho sistema eléctrico, teniendo cada perturbación una frecuencia diferente que pertenece a un conjunto principal (A) de frecuencias,

- medir una señal de salida de dicho sistema eléctrico en respuesta a dicha señal de entrada para cada una de dichas perturbaciones aplicadas,

- estimar una magnitud característica de la impedancia de dicho sistema eléctrico para cada una de dichas perturbaciones aplicadas, caracterizando el conjunto de dichas estimaciones de la magnitud característica de la impedancia a dicho sistema eléctrico, aplicándose las perturbaciones de dicha secuencia de manera que se barra por turnos una pluralidad de subconjuntos (A^1, ..., A^n) siendo cada uno de dichos subconjuntos (A^1, ..., A^n) un conjunto de frecuencias extraído del conjunto principal (A), estando cada subconjunto de dicha pluralidad de subconjuntos entrelazado con al menos otro subconjunto de la misma pluralidad de manera que comprenda al menos una frecuencia comprendida entre dos frecuencias consecutivas de dicho otro subconjunto con el que está entrelazado;

estando el procedimiento caracterizado porque la intersección de dichos subconjuntos es igual al conjunto vacío.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque cada subconjunto de dicha pluralidad está entrelazado con todos los otros subconjuntos de la misma pluralidad

3. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado porque las perturbaciones de dicha secuencia se aplican de manera que se barran de manera monótona las frecuencias de cada subconjunto (A^i).

4. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizado porque las perturbaciones de dicha secuencia se aplican de manera que se barran de manera aleatoria las frecuencias de cada subconjunto (A^i).

5. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque los subconjuntos se clasifican siguiendo un orden determinado, siendo aplicadas las perturbaciones de dicha secuencia de manera que se barran de manera monótona dichos subconjuntos (A^1, ..., A^n) de dicha pluralidad.

6. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque los subconjuntos se clasifican siguiendo un orden determinado, siendo aplicadas las perturbaciones de dicha secuencia de manera que se barran de manera aleatoria dichos subconjuntos (A^1, ..., A^n) de dicha pluralidad.

7. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado porque comprende las etapas ulteriores que consisten en:

- calcular una desviación entre la estimación de dicha magnitud característica de la impedancia para una primera frecuencia de un primer subconjunto de dicha pluralidad de subconjuntos por un lado, y un valor obtenido por interpolación, para la misma primera frecuencia, de las estimaciones de dicha magnitud característica para dos frecuencias consecutivas de un segundo subconjunto de la misma pluralidad por otro lado, entre las que dicha primera frecuencia está situada;

- detectar una inestabilidad del sistema eléctrico cuando dicha desviación calculada sobrepasa una desviación de umbral predeterminada.

8. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque dicho sistema eléctrico es una pila de combustible.

9. Procedimiento de control de un sistema eléctrico, caracterizado porque comprende:

- la realización del procedimiento de caracterización según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, para caracterizar dicho sistema eléctrico mediante el conjunto de dichas estimaciones de la magnitud característica de la impedancia; y posteriormente

- la medición de una desviación entre al menos una de dichas estimaciones de la magnitud característica de la impedancia de dicho sistema eléctrico y al menos un valor de referencia de dicha magnitud; y posteriormente

- la aplicación de una orden a dicho sistema eléctrico cuando dicha desviación medida sobrepasa una desviación de umbral predeterminada.

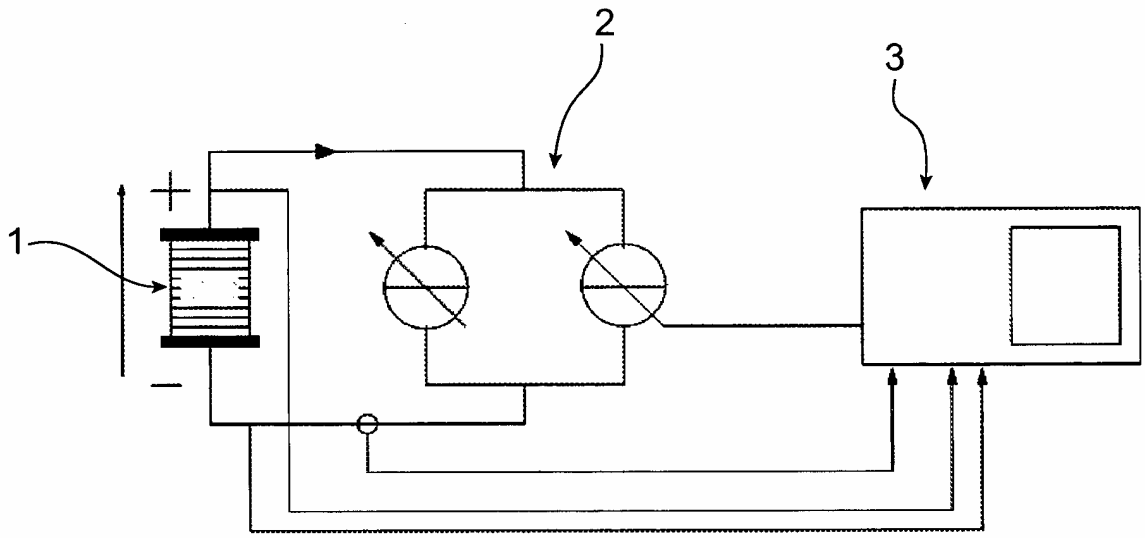

FIG. 1

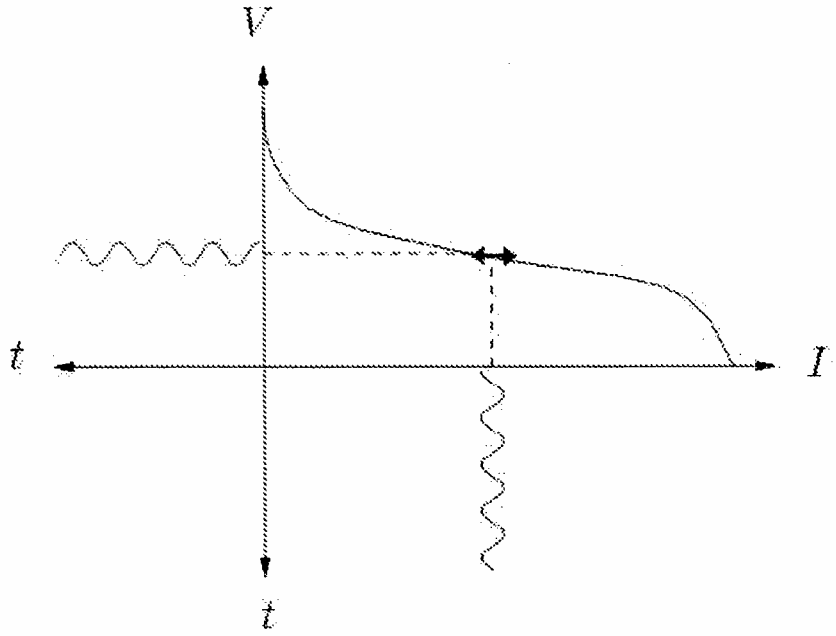

FIG. 2

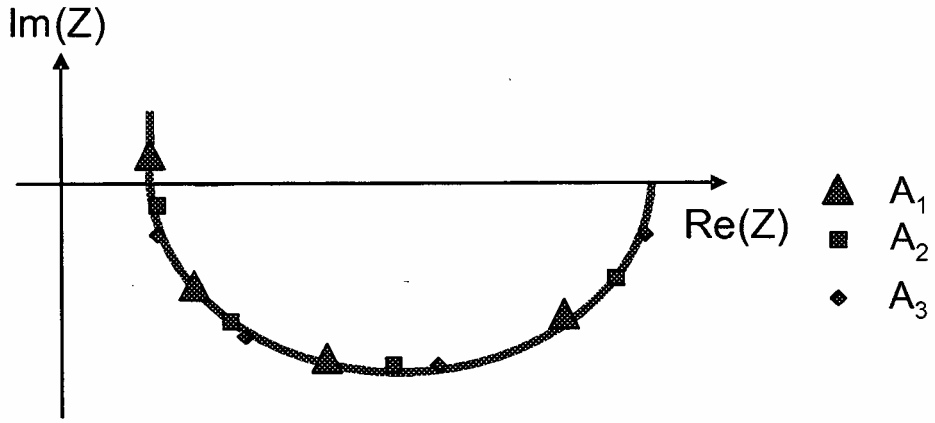

FIG. 3A

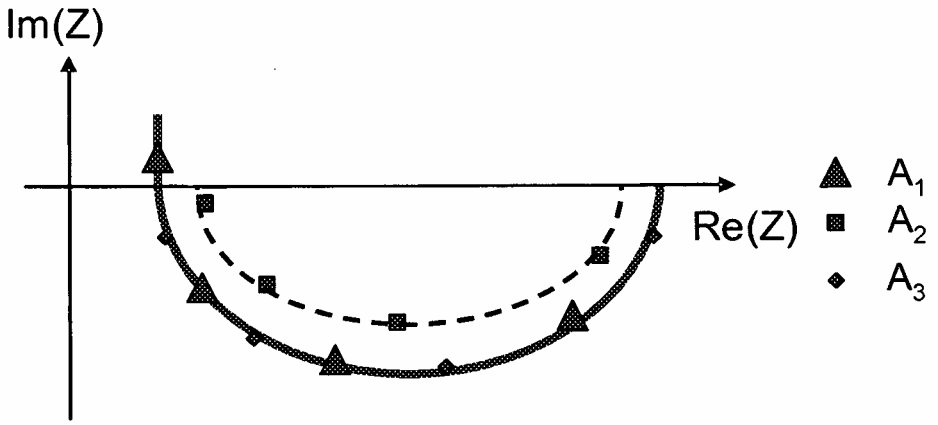

FIG. 3B

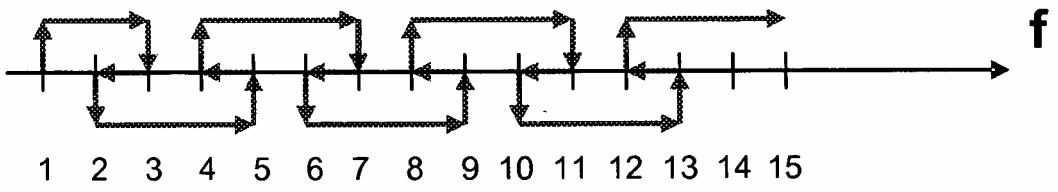

FIG. 4