

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 755 849**

51 Int. Cl.:

H02S 50/00 (2014.01)

H02S 50/10 (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.12.2016 PCT/EP2016/079469**

87 Fecha y número de publicación internacional: **08.06.2017 WO17093423**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.12.2016 E 16806042 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2019 EP 3384595**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de evaluación de la energía producida por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica**

30 Prioridad:

01.12.2015 FR 1561623

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

23.04.2020

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)
25, Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"
75015 Paris , FR y
SOCOMEK (50.0%)**

72 Inventor/es:

**CHAITREUIL, NICOLAS y
SIAT, STÉPHANE**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 755 849 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo de evaluación de la energía producida por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica

5 **Campo técnico de la invención**

La invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo de evaluación de la energía producida por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica. Se refiere también a una instalación fotovoltaica equipada con dicho dispositivo.

10 **Estado de la técnica**

Las instalaciones fotovoltaicas pueden ser propensas a alojar arcos eléctricos. Los documentos X. Yao y col., Applied Power Electronics Conference and Exhibition, 2012, Twenty-seventh annual IEEE, 1720-1727, XP032127899A, y K. Koziz y col., IEEE Transactions on Power Delivery, V. 28, nº 3, 1584-1591, (2013), describen sistemas de evaluación para instalaciones fotovoltaicas.

Un arco eléctrico puede producirse en caso de fallo del conductor o en caso de conexión defectuosa (por ejemplo, después de la apertura de un conector en carga o debido a la corrosión de un conductor). Se origina por la acción de un plasma que aparece entre dos electrodos. Estos pueden estar formados por los dos extremos de un conductor o por dos partes de un conector abierto o interrumpido localmente (debido, por ejemplo, a una corrosión). La aparición de un arco eléctrico se acompaña de un frente o salto positivo de tensión de breve duración, del orden de unos microsegundos. La tensión de arco inicial V_{arco0} tiene un valor que es característico de la aparición de un arco eléctrico y que depende del material de los electrodos. En general está comprendida entre 10 V y 30 V. Por ejemplo, en el caso de electrodos de cobre, la tensión de arco inicial V_{arco0} es del orden de 20 V. El plasma del arco eléctrico desempeña el papel de una resistencia que aumenta en el curso del tiempo. Por tanto, el frente de tensión inicial se sigue generalmente de un aumento progresivo de la tensión de arco que puede llegar a alcanzar una tensión en circuito abierto.

Las instalaciones fotovoltaicas tienen la característica de que funcionan en corriente y tensión eléctricas continuas, lo que puede resultar problemático cuando aparece un arco eléctrico relacionado con un fallo. De hecho, en corriente y tensión continuas, no existe extinción natural del arco eléctrico por el paso por cero de la tensión y de la corriente, como sucede en corriente alterna. Como consecuencia, un arco eléctrico relacionado con un fallo es susceptible de generar un plasma que libera un calor muy intenso durante un tiempo importante y que produce por tanto mucha energía en una instalación fotovoltaica. Dicho plasma es destructivo y puede provocar un conato de incendio. Por motivos de seguridad, es indispensable así detectar la presencia de un posible arco eléctrico en una instalación fotovoltaica e interrumpirlo en un tiempo útil con el fin de evitar cualquier degradación o conato de incendio. Para este fin, la instalación fotovoltaica está equipada con un dispositivo de detección de arco, o detector de arco. Este está asociado en general con un dispositivo de intervención o de extinción de arco, destinado a intervenir para interrumpir el arco eléctrico e impedir cualquier degradación o conato de incendio.

Un arco eléctrico puede producirse igualmente, en funcionamiento normal, en un elemento electromagnético de control y/o de protección, en la apertura o en el cierre de contactos o polos. Por ejemplo, en la apertura, un interruptor seccionador genera un arco eléctrico de una duración inferior o igual a una duración máxima conocida. Los medios de extinción de arco permiten generalmente interrumpir el arco de manera que no perdure más allá de una duración de arco máxima predefinida.

Existen diversos procedimientos, algunos de ellos muy rápidos, que permiten detectar la presencia de un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica. En caso de arco eléctrico relacionado con la apertura en carga de un interruptor seccionador u otro elemento electromecánico, esta acción conlleva el riesgo de provocar una detección positiva de arco seguida de una parada intempestiva de la instalación fotovoltaica, lo cual no es conveniente.

Por otra parte, un arco eléctrico relacionado con un fallo en la instalación fotovoltaica puede tener una duración comprendida entre algunos microsegundos y varios minutos, e incluso varias horas en ciertas condiciones especiales. Por ejemplo, en el caso de un arco eléctrico discontinuo compuesto por una sucesión de microarcos de duraciones breves, separados por periodos sin arco, cada microarco a priori no es peligroso en sí mismo, aunque la energía acumulada por la sucesión de estos microarcos puede volverse crítica para el entorno y/o la instalación con el curso del tiempo.

Por los motivos que acaban de exponerse parece útil evaluar el nivel de energía eléctrica generado por un arco eléctrico, con el objetivo sobre todo de apreciar su peligrosidad para la instalación fotovoltaica y/o el entorno.

Objeto de la invención

Para este fin, la invención se refiere a un procedimiento de evaluación de la energía eléctrica producida por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica que comprende las etapas siguientes:

A) Medida de una señal de tensión eléctrica en los bornes de al menos un módulo fotovoltaico de la instalación con una frecuencia de muestreo superior o igual a 50 kHz y, a partir de la señal de tensión medida:

- 5 o Determinación de una tensión inicial antes de la aparición del arco;
 o Determinación de los valores de tensión durante el arco eléctrico;

B) Evaluación de los valores de corriente eléctrica producida por la instalación fotovoltaica durante el arco eléctrico;
 C) Integración en el tiempo del producto de los valores de tensión de arco iguales a la diferencia entre los valores de tensión durante el arco y la tensión inicial, determinados durante la etapa A), por valores de corriente evaluados durante la etapa B), con el fin de determinar la energía del arco.

Según la invención, la energía de arco, es decir, la energía eléctrica generada por un arco eléctrico que se produce en la instalación fotovoltaica, se evalúa de forma sencilla a partir de la tensión en los bornes de uno o varios módulos fotovoltaicos de la instalación, medida con una frecuencia de muestreo elevada.

En una realización en particular, para evaluar un valor de corriente durante el arco, se determina una corriente eléctrica inicial antes del arco eléctrico y se resta a dicha corriente inicial un valor de tensión de arco, igual a la diferencia entre un valor de tensión determinado durante la etapa A) y la tensión inicial, multiplicado por la relación entre la amplitud de un salto de corriente relacionado con la aparición del arco y la amplitud de un salto de tensión relacionado con la aparición del arco. Así, después de la aparición del arco, se considera que la corriente varía de forma lineal en función de la tensión. Ventajosamente, la amplitud del salto de corriente es igual a un porcentaje predefinido del x % de la corriente inicial, estando x comprendido entre el 6 % y el 8 %, en particular igual al 7 %.

El valor del salto de tensión puede estar predefinido y comprendido entre 12 V y 35 V, por ejemplo, igual a 20 V.

En una variante de realización, los valores de corriente durante el arco evaluados son valores medidos con una frecuencia de muestreo inferior o igual a 1 Hz.

Ventajosamente, el procedimiento comprende una etapa de descomposición de la señal de tensión en una pluralidad de ventanas de adquisición, conteniendo cada ventana un número N_f de puntos de adquisición correspondiente a valores de tensión muestreados, y, para cada ventana de adquisición, una etapa de determinación de un valor medio de la tensión medida en dicha ventana.

Más ventajosamente, la tensión inicial se determina antes de la aparición del arco calculando una media de una pluralidad de valores medios de tensión relativos a una pluralidad de ventanas de adquisición antes del arco eléctrico.

En una primera realización en particular, los valores de tensión determinados durante el arco eléctrico son iguales a valores medios de tensión relativa a una sucesión de ventanas de adquisición.

En una segunda realización en particular, se calcula:

- una tensión de arco media V_{arctot} , calculando la media de una pluralidad de valores de tensión de arco determinados relativos a una pluralidad n de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico,
- una corriente media I_{arctot} durante el arco eléctrico, calculando la media de una pluralidad de valores de corriente evaluados para la pluralidad n de ventanas de adquisición;
- la energía total producida por el arco E_{arctot} por medio de la relación: $E_{arctot} = V_{arctot} \times I_{arctot} \times n \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$ en la que n , F_{ech} y N_f representan respectivamente el número de ventanas de adquisición durante el arco, la frecuencia de muestreo de la tensión medida y el número de puntos de adquisición en una ventana de adquisición.

En una tercera realización, se calcula:

- la energía de arco producida por el arco durante cada ventana de adquisición de índice $arcj$ por medio de la relación $E_{Farcj} = V_{arcj} \times I_{Farcj} \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$ en la que V_{arcj} , I_{Farcj} , F_{ech} y N_f representan respectivamente una tensión de arco media calculada para la ventana de índice $arcj$, una corriente media evaluada para la ventana de índice $arcj$, la frecuencia de muestreo de la tensión medida y el número de puntos de adquisición en una ventana de adquisición;
- la energía total producida por el arco E_{arctot} realizando la suma de las energías de arco producidas en una pluralidad n de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico.

Ventajosamente, en el caso de un arco eléctrico discontinuo que incluye una pluralidad de microarcos, se determina la energía de cada microarco eléctrico, y a continuación se realiza la suma de las energías respectivas de los microarcos eléctricos con el fin de determinar la energía del arco eléctrico discontinuo.

Más ventajosamente, el procedimiento comprende una etapa de comparación de la energía del arco eléctrico determinada con un umbral de energía y una etapa de protección en caso de superación de dicho umbral.

La invención se refiere también a un dispositivo de evaluación de la energía liberada por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica caracterizado porque comprende:

- 5 - un módulo de obtención de una señal de tensión eléctrica medida en los bornes de al menos un módulo fotovoltaico de la instalación con una frecuencia de muestreo superior o igual a 50 kHz;
- un módulo de determinación de una corriente eléctrica inicial producida por la instalación fotovoltaica antes de la aparición del arco;
- un módulo de tratamiento de la señal de tensión adaptado para determinar, a partir de la señal de tensión medida:

- 10
 - o una tensión inicial antes de la aparición del arco;
 - o valores de tensión durante el arco eléctrico;

- un módulo de evaluación de los valores de corriente eléctrica producida por la instalación fotovoltaica durante el arco eléctrico;

- 15 - un módulo de integración en el tiempo del producto de los valores de tensión de arco iguales a la diferencia entre los valores de tensión durante el arco y la tensión inicial determinados por el módulo de tratamiento, por valores de corriente evaluados por el módulo de evaluación, con el fin de determinar la energía del arco.

20 La invención se refiere además a un sistema de seguridad para una instalación fotovoltaica, caracterizado porque comprende un dispositivo de detección de un arco eléctrico, un dispositivo de evaluación de la energía eléctrica producida por un arco eléctrico detectado, tal como se define anteriormente, y un dispositivo de intervención destinado a proteger la instalación fotovoltaica.

25 La invención se refiere finalmente a una instalación fotovoltaica que incluye dicho sistema de seguridad.

Breve descripción de los dibujos

30 La invención se comprenderá mejor con la ayuda de la descripción siguiente de una realización en particular del procedimiento y del dispositivo de evaluación de la energía eléctrica producida o generada por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica, de un sistema de seguridad para instalación fotovoltaica que integra dicho dispositivo de evaluación y de una instalación fotovoltaica equipada con este sistema de seguridad, en referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- 35 - La figura 1 representa un esquema de una instalación fotovoltaica según un ejemplo de realización de la invención;
- La figura 2 representa un ejemplo de señal medida de la tensión eléctrica en los bornes de uno o varios módulos fotovoltaicos de la instalación de la figura 1, que integra un salto de tensión relacionado con la aparición de un arco eléctrico y descompuesto en ventanas de adquisición;
- La figura 3 representa un segundo ejemplo de una señal de tensión eléctrica en los bornes de uno o varios módulos fotovoltaicos de la instalación de la figura 1, que integra un salto de tensión relacionado con la aparición de un arco eléctrico discontinuo;
- 40 - La figura 4 representa un ejemplo de la característica corriente-tensión de un módulo fotovoltaico de la instalación de la figura 1 y la curva correspondiente de potencia en función de la tensión;
- La figura 5 representa un organigrama de las etapas del procedimiento de evaluación, según una realización en particular de la invención;
- 45 - La figura 6 representa un diagrama de bloques funcional del dispositivo de evaluación según una realización en particular de la invención, adaptado para implementar el procedimiento de la figura 5.

Descripción detallada de realizaciones particulares de la invención

50 La invención pretende evaluar la energía eléctrica generada o producida por un arco eléctrico que se produce en una instalación fotovoltaica 100.

55 En la figura 1, se ha representado esquemáticamente un ejemplo de instalación fotovoltaica 100 capaz de producir una corriente continua I. Este comprende, de forma conocida, varios módulos fotovoltaicos (PV) 1 conectados con un ondulador 2. Los módulos PV 1 son en este caso idénticos. Los módulos PV1 pueden montarse en serie, en paralelo o combinando ambos modos. Una cadena de módulos PV montados en serie se denomina «string». Por ejemplo, tal como se representa en la figura 1, la instalación 100 comprende varios strings, o cadenas, de m módulos PV 1, conectados en paralelo. El ondulador 2 está preparado para convertir la corriente continua I producida por los módulos fotovoltaicos 1 en una corriente alterna y para suministrarla a una red eléctrica 3.

60 El procedimiento de la invención persigue evaluar la energía eléctrica producida por un arco eléctrico cuya presencia es detectada en una instalación fotovoltaica 100.

65 Un arco eléctrico puede estar relacionado con un fallo y producirse en cualquier lugar de la instalación 100, por ejemplo, entre los módulos fotovoltaicos 1 y el ondulador 2 (tal como se representa mediante el arco eléctrico 4 en la figura 1), o en un módulo fotovoltaico 1, o incluso en un enlace que conecta en serie varios módulos fotovoltaicos 1

(tal como se representa mediante el arco eléctrico 4' en la figura 1). Un arco eléctrico puede producirse igualmente en un funcionamiento normal de la instalación 100, en un elemento electromecánico, por ejemplo, en un interruptor seccionador (no representado en la figura 1), en la apertura en carga de sus contactos. En este caso, el elemento está dotado de medios de extinción de arco que permiten extinguir rápidamente el arco eléctrico.

Un arco eléctrico, ya esté o no relacionado con un fallo, provoca una variación importante de tensión en la instalación eléctrica 100. De hecho, la aparición del arco eléctrico se caracteriza por un frente o salto positivo de tensión, de una duración del orden de varios microsegundos y de una amplitud igual a una tensión de arco inicial V_{arc0} característica. El valor de esta tensión de arco inicial V_{arc0} está comprendido normalmente entre 12 V y 35 V. Depende del material que constituye los electrodos entre los que se forma el arco eléctrico. Por ejemplo, si los electrodos son de cobre, la tensión de arco inicial V_{arc0} es igual, o sustancialmente igual, a 20 V.

Cuando aparece un arco eléctrico en la instalación fotovoltaica 100, ya se trate de un arco eléctrico relacionado con un fallo (por ejemplo, el arco 4 o 4') o de un arco eléctrico relacionado con la apertura en carga del interruptor seccionador, la tensión en los bornes de cada módulo fotovoltaico 1, o de una cadena (o «string») de m módulos 1 en serie, aumenta bruscamente debido a la tensión de arco inicial V_{arc0} (en la hipótesis de que el arco se produce en el exterior del o de los módulos considerados). La tensión en los bornes de un string de m módulos aumenta en V_{arc0} y la tensión en los bornes de cada módulo del string aumenta en V_{arc0}/m . Si m fuera igual a 20, la aparición del arco eléctrico provocaría un aumento de 1 V de la tensión en los bornes de cada módulo PV 1. Este salto de tensión origina una variación del punto de funcionamiento de los módulos PV 1 y/o del string. Como consecuencia, la corriente I producida por la instalación fotovoltaica disminuye bruscamente en un valor ΔI_{arc0} , como se desprende de la figura 4. Este valor ΔI_{arc0} depende de la posición del punto de funcionamiento en la curva corriente-tensión, o curva característica I-V, del o de los módulos fotovoltaicos. En la figura 4, se ha representado un salto de tensión V_{arc0} de 20 V en los bornes de un «string» de varios módulos fotovoltaicos 1, que funcionan en el punto MPP de potencia máximo, y el salto de corriente ΔI_{arc0} correspondiente, provocados por la aparición de un arco eléctrico.

En la figura 2, se ha representado un primer ejemplo de una señal de tensión eléctrica V , en los bornes de uno o varios módulos PV 1 de la instalación fotovoltaica 100 y medido por un sensor de medida de tensión 5. Esta señal integra un salto de tensión positivo relacionado con la aparición de un arco eléctrico continuo de larga duración provocado por un fallo. La señal de tensión se descompone en una sucesión de ventanas de adquisición denotadas como:

- F_i , con $1 \leq i \leq N$, antes de la aparición del arco, y
- $F_{\text{arc}j}$, con $1 \leq j \leq n$, que se cuenta desde la aparición del arco, siendo n el número de ventanas simultáneas en el arco.

En la figura 3, se ha representado un segundo ejemplo de una señal de tensión eléctrica V , producida por la instalación fotovoltaica 100 y medida por un sensor de medida de tensión. La señal integra un salto de tensión positivo relacionado con la aparición de un arco eléctrico discontinuo que incluye una sucesión de microarcos (es decir, de arcos eléctricos de breve duración, comprendida normalmente entre 2 μs y 100 μs) separados por periodos sin arco. La señal de tensión se descompone en una sucesión de ventanas de adquisición. En la figura 3, solo se representa la ventana de adquisición que contiene el principio del arco eléctrico. Un arco eléctrico de este tipo se relaciona generalmente con un fallo de conexión (oxidación de contacto, ruptura de soldadura, desapriete de la placa de conexiones, etc.). En presencia de dicho fallo de conexión, los electrodos se forman pero se mantienen por su construcción muy cerca uno del otro, o incluso en contacto aleatorio, lo que induce conexiones eléctricas aleatorias. Un arco eléctrico puede aparecer entre estos electrodos y durar desde unos microsegundos a varios cientos de microsegundos. Por fusión de los materiales de electrodo, puede crearse un puente de soldadura, restableciendo así el contacto eléctrico entre los electrodos, y a continuación romperse de nuevo bajo el efecto Joule de la corriente provocando de este modo la aparición de un nuevo arco de breve duración. Esta alternancia de aparición y desaparición de arco de breve duración puede repetirse varias veces y generar así una sucesión de arcos eléctricos de duraciones breves separados por periodos sin arco.

La instalación fotovoltaica 100 comprende además un sensor 5 de medida de la tensión eléctrica V en los bornes de uno o varios módulos PV de la instalación 100, por ejemplo, en los bornes de una cadena de m módulos PV 1 (o como variante en los bornes de cada módulo PV 1), un sensor 11 de medida de corriente, un dispositivo 7 de detección de arco eléctrico, un dispositivo 8 de evaluación de la energía liberada por un arco eléctrico detectado y un dispositivo 9 de intervención o de protección. Pueden preverse varios sensores de medida de tensión para medir las tensiones en diferentes lugares de la instalación fotovoltaica. Con fines de claridad, en la descripción mostrada a continuación se considera un único sensor de medida de tensión 5.

El sensor 5 de medida de tensión funciona a una frecuencia de muestreo elevada, en este caso superior o igual a 50 kHz. En el ejemplo aquí descrito, la frecuencia de muestreo es igual a 200 kHz. El sensor de medida 5 está unido a una memoria intermedia 6 de almacenamiento de la señal de tensión medida.

El sensor 11 de medida de corriente funciona en este caso con una frecuencia de muestreo baja (inferior o igual a 1 Hz). En particular está destinado a suministrar una o varias medidas de la corriente inicial antes de la aparición de un arco eléctrico detectado. La señal de corriente se registra igualmente en la memoria intermedia 6. El sensor 11 está colocado, por ejemplo, en la entrada del ondulador 2.

El dispositivo 7 de detección de arco eléctrico tiene como cometido detectar un arco eléctrico que se produce en la instalación fotovoltaica 100. Está adaptado para implementar un procedimiento de detección de arco eléctrico, preferentemente capaz de detectar con rapidez la aparición de un arco eléctrico, preferentemente en un plazo máximo de varios cientos de microsegundos después de esta aparición. El procedimiento de detección puede basarse, por ejemplo, en la detección de un salto positivo de tensión, como se describe, por ejemplo, en el documento de patente FR3002645. Al estar la instalación equipada con el sensor 5 de medida de tensión de alta frecuencia, la detección de arco eléctrico podría usar de forma ventajosa la señal de medida de tensión suministrada por este sensor 5.

El dispositivo 8 de evaluación de la energía eléctrica producida por un arco eléctrico detectado tiene como cometido evaluar la cantidad de energía eléctrica producida por un arco eléctrico detectado por el dispositivo de detección 8. Comprende los módulos siguientes:

- un módulo 80 de obtención de una señal de tensión eléctrica medida por el sensor 5 y de la señal de corriente medida por el sensor 11, conectado con la memoria 6;
- un módulo de tratamiento 81 capaz de tratar la señal de tensión y la señal de corriente;
- un módulo 82 de evaluación de la corriente eléctrica durante el arco eléctrico;
- un módulo 83 de determinación de la energía del arco por integración en el tiempo del producto de la tensión medida y de la corriente evaluada;
- una unidad de tratamiento o de control 84, del tipo de un microprocesador, con la cual están conectados todos los módulos 80 a 83 y que está destinada a controlar el funcionamiento;
- una memoria 85.

El módulo de tratamiento 81 está destinado, a partir de la señal de tensión medida, a determinar:

- o una tensión inicial antes de la aparición del arco eléctrico;
- o valores de tensión durante el arco eléctrico.

Está dispuesto para descomponer la señal de tensión en una pluralidad de ventanas de adquisición F_x . Cada ventana contiene un número N_f de puntos de adquisición (es decir, de valores de tensión medidos/muestreados). Para cada ventana de adquisición F_x , el módulo 81 calcula un valor medio de la tensión medida en la ventana, denotada como V_{F_x} para la ventana F_x . Los valores medios de tensión V_{F_x} relativos a las ventanas de adquisición F_x se registran en la memoria 85. Así, los valores de tensión durante el arco determinados, denotados como $V_{F_{arcj}}$, corresponden a los valores medios de tensión calculados relativos a las ventanas de adquisición denotadas como F_{arcj} simultáneas al arco eléctrico.

Para calcular la tensión inicial antes del arco, el módulo 81 calcula la media de las tensiones V_{F_i} determinadas en varias ventanas de adquisición F_i antes del arco, por ejemplo, en un número de ventanas comprendido entre 10 y 20. En la hipótesis en que los módulos PV 1 funcionan en su punto de potencia máximo antes de la aparición del arco, la tensión inicial determinada es igual o sustancialmente igual a la tensión V_{MPP} de este punto de potencia máxima (relativa a uno o varios módulos PV en serie). La tensión inicial V_{MPP} se registra en la memoria 85.

El módulo 82 está destinado a evaluar valores de corriente eléctrica producida por la instalación fotovoltaica 100 durante el arco eléctrico a partir de una corriente inicial I_0 (antes del arco) determinada, valores de tensión durante el arco determinadas $V_{F_{arcj}}$ y la tensión inicial determinada, tal como se describirá en la descripción del procedimiento.

Los módulos 81, 82 y 83 son módulos de software destinados a ser ejecutados por la unidad de tratamiento 84 para la implementación de las etapas del procedimiento de evaluación que se describirá más adelante. La unidad de tratamiento 84 está destinada igualmente a transmitir una orden de protección al dispositivo de intervención 9, en caso de detección de un arco eléctrico, en particular de un arco eléctrico que ha liberado una energía crítica.

El dispositivo de intervención 9 tiene como función interrumpir dicho arco eléctrico, con el fin de evitar cualquier riesgo de deterioro o de incendio. El dispositivo de evaluación de energía 8 está conectado con el dispositivo de intervención 9 por medio de un enlace de comunicación 10.

El dispositivo 7 de detección de arco eléctrico, el dispositivo 8 de evaluación de la energía liberada por el arco eléctrico detectado y el dispositivo de intervención 9 forman un sistema de seguridad para la instalación fotovoltaica 100.

A continuación se describirá el procedimiento de evaluación de la energía liberada por un arco eléctrico detectado en la instalación fotovoltaica 100, según diferentes realizaciones.

En referencia a la figura 5, el procedimiento comprende una etapa E0 de adquisición o de medida, por el sensor de medida 5, de una señal de tensión eléctrica V en este caso en los bornes de una cadena o string de m módulos fotovoltaicos 1 de la instalación 100 con una frecuencia de muestreo elevada, por ejemplo, igual a 200 kHz. Como variante, se podría medir la tensión en los bornes de un único módulo PV o preferentemente en los bornes de cada módulo PV. La señal de tensión medida se registra en este caso en la memoria 6 y así puede ser recuperada por el

módulo 80 del dispositivo de evaluación de energía 8.

La señal de tensión V medida se descompone en una sucesión de ventanas de adquisición F_x durante una etapa E1, por el módulo de tratamiento 81. Cada ventana de adquisición contiene un número predefinido N_f de valores de tensión medidos y muestreados (o puntos de adquisición). Las ventanas de adquisición contienen un número de puntos de adquisición dado N_f y por tanto una duración fija, superior o igual a 1 ms. Para cada ventana de adquisición, el módulo de tratamiento 81 calcula un valor medio de la tensión medida en la ventana, denotada como V_{F_x} , realizando la media de los puntos de adquisición de la ventana, durante una etapa E2. Estos valores medios de tensión V_{F_x} se almacenan en la memoria 85.

El procedimiento comprende igualmente una etapa E3 de medida de la corriente, con una baja frecuencia de muestreo, en este caso inferior a 1 Hz. Los valores de corriente medidos se registran en la memoria 6.

Las etapas E0 a E3 pueden implementarse a lo largo del funcionamiento de la instalación fotovoltaica 100.

El procedimiento comprende igualmente una etapa E4 de detección de un arco eléctrico, implementado por el dispositivo de detección de arco 7. Esta etapa de detección E4 pretende detectar un arco eléctrico que se produce en la instalación fotovoltaica 100. Tal como se ha indicado anteriormente, la detección puede basarse en cualquier procedimiento conocido de detección de arco eléctrico, preferentemente adaptado para detectar rápidamente el arco en un plazo máximo de varios cientos de microsegundos después de su aparición.

Supóngase que un arco eléctrico, por ejemplo, un arco eléctrico tal como el que se representa en la figura 2, es detectado durante la etapa E4. Obsérvese $T_{0_{arc}}$ en el instante de la aparición del arco eléctrico. En este instante $T_{0_{arc}}$, se produce un salto positivo de tensión en la señal de tensión, tal como aparece en la figura 2. Se denota como F_i , con $1 \leq i \leq N$, las ventanas anteriores a la aparición del arco, F_{arc1} , conteniendo la ventana un salto de tensión relacionado con la aparición del arco, y F_{arcj} , con j comprendido entre 2 y n , las ventanas posteriores a la aparición del arco y simultáneas al arco. Por otra parte se denota como V_{F_i} la media de la tensión en la ventana F_i antes del arco y como $V_{F_{arcj}}$ la media de la tensión en la ventana F_{arcj} después del arco.

A continuación de la detección E4 del arco eléctrico, el procedimiento comprende las etapas siguientes:

- determinación E5 de una tensión inicial V_{MPP} antes de la aparición del arco;
- determinación E6 de una corriente eléctrica inicial I_0 producida por la instalación 100 antes de la aparición del arco;
- determinación E7 de los valores de tensión durante el arco, denotados como $V_{F_{arcj}}$ con $j=1, 2, \dots$;
- evaluación E8 de los valores de corriente eléctrica producida por la instalación 100 durante el arco, denotados como $I_{F_{arcj}}$ con $j=1, 2, \dots$, a partir de la corriente inicial I_0 , de los valores de tensión durante el arco determinados $V_{F_{arcj}}$ y de la tensión inicial determinada V_{MPP} ,
- determinación E9 de la energía del arco E_{arctot} por integración en el tiempo del producto de los valores de tensión de arco, iguales a la diferencia entre los valores de tensión durante el arco $V_{F_{arcj}}$ determinados y la tensión inicial V_{MPP} determinada, por valores de corriente evaluados.

En este caso se supone que los módulos PV 1 de la instalación fotovoltaica 100 funcionan en su punto de potencia máxima V_{MPP} antes de la aparición del arco eléctrico. Para determinar la tensión inicial V_{MPP} (etapa E5), el módulo de tratamiento 81 calcula en este caso la media de una pluralidad de valores medios de tensión V_{F_i} relativos a una pluralidad de ventanas de adquisición antes del arco eléctrico. Por ejemplo, calcula la media de una decena de valores de tensión V_{F_i} determinados antes del arco.

La corriente eléctrica inicial I_0 determinada (etapa E6) es igual a un valor de corriente medido por el sensor 11 antes de la aparición del arco o a la media de varios valores de corriente medidos por el sensor 11 antes de la aparición del arco.

Los valores de tensión $V_{F_{arcj}}$ determinados durante el arco (etapa E7) corresponden a los valores medios de tensión relativos a las ventanas F_{arcj} durante el arco, almacenados en la memoria 85. Se supone que cada valor de tensión $V_{F_{arcj}}$ es igual a la tensión inicial antes del arco, es decir, V_{MPP} , aumentada en la tensión de arco V_{arcj} . Dicho de otro modo, se establece la hipótesis de que:

$$V_{F_{arcj}} = V_{MPP} + V_{arcj}$$

Durante la etapa E8, se evalúa un valor de corriente $I_{F_{arcj}}$ para cada ventana F_{arcj} simultánea al arco eléctrico. Para este fin, se resta a la corriente inicial I_0 (antes de la aparición del arco) el valor de tensión de arco V_{arcj} relativo a la ventana F_{arcj} multiplicado por la relación entre la amplitud (en valor absoluto) de un salto de corriente $|\Delta I_{arc0}|$ relacionado con la aparición del arco y la amplitud de un salto de tensión ΔV_{arc0} relacionado con la aparición del arco. La tensión de arco V_{arcj} es igual a la diferencia entre la tensión $V_{F_{arcj}}$ determinada para la ventana F_{arcj} y la tensión inicial V_{MPP} determinada. Así, se calcula una evaluación de la corriente $I_{F_{arcj}}$ para cada ventana F_{arcj} por medio de la relación siguiente:

$$I_{Farcj} = I_0 - (V_{Farcj} - V_{MPP}) \times \frac{|\Delta I_{arc0}|}{\Delta V_{arc0}} = I_0 - V_{arcj} \times \frac{|\Delta I_{arc0}|}{\Delta V_{arc0}}$$

De este modo, se considera que la corriente I_{Farcj} , después de la aparición del arco, varía de forma lineal en función de la tensión V_{Farc} , según la semirrecta representada en la figura 4. Los valores de corriente evaluados se registran en la memoria 85.

El valor de tensión de arco V_{arcj} relativo a la ventana F_{arcj} es igual a la diferencia entre la tensión V_{Farcj} determinada para la ventana F_{arcj} y la tensión inicial determinada V_{MPP} .

La amplitud del salto de tensión ΔV_{arc0} tiene un valor conocido, tal como se ha explicado anteriormente. En el caso presente, se supone que ΔV_{arc0} es igual a 20 V (para un string de módulos PV).

Según la invención, se considera en este caso que la amplitud del salto de corriente $|\Delta I_{arc0}|$ es igual a un porcentaje predefinido del $x\%$ de la corriente inicial I_0 , es decir, de la corriente inicial que circula en la cadena de módulos fotovoltaicos concernida por el arco eléctrico en el punto de funcionamiento de la instalación fotovoltaica. El valor de x depende de la posición del punto de funcionamiento en la curva IV en el momento en que se produce el arco eléctrico. Puede extrapolarse a partir de medidas de curvas IV o deducirse para una instalación fotovoltaica dada de curvas IV predefinidas relativas a los módulos fotovoltaicos de la instalación. Por ejemplo, está comprendida entre el 6% y el 8%. En este caso se supone que es igual al 7%.

La integración en el tiempo del producto de la tensión de arco y de la corriente durante el arco (etapa E9) puede implementarse de diferentes formas.

En una primera realización, para calcular la energía total producida por el arco eléctrico, se calcula:

- una tensión de arco media V_{arctot} , calculando la media de una pluralidad de valores de tensión de arco determinados relativos a una pluralidad N_{Farc} de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico,
- una corriente media I_{arctot} durante el arco eléctrico, calculando la media de una pluralidad de valores de corriente evaluados para la pluralidad N_{Farc} de ventanas de adquisición;
- la energía total producida por el arco E_{arctot} por medio de la relación: $E_{arctot} = V_{arctot} \times I_{arctot} \times n \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$ en la que n , F_{ech} y N_f representan respectivamente el número de ventanas de adquisición durante el arco, la frecuencia de muestreo de la tensión medida y el número de puntos de adquisición en una ventana de adquisición.

La tensión de arco media V_{arctot} se calcula, por ejemplo, por medio de la relación siguiente:

$$V_{arctot} = \frac{V_{arc1} + \sum_{F_{arc2}}^{F_{arcn}} (V_{Farcj} - V_{MPP})}{n}$$

Para calcular la tensión de arco media de la ventana F_{arc1} que contiene el salto de tensión relacionado con la aparición del arco, se puede calcular la diferencia entre la tensión media después del frente (o salto) de tensión en la ventana de arco F_{arc1} y la tensión media antes del frente de tensión en la ventana de arco F_{arc1} .

La corriente media I_{arctot} se calcula obteniendo la media de los valores de corriente evaluados para las ventanas de adquisición durante el arco mediante la relación:

$$I_{arctot} = \frac{\sum_{F_{arc2}}^{F_{arcn}} I_{Farcj}}{n}$$

En una segunda realización, para calcular la energía total producida por el arco eléctrico, se calcula:

- la energía de arco producida por el arco durante cada ventana de adquisición de índice «arcj» por medio de la relación $E_{arcj} = V_{arcj} \times I_{arctot} \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$;
- la suma de las energías de arco producidas en una pluralidad de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico por medio de la relación $E_{Farcj} = \sum_{F_{arc1}}^{F_{arcn}} E_{Farcj}$.

Para calcular la energía de arco relativa a la ventana F_{arc1} que contiene el salto de tensión relacionado con la aparición del arco, se puede estimar la tensión de arco V_{arc1} obteniendo la diferencia entre la tensión media después del frente (o salto) de tensión en la ventana de arco F_{arc1} y la tensión media antes del frente de tensión en la ventana de arco F_{arc1} .

En las realizaciones que acaban de describirse, la corriente eléctrica durante el arco se evalúa, mediante reconstrucción lineal, a partir de la corriente inicial medida y de los valores de tensión durante el arco determinados.

Así, la evaluación del nivel de energía del arco se basa en una medida de tensión de alta frecuencia (superior o igual a 50 kHz) adjunta a una reconstrucción lineal de la corriente.

5 En una variante de realización, los valores de corriente durante el arco evaluados son valores medidos por medio de un sensor de medida de corriente (tal como el sensor 111) con una frecuencia de muestreo inferior o igual a 1 Hz. En este caso, el valor de la corriente I_{Farcj} relativa a la ventana F_{arcj} es igual a un valor de corriente medido en un punto de la ventana F_{arcj} . Así, la evaluación del nivel de energía del arco se basa en una medida de tensión de alta frecuencia (superior o igual a 50 kHz) adjunta a una evaluación de la corriente realizada mediante una medida de corriente a baja frecuencia de muestreo (inferior o igual a 1 Hz), de tipo «monitoring».

10 La etapa E9 de evaluación de la energía E_{arctot} generada o producida por el arco eléctrico puede seguirse de una etapa de prueba E10 que permite verificar si la energía de arco total es superior o igual a un umbral de energía crítico Z (por ejemplo, expresado en julios). Dicho de otro modo, durante la etapa E10, se realiza la prueba siguiente:

15
$$¿ E_{arctot} \geq Z ?$$

Por ejemplo, el umbral Z es en este caso igual a 2 julios. Sin embargo, el valor de este umbral podría adaptarse en función de la instalación y de su entorno.

20 Si la prueba E10 es positiva, de manera que la energía de arco total ha alcanzado o superado el umbral Z, el dispositivo de evaluación de energía 8 envía automáticamente al dispositivo de intervención 9 una orden de protección de la instalación 100. A continuación, durante una etapa E11, el dispositivo de intervención 9 protege la instalación fotovoltaica 100. Esta protección puede basarse en interruptores controlados a distancia. Puede consistir en una orden de interrupción del funcionamiento de la instalación fotovoltaica, lo que permite parar el arco eléctrico parásito y suprimir cualquier riesgo de degradación y/o de conato de incendio.

25 Si la prueba E10 es negativa, siendo la energía de arco total inferior al umbral Z, el procedimiento sigue evaluando la energía total producida por el arco eléctrico, para una ventana de adquisición siguiente ($j=j+1$).

30 Como variante, se podrían definir diferentes niveles de estado crítico del arco eléctrico, por ejemplo:

- «nivel 1» correspondiente a una energía total de arco E_{arctot} estrictamente inferior a 1 julios;
- «nivel 2» correspondiente a una energía total de arco E_{arctot} superior o igual a 1 julio y estrictamente inferior a 2 julios;
- «nivel 3» correspondiente a una energía total de arco E_{arctot} superior estrictamente a 2 julios.

35 El nivel 1 corresponde a un arco eléctrico sin riesgo para la seguridad. El dispositivo de evaluación 8 puede señalar en su caso la presencia de un arco eléctrico sin riesgo para la seguridad a un operador. Este puede decidir no activar la alerta para este nivel.

40 El nivel 2 corresponde a un arco eléctrico sin riesgo para la seguridad inmediato pero que podría en su caso volverse peligroso. En este caso, el dispositivo de evaluación 8 señala al operador la presencia de un arco eléctrico sin riesgo para la seguridad inmediato pero que necesita una intervención rápida para identificar el fallo en el origen del arco y corregirlo.

45 El nivel 3 corresponde a un arco eléctrico peligroso. El dispositivo de evaluación 8 ordena una protección inmediata de la instalación fotovoltaica 100 al dispositivo de intervención 9, tal como se ha descrito anteriormente.

50 En la realización que acaba de describirse, el arco eléctrico detectado es un arco continuo de larga duración. Como variante, el arco eléctrico detectado puede ser discontinuo. Comprende una sucesión de microarcos separados por periodos sin arco. En la figura 3, se ha representado un ejemplo de arco eléctrico discontinuo durante una ventana de adquisición, conteniendo en este caso la ventana los primeros microarcos. En este caso, las etapas E7 a E9 son implementadas para cada microarco. El dispositivo de evaluación de energía 8 identifica los microarcos y determina el valor medio de la tensión medida durante cada microarco y a continuación evalúa el valor de corriente correspondiente. Seguidamente evalúa la energía de cada microarco. El dispositivo 8 almacena en memoria las energías evaluadas relativas a los microarcos identificados y a continuación suma estas energías con el fin de obtener la energía total generada por el arco eléctrico. Seguidamente se implementa la prueba E10, si fuera necesario, con el fin de controlar la necesidad de proteger la instalación fotovoltaica 100.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de evaluación de la energía eléctrica producida por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica (100) que comprende las etapas siguientes:

A) Medida (E0) de una señal de tensión eléctrica en los bornes de al menos un módulo fotovoltaico de la instalación (100) con una frecuencia de muestreo superior o igual a 50 kHz y, a partir de la señal de tensión medida:

- o Determinación de una tensión inicial antes de la aparición del arco;
- o Determinación de los valores de tensión durante el arco eléctrico;

B) Evaluación de los valores de corriente eléctrica producida por la instalación fotovoltaica durante el arco eléctrico;
 C) Integración (E7) en el tiempo del producto de los valores de tensión de arco iguales a la diferencia entre los valores de tensión durante el arco y la tensión inicial, determinados durante la etapa A), por valores de corriente evaluados durante la etapa B), con el fin de determinar la energía del arco.

2. Procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque**, para evaluar un valor de corriente durante el arco, se determina una corriente eléctrica inicial antes del arco eléctrico y se resta a dicha corriente inicial un valor de tensión de arco, igual a la diferencia entre un valor de tensión determinado durante la etapa A) y la tensión inicial, multiplicado por la relación entre la amplitud de un salto de corriente relacionado con la aparición del arco y la amplitud de un salto de tensión relacionado con la aparición del arco.

3. Procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque** la amplitud del salto de corriente es igual a un porcentaje predefinido del x % de la corriente inicial, estando x comprendido entre el 6 % y el 8 %, en particular igual al 7 %.

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la amplitud del salto de tensión está predefinida y comprendida entre 12 V y 35 V, en particular igual a 20 V.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado porque** los valores de corriente durante el arco evaluados son valores medidos con una frecuencia de muestreo inferior o igual a 1 Hz.

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** comprende una etapa (E1) de descomposición de la señal de tensión en una pluralidad de ventanas de adquisición (F_x ; F_i , F_{arcj}), conteniendo cada ventana un número N_f de puntos de adquisición correspondiente a valores de tensión muestreados, y, para cada ventana de adquisición, una etapa (E5) de determinación de un valor medio de la tensión medido en dicha ventana.

7. Procedimiento según la reivindicación anterior, **caracterizado porque** la tensión inicial antes de la aparición del arco se determina calculando una media de una pluralidad de valores medios de tensión relativos a una pluralidad de ventanas de adquisición antes del arco eléctrico.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los valores de tensión determinados durante el arco eléctrico son iguales a valores medios de tensión relativa a una sucesión de ventanas de adquisición.

9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, **caracterizado porque** se calcula:

- una tensión de arco media V_{arctot} , calculando la media de una pluralidad de valores de tensión de arco determinados relativos a una pluralidad n de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico,
- una corriente media I_{arctot} durante el arco eléctrico, calculando la media de una pluralidad de valores de corriente evaluados para la pluralidad n de ventanas de adquisición;
- la energía total producida por el arco E_{arctot} por medio de la relación: $E_{arctot} = V_{arctot} \times I_{arctot} \times n \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$ en la que n, F_{ech} y N_f representan respectivamente el número de ventanas de adquisición durante el arco, la frecuencia de muestreo de la tensión medida y el número de puntos de adquisición en una ventana de adquisición.

10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, **caracterizado porque** se calcula:

- la energía de arco producida por el arco durante cada ventana de adquisición de índice arcj por medio de la relación $E_{Farc} = V_{arcj} \times I_{arcj} \times \frac{1}{F_{ech}} \times N_f$ en la que V_{arcj} , I_{arcj} , F_{ech} y N_f representan respectivamente una tensión de arco media calculada para la ventana de índice arcj, una corriente media evaluada para la ventana de índice arcj, la frecuencia de muestreo de la tensión medida y el número de puntos de adquisición en una ventana de adquisición;
- la energía total producida por el arco E_{arctot} realizando la suma de las energías de arco producidas en una pluralidad n de ventanas de adquisición que cubren el arco eléctrico.

- 5 11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque**, en el caso de un arco eléctrico discontinuo que incluye una pluralidad de microarcos, se determina la energía de cada microarco eléctrico, y a continuación se realiza la suma de las energías respectivas de los microarcos eléctricos con el fin de determinar la energía del arco eléctrico discontinuo.
12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende una etapa (E10) de comparación de la energía del arco eléctrico determinada con un umbral de energía y una etapa (E11) de protección en caso de superación de dicho umbral.
- 10 13. Dispositivo de evaluación de la energía liberada por un arco eléctrico en una instalación fotovoltaica (100) **caracterizado porque** comprende:
- 15 - un módulo (80) de obtención de una señal de tensión eléctrica medida en los bornes de al menos un módulo fotovoltaico de la instalación (100) con una frecuencia de muestreo superior o igual a 50 kHz;
- un módulo de determinación de una corriente eléctrica inicial producida por la instalación fotovoltaica antes de la aparición del arco;
- un módulo (81) de tratamiento de la señal de tensión adaptado para determinar, a partir de la señal de tensión medida:
- 20 o una tensión inicial antes de la aparición del arco;
- o valores de tensión durante el arco eléctrico;
- un módulo de evaluación de los valores de corriente eléctrica producida por la instalación fotovoltaica durante el arco eléctrico;
- 25 - un módulo de integración en el tiempo del producto de los valores de tensión de arco iguales a la diferencia entre los valores de tensión durante el arco y la tensión inicial determinados por el módulo de tratamiento, por valores de corriente evaluados por el módulo de evaluación, con el fin de determinar la energía del arco.
- 30 14. Sistema de seguridad para una instalación fotovoltaica, **caracterizado porque** comprende un dispositivo (7) de detección de un arco eléctrico, un dispositivo (8) de evaluación de la energía eléctrica producida por un arco eléctrico detectado, según la reivindicación 13, y un dispositivo de intervención (9) destinado a proteger la instalación fotovoltaica.
- 35 15. Instalación fotovoltaica, **caracterizada porque** comprende un sistema de seguridad según la reivindicación anterior.

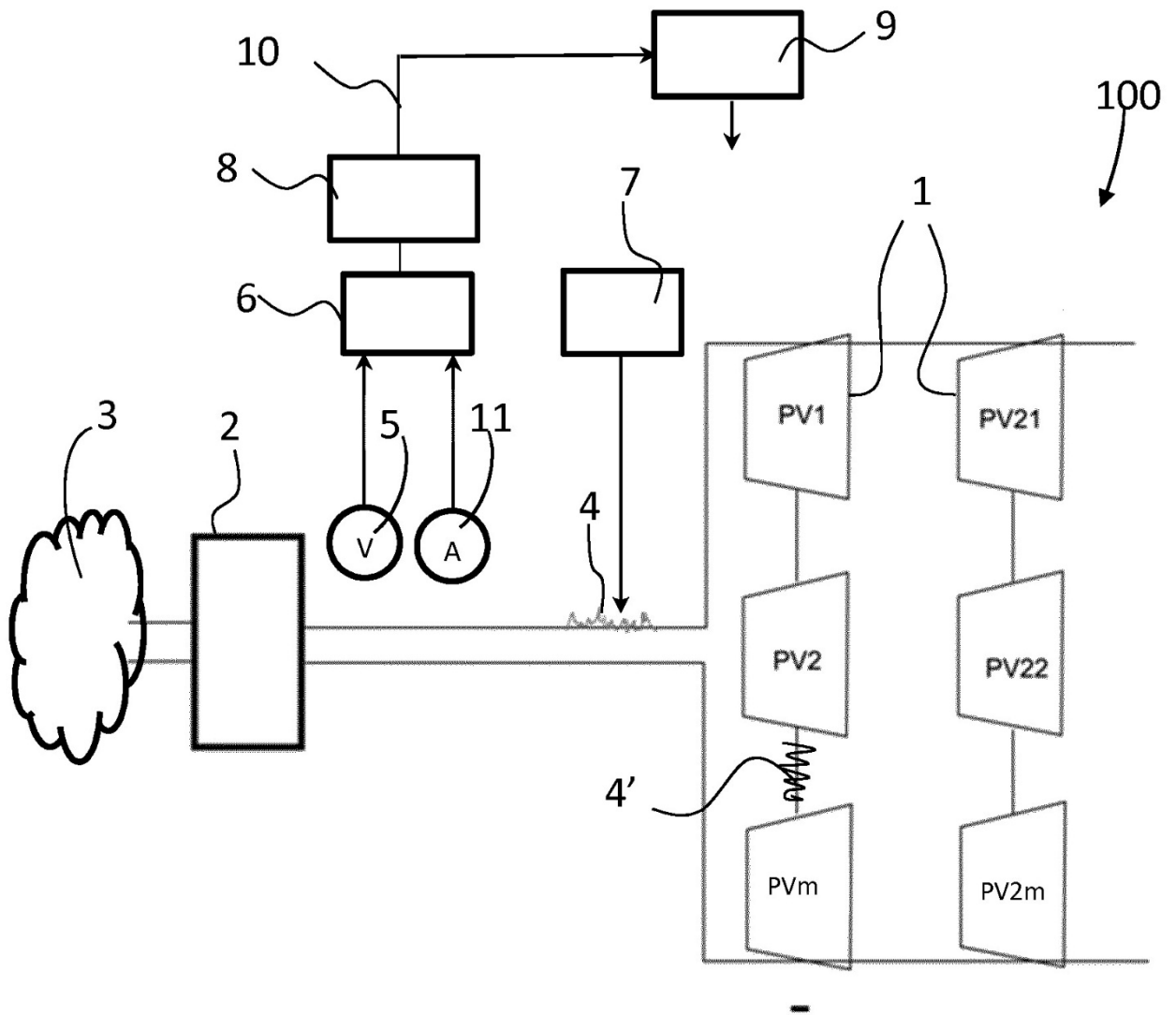


Figura 1

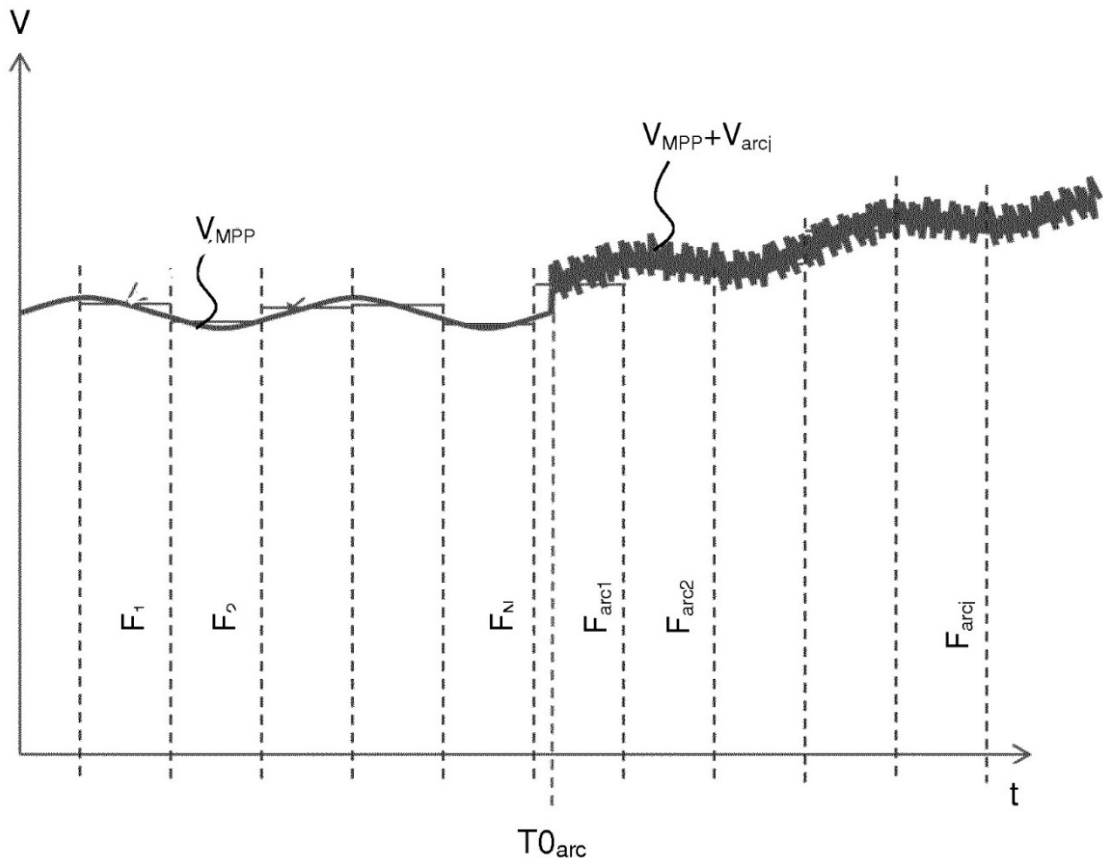


Figura 2

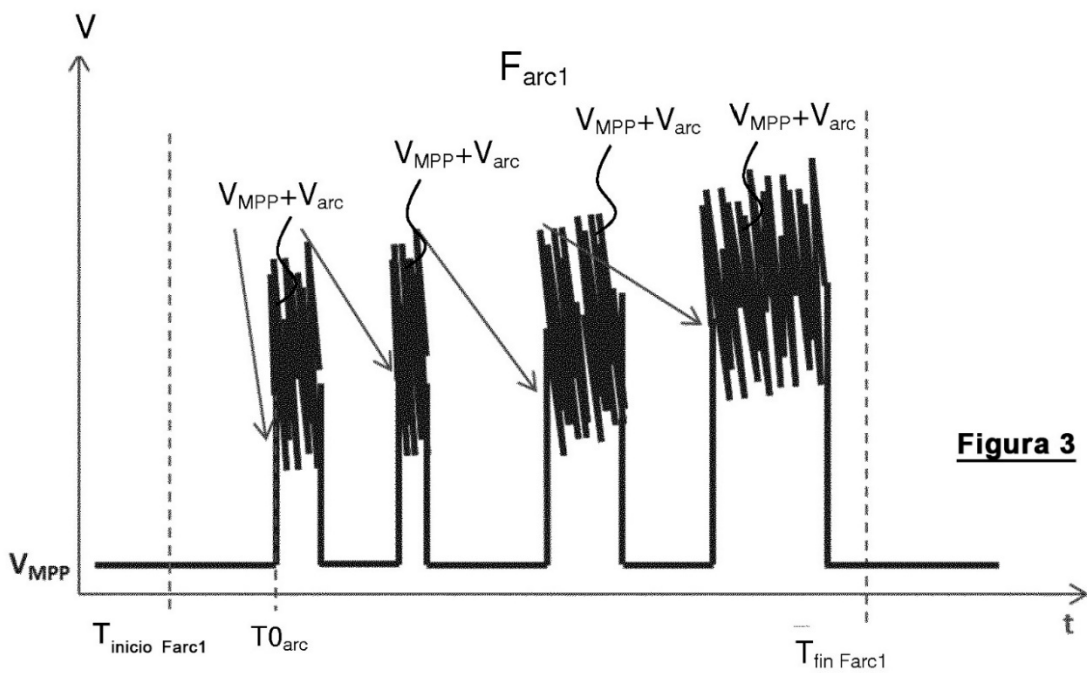


Figura 3

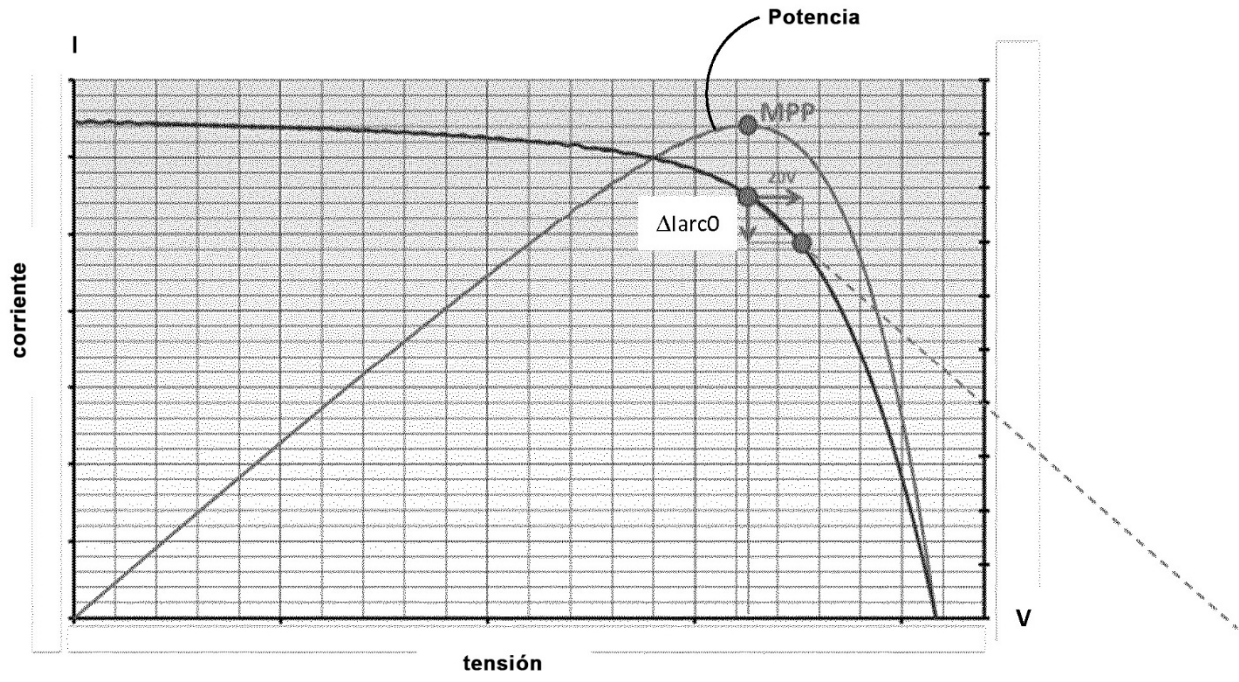


Figura 4

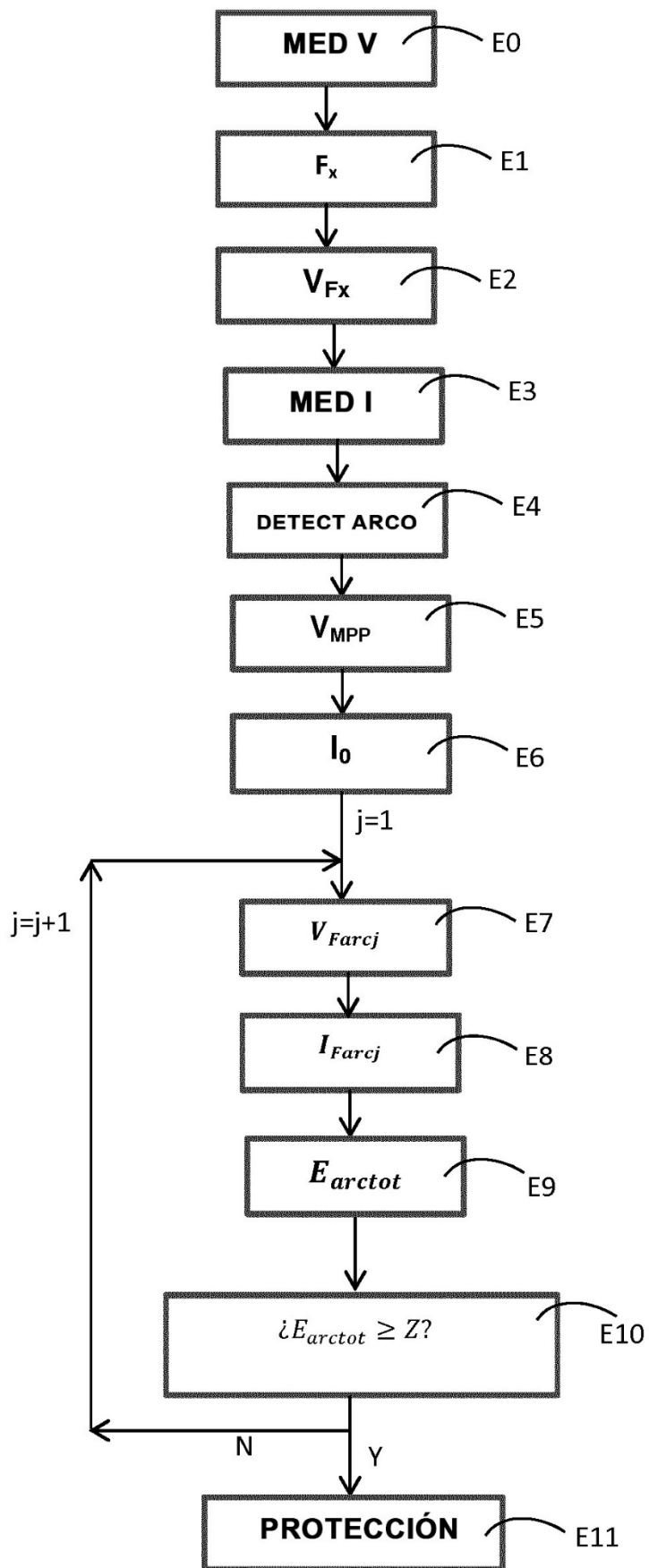


Figura 5

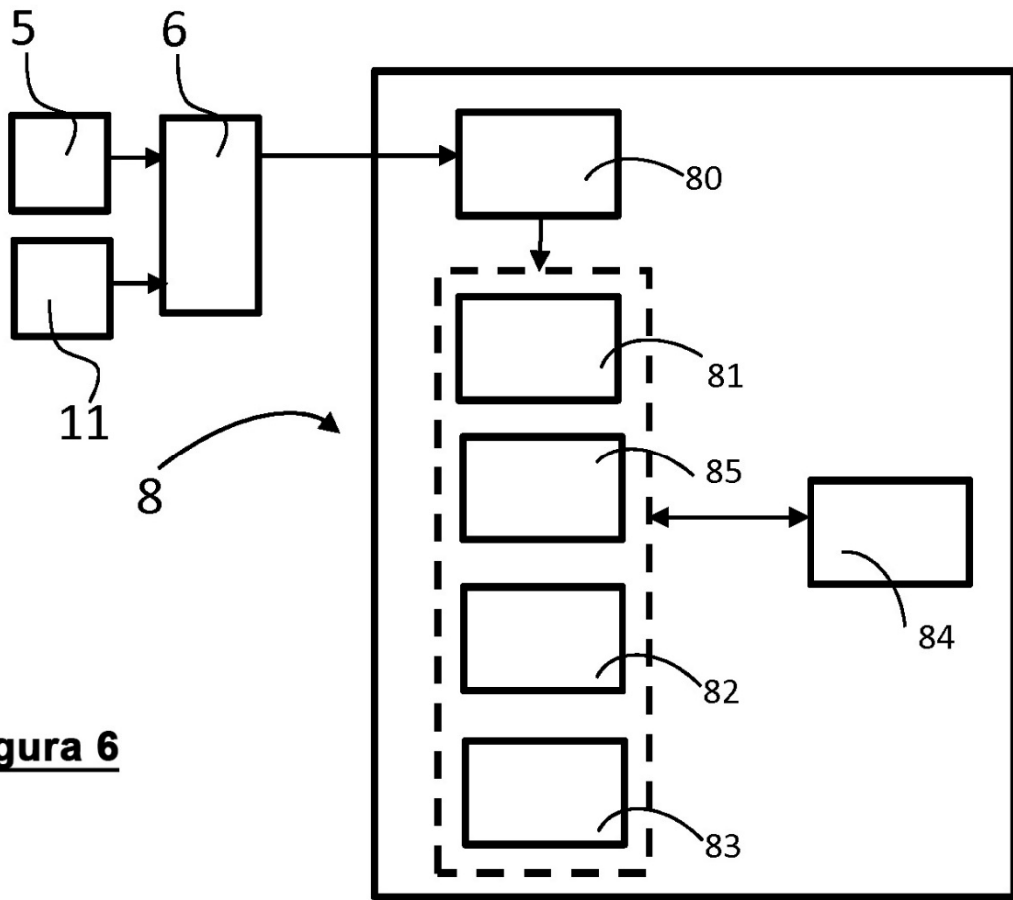


Figura 6