

INTELIGENTE, RÁPIDO Y FIABLE

Nueva generación de AFCI

ARTÍCULO TÉCNICO



CONTENIDO

Resumen	03
01. Contexto	04
02. Análisis teórico	05
2.1 Formación de arcos eléctrico	05
2.2 Clasificación de los arcos eléctricos	06
2.3 Normas relacionadas	08
03. Solución	10
3.1 ¿Cómo identificar los fallos de arco?	11
3.2 Características técnicas	12
04. Verificación del rendimiento	13
4.1 Pruebas y validación de AFCI	14
4.2 Evaluación final	14
05. Conclusión	15

RESUMEN

El inversor es un dispositivo esencial para la conversión CC/CA, la protección y la supervisión de la red en los sistemas de generación de energía fotovoltaica. Sin embargo, posibles arcos de corriente continua (CC) pueden causar daños a los componentes y suponer un riesgo de incendio. Este artículo presenta una solución de protección basada en pruebas de laboratorio que monitoriza y analiza los arcos de CC para proteger el inversor y el sistema fotovoltaico en su conjunto. Los resultados de las pruebas demuestran que esta solución puede mejorar eficazmente la fiabilidad y la seguridad del inversor, evitando daños a los equipos del sistema, a la propiedad local y, sobre todo, previniendo accidentes causados por arcos de CC y salvando vidas.



01. CONTEXTO

Según las últimas cifras, la capacidad fotovoltaica mundial instalada fue de aproximadamente 240 GW en 2022, con una capacidad instalada acumulada de 1,2 TW en todo el mundo. Como uno de los dispositivos centrales del sistema fotovoltaico, los inversores están experimentando constantes actualizaciones e innovaciones tecnológicas a medida que el mercado fotovoltaico sigue madurando y desarrollándose. El aumento de la fiabilidad de los inversores es una tendencia importante en el desarrollo de la tecnología de conversión y tiene un impacto crucial en la generación de energía y la seguridad de los sistemas fotovoltaicos.

Durante el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, la formación de arcos de CC supone un grave riesgo para la seguridad de la planta y ha recibido cada vez más atención en las aplicaciones prácticas. Las estadísticas muestran que la mayoría de los incidentes de incendio en plantas fotovoltaicas se deben a la formación de arcos de CC.

En la mayoría de los casos de accidentes por incendio en instalaciones fotovoltaicas, las causas principales son el sobrecalentamiento, la formación de arcos de CC y los fallos eléctricos. Esto demuestra aún más la importancia de reforzar la supervisión de la seguridad y la protección contra arcos de CC en el sistema fotovoltaico.



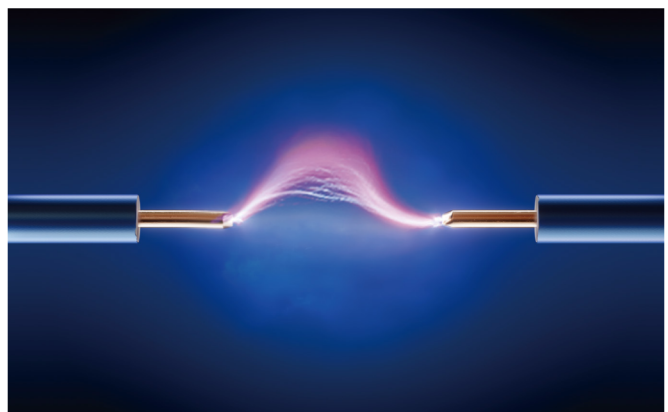
En la actualidad, no existe una solución unificada ni una política reguladora internacional para regular y formular normas para las pruebas de fallos de arco de CC en sistemas fotovoltaicos. Estados Unidos fue el primer país que comenzó a investigar y desarrollar normas para los problemas de fuego en los sistemas fotovoltaicos. UL (Underwriters Laboratories) publicó por primera vez la norma UL Outline en 2011 y la ha actualizado varias veces. La última versión es la UL 1699B-2018. Esta norma especifica los requisitos de ensayo y los indicadores de rendimiento de los dispositivos de protección contra fallos de arco (AFCI) en sistemas fotovoltaicos. La edición de 2017 del Código Eléctrico Nacional (NEC) introdujo por primera vez requisitos para los AFCI, estipulando que los dispositivos AFCI que cumplan la norma UL 1699B deben instalarse en los circuitos de CC de los sistemas fotovoltaicos. Además, las especificaciones de instalación de sistemas fotovoltaicos en varios países europeos han aumentado gradualmente los requisitos para la introducción de AFCI basados en la norma IEC 63027. Con el creciente énfasis en la seguridad operativa de las centrales fotovoltaicas, la tecnología para probar y proteger contra los fallos de arco de CC en los sistemas fotovoltaicos se ha convertido en un problema urgente que hay que resolver.

Por lo tanto, el desarrollo de una solución eficaz de prueba de fallos de arco de CC para evaluar y desarrollar inversores que mejoren la fiabilidad y la seguridad de los sistemas fotovoltaicos se ha convertido en uno de los campos de investigación más relevantes del sector en la actualidad.

02. ANÁLISIS TEÓRICO

2.1 Formación del arco

El arco eléctrico es un fenómeno luminiscente producido por la descarga de aire ionizado al romper la rigidez dieléctrica entre dos conductores con una diferencia de potencial, cuando la distancia entre ellos es relativamente pequeña. Cuando se interrumpe la corriente suministrada por el sistema fotovoltaico, por ejemplo en un sistema de conmutación, la alta tensión entre los conductores producirá un arco eléctrico capaz de emitir calor intenso y alcanzar altas temperaturas.

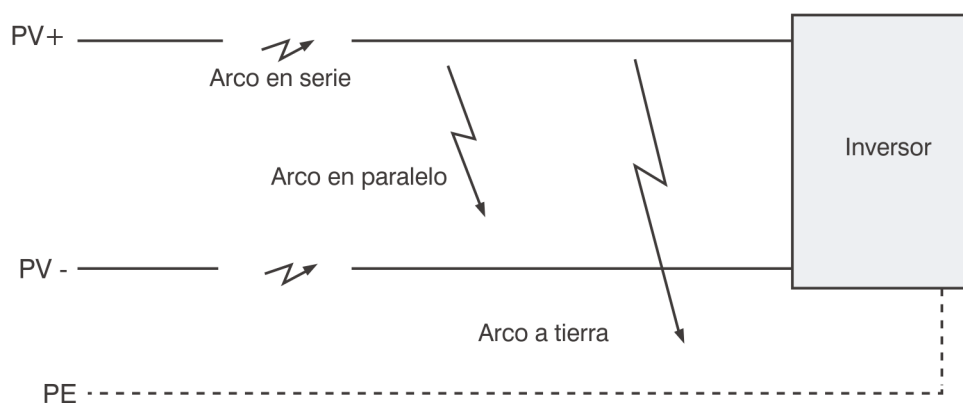


Formación del arco eléctrico

Aunque los conductores estén desconectados en este punto, la corriente seguirá fluyendo a través del arco eléctrico entre ellos. Debido a la característica de corriente constante en el lado de CC, es difícil extinguir el arco una vez que se ha formado. El arco sólo desaparecerá cuando la distancia entre los conductores sea lo suficientemente larga o cuando se interrumpa el flujo de corriente a través del circuito. Una forma eficaz de extinguir los arcos de CC en los sistemas fotovoltaicos es precisamente interrumpiendo el flujo de corriente a través del circuito.

2.2 Clasificación de los arcos eléctricos

Como se muestra en la figura siguiente, el arco eléctrico en los sistemas fotovoltaicos puede dividirse en tres tipos: arco eléctrico en serie, arco eléctrico en paralelo y arco eléctrico a tierra.



Clasificación de los arcos

- **Arco en serie**

Se produce en los cables de CC del mismo circuito por los que circula corriente, normalmente debido a pequeños huecos entre conectores sueltos o mal crimpados.

- **Arco en paralelo**

Se produce entre los polos positivo y negativo de un arreglo o dispositivo, normalmente debido a daños en los cables o conexiones sueltas dentro de las cajas de conexiones u otros puntos del circuito.

- **Arco a tierra**

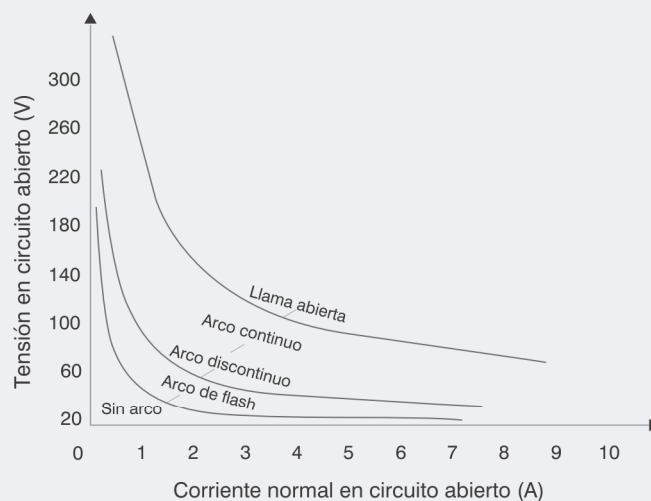
Se produce entre los cables positivos o negativos y los componentes conectados directamente a tierra. La mayoría de las veces se debe a fallos o daños en el aislamiento de los conductores.



Los sistemas fotovoltaicos tienen algunas características inherentes que hacen que los arcos en serie en CC sean más propensos a ocurrir, como alta tensión CC, circuitos complejos, ambientes de instalación al aire libre, etc.

Los arcos de CC de los sistemas fotovoltaicos tienen las siguientes características:

- El arco eléctrico es un fenómeno de descarga de alta potencia. Acompañada del arco, una gran cantidad de energía la energía eléctrica se convierte en energía térmica, lo que provoca temperaturas extremadamente altas en sus proximidades.
- El arco eléctrico es un fenómeno de descarga autosostenida, puede mantener su combustión estable durante mucho tiempo sin extinguirse y no necesariamente sólo en condiciones de alta corriente o alta tensión.
- El arco es un plasma muy ligero. El flujo de gas en la región del arco, incluida la convección natural y el campo magnético generado por el entorno externo, e incluso la propia corriente de arco, pueden hacer que el aspecto físico del arco se remodele con frecuencia.
- La intensidad del arco aumenta al aumentar la tensión, la corriente y la separación, mientras que la estabilidad disminuye al aumentar la separación. La curva característica del arco se muestra en la figura siguiente.



Curva característica de los arcos

La mayoría de los sistemas fotovoltaicos actuales se diseñan a partir de tensiones de 600 Vcc a 1500 Vcc, y generalmente se utilizan módulos de 182/210 mm de alta corriente, todos ellos funcionando a corrientes de 14 A o superiores. Por lo tanto, una vez que se genera un arco eléctrico, existe una alta probabilidad de que aparezcan llamas abiertas y se inicie un incendio.



2.3 Normas relacionadas

Actualmente, las principales normas internacionales para AFCI en sistemas fotovoltaicos incluyen:

- **Norma UL 1699B:** La norma UL Outline fue publicada por primera vez por UL en 2011 y posteriormente actualizada en varias ocasiones. La última versión es la UL 1699B-2018. Esta norma especifica los requisitos de ensayo y los indicadores de rendimiento de los dispositivos de protección contra fallos de arco (AFCI) en sistemas fotovoltaicos.
- **Norma IEC 63027:** La norma internacional desarrollada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en 2017, que especifica los requisitos finales de rendimiento para AFCI en sistemas de generación de energía fotovoltaica.
- **Norma AS/NZS 5033:** La norma publicada por Australia y Nueva Zelanda por primera vez en 2019, bajo el código AS/NZS 5033:2019, especifica los requisitos funcionales y los métodos de ensayo para AFCI en sistemas fotovoltaicos.

- **NEC 2017 Sección 690.11 :** La edición 2017 del Código Eléctrico Nacional (NEC) introdujo por primera vez los requisitos AFCI, estipulando que los dispositivos AFCI que cumplan con la norma UL 1699B deben instalarse en los circuitos de CC de los sistemas fotovoltaicos.
- **Norma CSA C22.2 nº 293:** Norma de seguridad para sistemas fotovoltaicos emitida por el Grupo CSA de Canadá. Desde la edición de 2019, ha incorporado los requisitos funcionales y las disposiciones de ensayo para los dispositivos AFCI, lo que requiere hacer referencia a la norma UL 1699B.

Además, las especificaciones para la instalación de sistemas fotovoltaicos en varios países europeos han aumentado gradualmente la introducción de AFCI en los requisitos, con referencia a la norma IEC 63027.

En resumen, UL 1699B e IEC 63027 son actualmente las dos principales normas internacionales relativas a la detección y protección AFCI. Son muy coherentes en su definición de las funciones AFCI, requisitos técnicos, métodos de prueba y mucho más. Las normas de otros países y regiones suelen hacer referencia a estas dos normas. Esto contribuye a fomentar la interoperabilidad y la internacionalización de la tecnología y los productos AFCI.

Los requisitos específicos para los parámetros clave varían entre las distintas normas AFCI. En comparación, la norma UL 1699 tiene los requisitos más estrictos y detallados para el rendimiento y la tecnología AFCI. La norma IEC 63027 ha adoptado básicamente la norma UL 1699, pero deja abiertos algunos requisitos numéricos específicos. La norma AS/NZS 5033 se refiere principalmente a los requisitos técnicos de la UL 1699, pero no exige niveles de producto de alta tecnología y se centra más en los productos AFCI básicos. Algunos de los principales parámetros de la norma UL1699B, más estricta, son los siguientes:

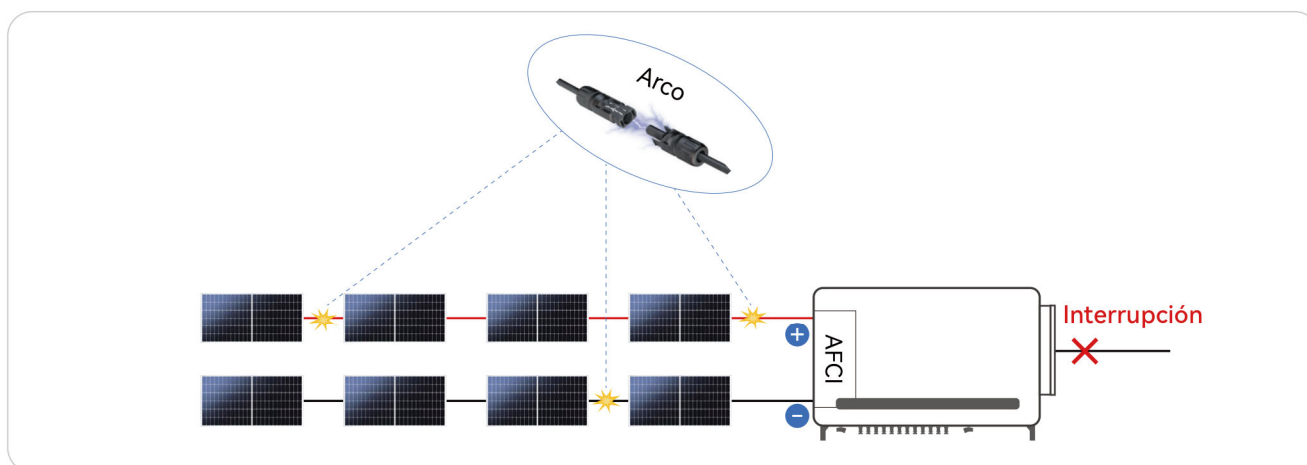
Artículo	UL 1699B: 2021
Distancia de ensayo	80 m: incluida la longitud máxima del cableado entre los módulos fotovoltaicos y los cables de CC.
Velocidad de respuesta	<2.5 S
Energía del arco	<750 J
Posición del arco	Entre terminales CC, entre cables
Corriente de arco máx.	≥ 16 A

En general, todos estos requisitos proponen unas características mínimas para los dispositivos AFCI, como la velocidad de respuesta, la sensibilidad de detección y el rango de protección. Esto fomenta la mejora de la tecnología AFCI y optimiza el rendimiento de los productos seguros del sector.

03. SOLUCIÓN



Cuando se produce un daño (en el marco del módulo, el aislamiento de los cables, los conectores de CC, etc.) que provoca la aparición de un arco eléctrico en cualquier posición del lado de CC, según la Ley de Joule, el efecto térmico en el punto de cortocircuito es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, por lo que cuanto mayor sea la corriente, mayor será el riesgo de incendio. Por lo tanto, una forma eficaz de reducir este riesgo es desconectar el inversor de la red de CA, interrumpiendo la conversión de CC a CA y, en consecuencia, interrumpiendo el flujo de corriente en las matrices fotovoltaicas y el arco eléctrico. En los inversores con dispositivos AFCI, la desconexión de la red de CA la realiza automáticamente el inversor cuando entra en modo de fallo y deja de realizar la conversión.



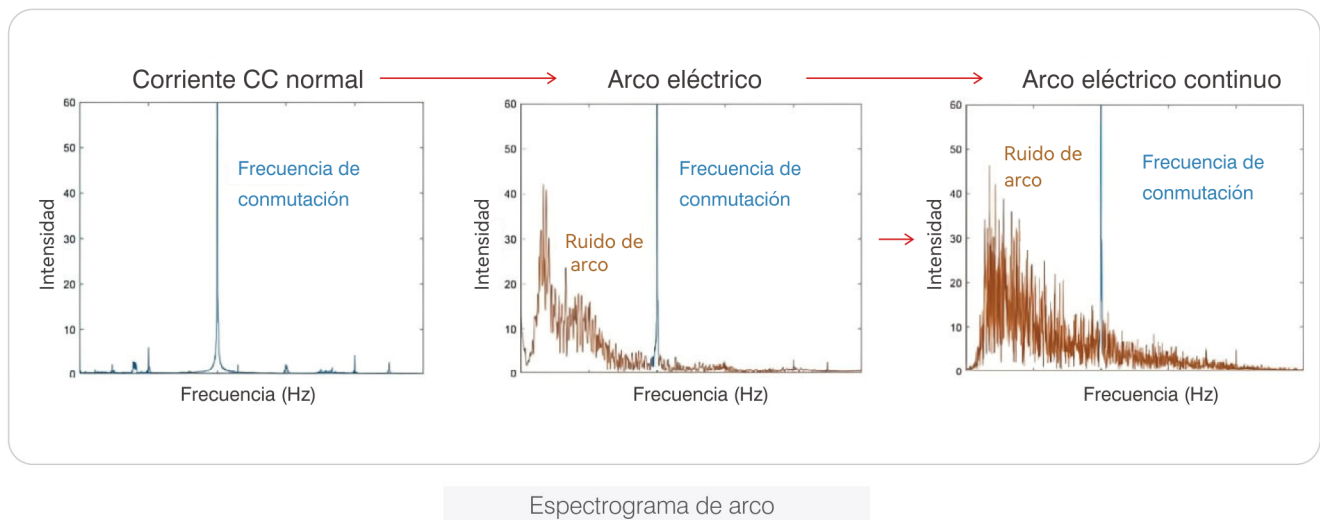
Función de protección de arco de CC del inversor

3.1 ¿Cómo identificar los fallos de arco?

Por consiguiente, la clave de la función de protección de arco de CC en los sistemas fotovoltaicos es identificar la característica de la corriente de arco e interrumpir rápidamente el flujo de corriente de CC en las matrices fotovoltaicas.

Esencialmente, un arco eléctrico se produce cuando la rigidez dieléctrica de un gas se rompe debido a un fuerte campo eléctrico entre conductores, formando un plasma continuo que produce una intensa radiación ultravioleta y un intenso calor. Los mecanismos y posibles localizaciones de los arcos eléctricos en los sistemas fotovoltaicos son diversos. Por ello, la corriente característica de un arco eléctrico suele identificarse mediante mediciones y el uso de métodos de análisis espectral.

Debido a la ionización del aire durante la formación del arco, el plasma estará en un estado desordenado y la corriente que fluye a través del arco mostrará fuertes fluctuaciones. Esta corriente altamente volátil produce una banda de ruido muy ancha en el espectrograma, conocida como "ruido blanco" en el análisis espectral, mientras que la corriente continua normal, sin interferencias, muestra un estado relativamente estable. Como se muestra en la figura siguiente, el espectro de la corriente continua normal sólo muestra la frecuencia de conmutación del inversor cuando no hay arco eléctrico. Sin embargo, aparecerá una cierta "frecuencia de ruido" desde el momento en que aparezca el arco, y se generará una "frecuencia de ruido" aún más desorganizada durante el arco continuo.



Cuando el inversor está operando con la función de protección de arco de CC activada, comprueba la corriente de entrada de cada cadena en tiempo real. Al identificar una curva característica de arco (como se muestra arriba), el inversor pasa automáticamente al modo de fallo, desconectándose de la red de CA e informando de un error al sistema de monitoreo. En consecuencia, el flujo de corriente en el lado de CC se interrumpe y el arco se extingue a tiempo y de forma segura.

3.2 Características técnicas

Desde sus inicios, GoodWe se ha centrado en cuestiones de seguridad para centrales eléctricas y ha tratado continuamente de mejorar la tecnología AFCI, incluidos los algoritmos y las pruebas de precisión. Tras varios cambios tecnológicos, se ha producido un avance significativo en las funciones de identificación de arcos de CC integradas en los inversores GoodWe, y recientemente se ha lanzado una nueva generación de tecnología AFCI, denominada AFCI 3.0.



Inteligencia artificial integrada con aprendizaje profundo

A diferencia de la solución tradicional, en la que los algoritmos de identificación de arcos y los ajustes de límites se basan en datos teóricos, el AFCI de GoodWe calcula y analiza datos masivos, aprendiendo de las características de los arcos reales que se producen sobre el terreno y formando una biblioteca del comportamiento de los arcos. Esto tiene como objetivo eliminar las falsas alertas causadas por el ruido ambiental. La inteligencia integrada incluye aprendizaje profundo, lo que permite al sistema aprender automáticamente y mejorar continuamente los espectros encontrados en la práctica, adaptándose a diferentes escenarios.



Potentes funciones de adquisición de datos

El AFCI de GoodWe dispone de un sensor específico para arcos de CC, que proporciona una gran precisión en la adquisición de datos sobre las características de los arcos que se encuentran en la práctica. Una vez identificado el arco, se informa rápidamente al chip, lo que permite una respuesta rápida y eficaz.



Adaptable y flexible

El AFCI de GoodWe, que cumple los diferentes requisitos de longitud de cable y corriente de funcionamiento de los módulos de alta potencia utilizados en las grandes plantas fotovoltaicas, tiene un amplio rango de detección y es capaz de interrumpir el flujo de corriente en unos pocos milisegundos, superando significativamente el rendimiento mínimo exigido por la norma UL 1699B.

04. VERIFICACIÓN DEL RENDIMIENTO

Con el fin de evaluar con precisión el nivel de rendimiento de la tecnología AFCI 3.0 de GoodWe, el certificador TÜV Rheinland creó un equipo de verificación para llevar a cabo una validación exhaustiva de las tecnologías aplicadas por GoodWe en sus equipos. A continuación se presenta el proceso de evaluación utilizado.

01 Análisis de las demandas de la aplicación AFCI

- **Contenidos evaluados:** Evaluar si los escenarios de aplicación son completos y si las aplicaciones de cada escenario son adecuadas y responden a las necesidades prácticas reales del sector fotovoltaico.
- **Método de evaluación:** Evaluación documental.

02 Evaluación del mecanismo AFCI

- **Contenidos evaluados:** Evaluar si la solución técnica cumple los requisitos previstos para el escenario y si los indicadores de rendimiento demuestran el progreso tecnológico.
- **Método de evaluación:** Evaluación documental + prueba de laboratorio y verificación.

03 Verificación del funcionamiento del AFCI

- **Contenidos evaluados:** Distancia de detección del arco, corriente máxima de entrada, energía detectada, tiempo de desconexión y corriente máxima de funcionamiento.
- **Método de evaluación:** En el laboratorio y en las instalaciones del cliente, pruebas y verificación.

04 Evaluación exhaustiva de los resultados

- **Contenidos evaluados:** Distancia de detección del arco, corriente máxima de entrada, energía detectada, tiempo de desconexión y corriente máxima de funcionamiento.
- **Método de evaluación:** En el laboratorio y en las instalaciones del cliente, pruebas y verificación.

● Evaluación de las demandas de aplicaciones y soluciones técnicas

GoodWe aplica principalmente la tecnología AFCI en productos para sistemas fotovoltaicos residenciales y comerciales e industriales (C&I), con escenarios de uso claros y en cumplimiento de las políticas y normas locales.

Durante las pruebas, GoodWe demostró indicadores técnicos adecuados y soluciones eficientes, como se describe en la sección 3 anterior. Mediante la revisión, el equipo de verificación llegó a la conclusión de que las soluciones técnicas propuestas por GoodWe superan las normas técnicas normativas y del mercado para identificar y extinguir con prontitud los fallos de arco de CC. La solución AFCI 3.0 desarrollada y presentada ofrece hardware y software robustos y precisos tanto para simular y probar dispositivos AFCI, como para desarrollar y construir dispositivos según sus estándares de calidad.

● Verificación del rendimiento

Basándose en los indicadores técnicos desarrollados por GoodWe y en los requisitos de evaluación de la calificación de seguridad antes mencionados, el equipo de verificación aprobó la solución de ensayo presentada en el laboratorio e in situ, que cumple las normas internacionales de referencia.

4.1 Pruebas y validación de AFCI

Test No.	Iarc mínimo (A)	Impp (A)	Vmpp (V)	Voc (V)	Distancia (mm)
1	2.5	3.0	312.0	480.0	0.8
2	7.0	8.0	318.0	490.0	0.8
3	14.0	16.0	318.0	490.0	1.1
4	7.0	8.5	607.0	810.0	2.5
5	18	30.0	318.0	490.0	1.1

Notas:

1. La simulación del arco en serie se realiza en tres puntos: al principio de la cadena en el conductor positivo, en una posición intermedia del circuito y al final de la cadena en el conductor negativo;
2. En cada punto de prueba se simulan dos tipos de bastidores de módulos fotovoltaicos;
3. Todas las pruebas se realizan en serie a lo largo de 200 metros;
4. Estas pruebas se realizaron en dos inversores equipados con la función AFCI: DNS G3 (inversor monofásico para uso residencial) y SMT-US (inversor trifásico para uso comercial), simulando escenarios de aplicación residencial y comercial. La prueba número 5 se realizó únicamente en el inversor de la serie SMT-US.
5. Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio utilizando equipos de prueba como un simulador de matriz fotovoltaica, una red de acoplamiento de CA, una red de simulación de línea y un generador de arco.

De acuerdo con el plan anterior y mediante repetidas pruebas de batería, los resultados de la comprobación son los siguientes:

● Resultados de las pruebas AFCI y verificación del rendimiento

Indicador de resultados	Resultados
Tipo de arco probado	Arcos en corriente continua
Centro de pruebas	Entradas PV, salidas de módulo y mitad de módulo
Distancia máxima de detección	200 m
Corriente de entrada máxima	30 A
Energía del arco	<300 J
Tiempo de respuesta	<500 ms
Precisión de detección	100%

4.2 Evaluación final

Basándonos en los resultados de la evaluación técnica y las pruebas, podemos llegar a la siguiente conclusión:

- 1 La tecnología AFCI 3.0 de GoodWe cuenta con avances tecnológicos, indicadores adecuados y un rendimiento fiable y estable en las pruebas realizadas.
- 2 AFCI cumple los requisitos de rendimiento de las normas actuales más relevantes, como US NEC 2020 y UL1699B, con algunos indicadores que superan los requisitos de la norma.
- 3 Los inversores de string de GoodWe, integrados con una función AFCI, pueden identificar, eliminar y prevenir eficazmente los riesgos de arco eléctrico e incendios en los sistemas fotovoltaicos, así como reducir las pérdidas materiales y humanas.

05. CONCLUSIÓN

Basándonos en el análisis anterior, está claro que los inversores fotovoltaicos son cada vez más inteligentes, digitales y seguros. Mediante el estudio de la norma europea (IEC 63027) y las normas internacionales pertinentes, la tecnología de comprobación e identificación de arcos eléctricos de corriente continua está demostrando ser la clave para garantizar la seguridad de los sistemas fotovoltaicos. Los fabricantes, instaladores y organismos reguladores de regiones más allá de Estados Unidos y Europa también deben colaborar estrechamente para desarrollar y cumplir las normas y especificaciones pertinentes a fin de garantizar que los sistemas fotovoltaicos cumplan las normas de seguridad más estrictas durante su diseño, instalación y funcionamiento.

Con el desarrollo y la expansión de la tecnología fotovoltaica, la tecnología de protección contra el arco eléctrico en sistemas fotovoltaicos evoluciona y avanza constantemente. Esperamos que este artículo contribuya positivamente a impulsar el desarrollo de sistemas fotovoltaicos seguros y a promover la cooperación industrial y el intercambio de conocimientos. A través de los esfuerzos de colaboración, confiamos en establecer un sistema fotovoltaico más fiable, seguro y sostenible, contribuyendo así al prometedor futuro de la energía limpia.





GOODWE



TÜVRheinland®
Precisely Right.

GOODWE TECHNOLOGIES CO., LTD.

Dirección: No. 90 Zijin Rd., New District, Suzhou, 215011, China
Tel: +86 512-69582253
Web: www.goodwe.com



Scan for e-copy