

## **Investigación técnica exhaustiva sobre normas industriales para inversores en la generación de energía solar fotovoltaica**

### **A comprehensive technical investigation on industry standards for inverters in solar PV power generation**

Kumar Mahtani

Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Electrónica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8308-753X>

Contacto: [kumar.mahtani@upm.es](mailto:kumar.mahtani@upm.es)

Artículo recibido: 30/noviembre/2024. Aprobado: 8/enero/2025

#### **Nota**

Traducción realizada por el autor a partir del siguiente artículo publicado en inglés:

Sharma, A. K., Das, V., & Mahtani, K. (2025). A Comprehensive Technical Investigation on Industry Standards for Inverters in Solar PV Power Generation. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(1), 556-566.

#### **Resumen**

La transición mundial a los sistemas solares fotovoltaicos está reconfigurando el panorama energético, impulsada por la necesidad de soluciones energéticas sostenibles. Los inversores fotovoltaicos son cruciales para convertir la corriente continua en alterna y gestionar los flujos de energía hacia y desde la red. Los inversores inteligentes, con funciones avanzadas como el soporte de red, los controles adaptativos y la ciberseguridad, ayudan a afrontar retos como la variabilidad de la potencia y la estabilidad de la red. Este estudio revisa las principales normas internacionales, como UL 1741, IEEE 1547, IEC, y EN, y describe sus requisitos de seguridad, rendimiento e integración en la red. La norma IEC 62109 es el punto de referencia mundial para las pruebas de inversores fotovoltaicos, mientras que otras normas IEC como IEC 62116, 61727 y 61683 cubren aspectos técnicos adicionales como la protección contra el aislamiento, la compatibilidad con la red y la eficiencia. Las normas europeas EN 50524 y 50530 abordan la ficha técnica del inversor y los protocolos de medición de la eficiencia. El cumplimiento de estas normas es esencial para el

funcionamiento seguro, fiable y eficiente de los inversores fotovoltaicos, lo que favorece la integración de la energía solar en la red y fomenta un futuro energético más sostenible.

**Palabras clave:** Anti-islanding; convertidores; eficiencia; energía solar; integración en red; inversores; inversores inteligentes; normas; seguridad; solar fotovoltaica.

### **Abstract**

The global transition to solar photovoltaic (PV) systems is reshaping the energy landscape, driven by the need for sustainable energy solutions. PV inverters are crucial for converting DC power into AC and managing power flows to and from the grid. Smart inverters, with advanced features like grid support, adaptive controls, and cybersecurity, help address challenges like power variability and grid stability. This study reviews key international standards, including UL 1741, IEEE 1547, IEC, and EN, outlining their requirements for safety, performance, and grid integration. IEC 62109 stands as the global benchmark for PV inverter testing, while other IEC standards like IEC 62116, 61727 and 61683 cover additional technical aspects such as anti-islanding, grid compatibility, and efficiency. European standards EN 50524 and 50530 address inverter datasheet and efficiency measurement protocols. Compliance with these standards is essential for the safe, reliable, and efficient operation of PV inverters, supporting the integration of solar energy into the grid and fostering a more sustainable energy future.

**Key words:** Anti-islanding; converters; efficiency; grid integration; inverters; photovoltaic; safety; standards; smart inverters; solar energy.

### **Introducción**

La transición hacia las energías renovables, en particular los sistemas solares fotovoltaicos, está remodelando el panorama energético mundial, con unos índices de adopción que se aceleran rápidamente debido a los incentivos políticos, los avances tecnológicos y la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pourasl et al., 2023). La escalabilidad, los beneficios medioambientales y la rentabilidad de la energía solar la convierten en un componente vital de las estrategias energéticas sostenibles en todo el mundo. Sin embargo, a medida que los sistemas fotovoltaicos alcanzan mayores niveles de penetración, introducen retos técnicos y operativos únicos que amenazan la estabilidad y eficiencia de las redes de distribución eléctrica existentes (Zidane et al., 2023). Estos retos incluyen la variabilidad en la generación de energía, la

regulación de la tensión, la gestión de la potencia reactiva y la sincronización de la red en condiciones dinámicas.

Los inversores inteligentes (Mirafzal & Adib, 2020; Arbab-Zavar et al., 2019; Xue & Guerrero, 2015) han surgido como componentes indispensables para abordar estos retos, permitiendo la integración sin fisuras de la energía solar en las redes eléctricas. A diferencia de los inversores convencionales, los inversores inteligentes incorporan características avanzadas como funcionalidades de apoyo a la red, capacidades de comunicación en tiempo real, algoritmos de control adaptativos e incluso mecanismos de ciberseguridad (Xue et al., 2018; Ali & Thotakura, 2022; Li & Yan, 2023). Facilitan la regulación de la tensión y la frecuencia, mejoran la estabilidad de la red, proporcionan protección contra los desvíos y evitan la sobregeneración durante periodos de alta irradiación solar. Los inversores inteligentes pueden interactuar dinámicamente con las condiciones de la red para optimizar los flujos de energía, lo que los hace fundamentales en la evolución de las arquitecturas de red modernas. Su integración no sólo favorece los sistemas fotovoltaicos individuales, sino también la transformación general del sector energético hacia una infraestructura más distribuida y resiliente.

Los inversores fotovoltaicos desempeñan un papel crucial en la gestión de los flujos de energía dentro de los sistemas solares, dirigiendo la potencia entre los módulos fotovoltaicos, las unidades de almacenamiento y las conexiones a la red (Blaabjerg et al., 2023; Morey et al., 2023; Spring et al., 2016). Las topologías modernas de inversores (Zeb et al., 2018; Kolantla et al., 2020) pretenden abordar cuestiones como la distorsión armónica, el soporte de potencia reactiva, la gestión térmica y la eficiencia en condiciones de carga variables. Por ejemplo, el inversor multinivel de fuente de tensión con puente en H en cascada (CHB-MVSI) ha ganado importancia por su capacidad de producir energía de alta calidad con una distorsión armónica reducida y una eficiencia energética mejorada (Pamujula et al., 2020). Al utilizar múltiples células de puente H en una configuración en serie, esta topología genera una forma de onda de tensión escalonada con numerosos niveles, lo que reduce la tensión en los dispositivos semiconductores de potencia y mejora la fiabilidad (Noman et al., 2018).

Otros diseños avanzados son los inversores de enlace de alta frecuencia (Amirabadi et al., 2014), que emplean un proceso de conversión de una sola etapa para transformar la corriente continua directamente en corriente alterna sincronizada con la red. Esta arquitectura simplificada elimina la

necesidad de convertidores CC-CC independientes, lo que reduce la complejidad, el peso y el coste del sistema al tiempo que mejora la eficiencia global. Los inversores sin transformador (Xiao, 2021; Guo et al., 2022; Dhanamjayulu et al., 2022; Kibria et al., 2023), que evitan los voluminosos transformadores, son especialmente adecuados para instalaciones fotovoltaicas en tejados, ya que ofrecen un tamaño y un peso reducidos junto con innovaciones para mitigar problemas como las corrientes de fuga y los fallos de paso. Entre las soluciones prometedoras para hacer frente a estos retos y mantener al mismo tiempo una alta eficiencia y fiabilidad del sistema se encuentran los inversores de medio puente y doble bobina (Yao, 2021) y los diseños que incorporan interruptores auxiliares (Guo et al., 2018).

En los últimos años, las tendencias emergentes en tecnología de inversores se han centrado en la integración de algoritmos de aprendizaje automático y esquemas de control basados en datos para mejorar la flexibilidad operativa y la tolerancia a fallos (Keyhani & Chatterjee, 2012; (Sun & You, 2021). Estos avances permiten el mantenimiento predictivo, la detección de fallos en tiempo real y la optimización del rendimiento de los inversores basándose en datos históricos y actuales. Además, el cambio hacia diseños de inversores modulares y escalables está permitiendo el despliegue de plantas de energía solar más grandes y soluciones de microrredes, facilitando la adopción generalizada en diversas escalas de operación.

El cumplimiento de las normas internacionales de seguridad y de red sigue siendo un requisito fundamental para los inversores fotovoltaicos, ya que garantiza su funcionamiento fiable y su aceptación en el mercado (Boscaino et al., 2024). Las normas proporcionan directrices exhaustivas sobre compatibilidad con la red, protocolos de seguridad y criterios de rendimiento. Estas normas se revisan periódicamente para abordar los avances en las funcionalidades de apoyo a la red, como las capacidades de paso de tensión, la compensación de potencia reactiva y las medidas de ciberseguridad. Garantizar el cumplimiento de estas normas no sólo mejora la seguridad operativa y la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, sino que también permite a los fabricantes competir a nivel mundial ofreciendo productos certificados y de confianza.

Esta investigación profundiza en las normas internacionales, recopilándolas exhaustivamente y evaluando sus parámetros clave, como la eficiencia, la escalabilidad, el rendimiento térmico y la adaptabilidad a la red, al tiempo que considera cómo influye la evolución de las normas en el diseño y la implantación de los inversores de nueva generación. Al comprender esta dinámica, los

ingenieros, investigadores y responsables políticos pueden desarrollar soluciones que se ajusten a la normativa actual y se anticipen a los requisitos futuros. En última instancia, este trabajo pretende contribuir al diseño de inversores fotovoltaicos preparados para el futuro, garantizando que los sistemas de energía solar sigan siendo fiables, eficientes y sostenibles en un panorama energético en constante evolución.

### **Normas internacionales aplicables a los inversores conectados a la red**

En el contexto de los inversores fotovoltaicos, las normas son indispensables debido a su papel fundamental a la hora de garantizar la seguridad, el rendimiento, la compatibilidad y la fiabilidad. Proporcionan un marco sólido para que los fabricantes diseñen y prueben productos que cumplan estrictos parámetros de seguridad, funcionamiento y calidad (Bower & Key, 2021; Mahmud et al., 2018), como se indica a continuación.

Uno de los principales objetivos de las normas sobre inversores fotovoltaicos es proteger tanto a los usuarios como a los equipos de posibles peligros, como descargas eléctricas, incendios y fallos de los equipos. Al exigir protocolos de seguridad rigurosos, estas normas mejoran la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos y evitan fallos catastróficos, fomentando así la confianza de los consumidores y apoyando su adopción generalizada.

Los inversores fotovoltaicos desempeñan un papel fundamental en la interacción entre los recursos energéticos distribuidos (DER) y la red eléctrica. Las normas definen los criterios de rendimiento y funcionamiento necesarios para las interconexiones a la red de los DER. Esto incluye parámetros para la regulación de la tensión, la respuesta de frecuencia, las capacidades anti-islanding y de protección contra fallos, garantizando que los inversores fotovoltaicos funcionen armoniosamente dentro de la red y contribuyan a su estabilidad. A medida que las redes se vuelven más dinámicas con el aumento de la penetración de las energías renovables, estas normas se actualizan periódicamente para hacer frente a nuevos retos, como el mantenimiento de la inercia de la red y la habilitación de funcionalidades avanzadas como la protección contra fallos de tensión y la compensación de potencia reactiva.

Las normas también sirven como puntos de referencia para la calidad y la fiabilidad, garantizando que los inversores fotovoltaicos ofrezcan un rendimiento constante a lo largo de su vida útil prevista. Las normas proporcionan especificaciones para evaluar la durabilidad y fiabilidad de los inversores, abordando factores como el rendimiento térmico, la resistencia mecánica y la eficiencia

energética. Los productos que cumplen estas normas reducen el tiempo de inactividad y los costes de mantenimiento, mejorando la viabilidad económica de los sistemas fotovoltaicos tanto para los consumidores como para los inversores.

El cumplimiento de las normas es a menudo un requisito previo para la aprobación reglamentaria y la aceptación en el mercado. En muchas regiones, el cumplimiento de las normas es un requisito legal para la conexión a la red, lo que garantiza que los inversores fotovoltaicos cumplan las expectativas de la normativa local. Los productos certificados conforme a estas normas tienen más probabilidades de obtener la aprobación de las compañías eléctricas y los organismos reguladores, lo que facilita una integración más fluida en el mercado. Además, el cumplimiento de las normas mejora la competitividad global, ya que los productos estandarizados son más fácilmente aceptados en los mercados internacionales. Para los fabricantes, el cumplimiento de las normas permite un acceso más amplio al mercado y establece sus productos como soluciones fiables y de alta calidad.

### **Normas de Underwriters Laboratories (UL)**

La norma UL1741 (UL, 2021), desarrollada por Underwriters Laboratories (UL), desempeña un papel fundamental a la hora de garantizar la seguridad, el rendimiento y la fiabilidad de los inversores y los equipos relacionados utilizados en los DER, especialmente en los sistemas fotovoltaicos. Esta norma se introdujo en respuesta al rápido crecimiento de las tecnologías de energías renovables y a la creciente necesidad de integrar estos recursos de forma segura y eficiente en la red eléctrica. La norma UL1741 establece estrictos protocolos de seguridad que rigen el diseño, la construcción y el rendimiento operativo de los inversores, convertidores, controladores y sistemas de interconexión conectados a la red.

El principal objetivo de la norma UL1741 es mitigar los riesgos potenciales asociados a factores eléctricos, mecánicos y medioambientales. Mediante la definición de requisitos de seguridad exhaustivos, la norma pretende proteger tanto a los usuarios como a la infraestructura eléctrica en general. Su ámbito de aplicación incluye una amplia gama de equipos conectados a la red, desde inversores autónomos hasta sistemas interactivos con la red eléctrica, convertidores de potencia, reguladores de carga y dispositivos de interconexión.

En conjunto, la norma UL1741 refuerza significativamente el papel de los inversores fotovoltaicos en la estabilidad de la red. Los protocolos técnicos clave de la norma UL1741 para inversores fotovoltaicos son los siguientes:

a) Funciones de apoyo a la red mejoradas

- Tasas de rampa de arranque suave: La norma UL1741 exige que los inversores presenten velocidades de rampa suaves y predecibles en la transición a la red. Esto minimiza las fluctuaciones repentinas de potencia y ayuda a mantener la estabilidad de la red cuando los inversores se conectan inicialmente.
- Control del factor de potencia: Los inversores deben aplicar un factor de potencia que se ajuste a los requisitos de la red, contribuyendo a una regulación estable de la tensión. Al controlar la diferencia de fase entre la tensión y la corriente, los inversores garantizan una transferencia de potencia eficiente y minimizan la demanda de potencia reactiva.
- Gestión de la potencia reactiva: La norma UL1741 exige que los inversores sean capaces de suministrar potencia reactiva según sea necesario, lo que resulta esencial para mantener los niveles de tensión en toda la red, especialmente cuando la demanda fluctúa.
- Control de la potencia activa: Los inversores deben regular dinámicamente su potencia activa en respuesta a los cambios de frecuencia y tensión de la red. De este modo, el inversor contribuye a estabilizar la red durante las variaciones de carga o las desviaciones de frecuencia.

b) Alcance ampliado

La norma UL1741 permite que los inversores sigan funcionando durante pequeñas fluctuaciones de tensión y frecuencia. A diferencia de los requisitos anteriores, que exigían la desconexión al detectar condiciones fuera de rango, este protocolo actualizado anima a los inversores a apoyar la estabilidad de la red permaneciendo conectados durante las fluctuaciones transitorias. Esto ayuda a reducir la probabilidad de desconexiones innecesarias de los inversores, contribuyendo a la fiabilidad general de la red.

c) Capacidad de desplazamiento

Una de las características más destacadas de la norma UL1741 es la capacidad de autonomía (ride-through), que exige que los inversores permanezcan en línea durante perturbaciones breves de la red, como caídas de tensión, bajadas de frecuencia o fallos transitorios. Esto garantiza que los sistemas fotovoltaicos sigan suministrando energía y contribuyan a la estabilización de la red durante interrupciones breves, en lugar de agravar el problema desconectándose. En esencia, esta función mejora la resistencia de la red aprovechando los recursos de energías renovables en momentos de inestabilidad.

d) Funcionamiento autónomo

La norma UL1741 exige que los inversores funcionen de forma autónoma sin necesidad de comunicación directa con las compañías eléctricas. Esta autonomía garantiza que los inversores puedan supervisar continuamente las condiciones de la red y responder a ellas de forma local, lo que permite realizar ajustes en tiempo real en función de los cambios en los niveles de tensión y frecuencia. Este enfoque descentralizado mejora la flexibilidad general y la capacidad de respuesta de los sistemas fotovoltaicos en un entorno de red.

e) Protocolos de parada de seguridad

En caso de apagón o fallo de la red, la norma UL1741 especifica que los inversores deben apagarse inmediatamente para evitar la retroalimentación de electricidad a la red. Esta medida de protección es crucial para proteger a los trabajadores de las empresas de servicios públicos y al personal de primeros auxilios de posibles descargas eléctricas mientras trabajan en la red. Al garantizar que no se transmita energía durante los cortes, este protocolo reduce significativamente los riesgos de seguridad asociados a la generación de energía distribuida.

### **Normas del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)**

La norma IEEE 1547 (IEEE, 2018), desarrollada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), es una piedra angular para la interconexión e integración de los DER con la red eléctrica. Esta norma establece directrices exhaustivas de rendimiento, funcionamiento, pruebas y seguridad para los DER, incluida la energía solar fotovoltaica, los aerogeneradores, los sistemas de almacenamiento de energía y otras tecnologías de energías renovables. La norma se centra en diversos aspectos técnicos y operativos, como la regulación de la tensión, la respuesta en frecuencia, la protección contra el desacoplamiento y las capacidades de "ride-through" (Ninad et al., 2022; Ninad & Couture, 2023; Couture & Ninad, 2024). La aplicación de la norma IEEE 1547 garantiza que, a medida que se integren más DER en las redes eléctricas, lo harán de forma segura, fiable y con las mínimas perturbaciones para el funcionamiento de la red.

El objetivo central de IEEE 1547 es definir directrices coherentes y uniformes para la interconexión de los DER con los sistemas de energía eléctrica (EPS). Esto incluye especificaciones de rendimiento, requisitos operativos, protocolos de seguridad y directrices de mantenimiento que garanticen que los DER puedan integrarse perfectamente en la red sin afectar

a la estabilidad o el rendimiento de la red eléctrica en general. La norma fomenta el intercambio fluido de energía entre los DER y la red al definir criterios claros de interoperabilidad que, en última instancia, mejoran la eficiencia de la gestión de la red y el despliegue de tecnologías avanzadas.

Otro objetivo fundamental de la norma IEEE 1547 es ayudar a mantener o mejorar el rendimiento y la fiabilidad de la red, incluso cuando se integran altos niveles de fuentes de energía distribuida. La norma garantiza que las fuentes de energía distribuida, como los sistemas fotovoltaicos, funcionen en armonía con la red, manteniendo los niveles de tensión adecuados y proporcionando servicios de red esenciales, como la regulación de la frecuencia. Esto se consigue proporcionando directrices consensuadas para las prácticas de interconexión, garantizando que las DER contribuyan positivamente a la estabilidad de la red, especialmente en regiones con altos niveles de penetración de energías renovables.

Las directrices técnicas específicas de la norma IEEE 1547 pueden resumirse como sigue:

a) Regulación de la tensión

La norma IEEE 1547 clasifica las prestaciones de los DER con respecto a la regulación de la tensión. La norma define dos categorías de rendimiento distintas. La categoría A cubre las capacidades mínimas requeridas para la regulación de la tensión con el fin de mantener la estabilidad de la red. La categoría B incluye funciones de regulación de tensión más avanzadas, que pueden ser necesarias en entornos de red más exigentes. Además, IEEE 1547 exige que los DER sean capaces de ajustar su salida para apoyar la regulación de la tensión, aunque el nivel exacto de rendimiento puede variar en función de los requisitos específicos de la compañía eléctrica.

b) Calidad de la energía

La norma hace especial hincapié en el mantenimiento de la calidad de la energía, sobre todo en cuestiones como el parpadeo de la tensión. El parpadeo, que resulta de las fluctuaciones de tensión y se manifiesta como variaciones visibles de la intensidad de la luz, puede causar molestias y problemas de funcionamiento en equipos sensibles. La norma IEEE 1547 especifica que los DER deben minimizar los niveles de parpadeo, y los métodos de medición del parpadeo se detallan en normas relacionadas como la IEEE 1453 y la IEC 61000-3-7.

c) Capacidad de desplazamiento

Una de las características más destacadas de la norma IEEE 1547 es su requisito de capacidad de paso, que garantiza que los DER permanezcan conectados a la red durante los huecos de tensión o las caídas de frecuencia. Esto es esencial para mantener la red durante las perturbaciones y evitar desconexiones innecesarias. La norma define diferentes categorías de transferencia, con capacidades de transferencia de Categoría II y Categoría III consideradas suficientes para garantizar la fiabilidad del sistema. Esta característica contribuye a la resiliencia de la red, ya que permite a los DER contribuir a la estabilización durante fallos transitorios o desequilibrios de la red.

d) Protección anti-islanding

La norma IEEE 1547 exige que todos los DER incorporen una protección anti-islanding para evitar que sigan inyectando energía a la red durante un apagón. La desconexión en isla puede plantear importantes riesgos para la seguridad de los trabajadores de las empresas eléctricas y demás personal. La norma establece criterios específicos de detección y respuesta para garantizar que los DER se desconecten automáticamente cuando la red se cae, evitando así posibles daños.

En resumen, la norma IEEE 1547 es un marco completo que aborda las necesidades técnicas y operativas fundamentales para integrar los recursos energéticos distribuidos en la red. Su enfoque en el rendimiento, la fiabilidad y la seguridad garantiza que las tecnologías de energías renovables, como los sistemas fotovoltaicos, puedan contribuir a la estabilidad de la red, facilitar una integración eficiente y apoyar la evolución continua de la infraestructura energética. A través de directrices claras sobre regulación de la tensión, calidad de la energía, capacidad de transporte y otros factores clave, IEEE 1547 contribuye a garantizar una red robusta y resistente en la era del despliegue generalizado de las energías renovables.

### **Normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC)**

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha desarrollado una serie de normas esenciales para garantizar la seguridad, el rendimiento y la compatibilidad de los inversores fotovoltaicos (Morari et al., 2023). Estas normas proporcionan un marco reconocido internacionalmente que aborda los desafíos únicos asociados a los sistemas fotovoltaicos, garantizando que los inversores, que convierten la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna

(CA) para su uso en red o autónomo, funcionen de forma segura, fiable y eficiente. Las normas de la IEC son cruciales no sólo para garantizar la seguridad de los usuarios y la protección de los equipos, sino también para la integración sin problemas de las energías renovables en las redes eléctricas.

La serie IEC 62109, que se centra en los requisitos de seguridad de los equipos de conversión de potencia utilizados en sistemas fotovoltaicos, es fundamental. Sin embargo, otras normas IEC complementan y amplían estas directrices para abordar diversos aspectos de la funcionalidad, seguridad y compatibilidad de los inversores fotovoltaicos. Las diversas normas de la IEC que regulan los inversores fotovoltaicos proporcionan un marco exhaustivo y mundialmente reconocido para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los inversores fotovoltaicos. Las normas IEC clave para los inversores fotovoltaicos son las siguientes:

#### *Serie IEC 62109*

Las normas IEC 62109 garantizan la seguridad y fiabilidad de los inversores fotovoltaicos al definir los requisitos de diseño y construcción. Son esenciales para la conformidad global y ayudan a los fabricantes a cumplir los estrictos protocolos de seguridad.

- IEC 62109-1 (IEC, 2011): Esta norma establece los requisitos generales de seguridad para los inversores fotovoltaicos, cubriendo aspectos eléctricos, mecánicos, térmicos y medioambientales. Garantiza que los inversores estén diseñados para soportar diversas condiciones de funcionamiento, evitando riesgos como descargas eléctricas, incendios y daños en los equipos.
- IEC 62109-2 (IEC, 2014): Esta parte se centra en requisitos específicos para tipos concretos de inversores, abordando riesgos adicionales asociados a diferentes tecnologías o configuraciones de inversores. Por ejemplo, puede esbozar protocolos de seguridad para microinversores o inversores de cadenas que tienen características únicas en comparación con los sistemas centralizados.

Los aspectos clave de la seguridad en las normas IEC 62109 incluyen:

- Seguridad eléctrica: Garantizar el aislamiento y la conexión a tierra adecuados, la protección contra sobrecorriente y el aislamiento eléctrico para evitar descargas eléctricas o riesgos de incendio.

- Seguridad mecánica: Directrices para una construcción robusta que garantice que los inversores puedan resistir impactos ambientales como la entrada de polvo o agua (clasificaciones IP) y la tensión mecánica.
- Seguridad térmica: Requisitos de protección contra el sobrecalentamiento para garantizar que los inversores puedan disipar el calor de forma eficaz, reduciendo el riesgo de incendios y fallos del sistema.
- Seguridad medioambiental: Normas de resistencia a la intemperie a temperaturas extremas, humedad, exposición a los rayos UV y durabilidad general para garantizar un rendimiento fiable a largo plazo en condiciones variadas.

*IEC 62116: Prevención Anti-Islanding (IEC, 2014)*

La norma IEC 62116 aborda específicamente la protección anti-islanding de los inversores fotovoltaicos. Por "insularización" se entiende la situación en la que un sistema fotovoltaico sigue inyectando electricidad a la red durante un corte de suministro, lo que supone un riesgo importante para los trabajadores de la empresa y los equipos de intervención inmediata. La norma IEC 62116 establece protocolos para garantizar que los inversores fotovoltaicos detecten y se desconecten automáticamente de la red en tales situaciones, evitando así la peligrosa retroalimentación y garantizando la seguridad del sistema en caso de fallo de la red.

*IEC 61727: Interfaz de servicios públicos y compatibilidad con la red (IEC, 2004)*

La norma IEC 61727 especifica los requisitos técnicos para la interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica. Garantiza que los inversores cumplan las normas necesarias de tensión, frecuencia y calidad de la energía exigidas por las compañías eléctricas para una integración segura y fiable en la red. La norma proporciona directrices para garantizar que los sistemas fotovoltaicos contribuyan a la estabilidad de la red y no perturben su funcionamiento introduciendo fluctuaciones o irregularidades perjudiciales.

*IEC 61683: Medición de la eficiencia (IEC, 1999)*

La norma IEC 61683 define los métodos de ensayo para medir la eficiencia de los inversores fotovoltaicos. Esta norma proporciona una forma precisa y reproducible de determinar la eficacia con la que un inversor convierte la corriente continua de los paneles solares en corriente alterna utilizable. La eficiencia es un factor de rendimiento crítico para los inversores, ya que una mayor

eficiencia se traduce directamente en una mayor captación de energía y una reducción de las pérdidas de energía, lo que hace que el sistema fotovoltaico sea más rentable y sostenible.

*IEC 60068-6: Pruebas de compatibilidad ambiental (IEC, 2007)*

La norma IEC 60068-6 describe los métodos de ensayo ambiental de los inversores fotovoltaicos para evaluar su capacidad de soportar condiciones ambientales extremas. Esto incluye la exposición al frío, al calor seco y al calor húmedo para simular una serie de condiciones de temperatura y humedad. Las pruebas garantizan que los inversores puedan funcionar de forma fiable y segura bajo diversas tensiones ambientales, ya sea en regiones frías, climas cálidos y secos o entornos húmedos. La durabilidad de los inversores en estas condiciones es crucial para garantizar su rendimiento a largo plazo y minimizar la necesidad de mantenimiento.

*IEC 60529: Grados de Protección IP (IEC, 2018)*

La norma IEC 60529 define los grados de protección IP (Ingress Protection) de las cajas eléctricas, lo que resulta esencial para determinar la resistencia de un inversor fotovoltaico a la entrada de objetos sólidos (como polvo) y líquidos (como agua). Los inversores fotovoltaicos deben cumplir normas IP específicas en función del entorno en el que vayan a utilizarse. Por ejemplo, los inversores de exterior pueden requerir una clasificación IP más alta para garantizar que son resistentes a la intemperie y pueden funcionar sin fallos en entornos lluviosos o polvorientos.

*IEC 61000: Compatibilidad electromagnética (IEC, varios)*

La norma IEC 61000 proporciona directrices para garantizar la compatibilidad electromagnética (CEM) de los inversores fotovoltaicos. Las normas CEM garantizan que los inversores no generen interferencias electromagnéticas que puedan perturbar otros dispositivos electrónicos o sistemas de comunicación, al tiempo que garantizan que los inversores sean resistentes a las perturbaciones electromagnéticas externas. Esto es crucial para mantener la integridad operativa tanto del inversor como de otros dispositivos electrónicos conectados a la red o al sistema del inversor.

*IEC 62909: Convertidores de potencia bidireccionales conectados a la red (IEC, 2018)*

La norma IEC 62909 se centra en la interconexión y el funcionamiento de los convertidores de potencia bidireccionales conectados a la red, un área de creciente importancia con el auge de los sistemas de almacenamiento de energía y los vehículos eléctricos. Esta norma proporciona los requisitos técnicos necesarios para los convertidores de potencia que facilitan el flujo bidireccional

de electricidad entre la red y los sistemas de almacenamiento de energía o los vehículos eléctricos. En el contexto de los inversores fotovoltaicos, esta norma es muy importante, ya que permite la integración del almacenamiento de energía y la capacidad de los inversores para gestionar los flujos de energía en ambas direcciones. Esta capacidad es crucial para mantener la estabilidad de la red, especialmente en regiones con una alta penetración de fuentes de energía renovables.

*IEC 62477: Requisitos de seguridad para sistemas y equipos convertidores de electrónica de potencia (IEC, 2023)*

La norma IEC 62477 aborda los requisitos de seguridad de los sistemas y equipos convertidores de electrónica de potencia, entre los que se incluyen los inversores de potencia, los reguladores de carga y otros componentes críticos de los sistemas fotovoltaicos. Esta norma es especialmente importante para garantizar que los sistemas electrónicos de potencia -que a menudo incluyen componentes electrónicos complejos de alto voltaje- funcionen de forma segura para los usuarios y cumplan las normativas de seguridad internacionales.

### **Normas Europeas (EN)**

Las normas europeas desempeñan un papel fundamental a la hora de garantizar que los inversores fotovoltaicos cumplan los requisitos de rendimiento, seguridad e interoperabilidad que son críticos para el funcionamiento eficiente de los sistemas de energía solar conectados a la red. Estas normas, elaboradas por organizaciones como el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica), están diseñadas para garantizar la coherencia en el diseño, el funcionamiento y las pruebas de los inversores fotovoltaicos en toda Europa. Dos normas europeas importantes para los inversores fotovoltaicos son la EN 50524 y la EN 50530. Estas normas abordan los aspectos esenciales de la presentación de datos, la eficiencia y la evaluación del rendimiento de los inversores utilizados en sistemas de energía solar.

*EN 50524: Ficha técnica y placa de características de los inversores fotovoltaicos (CENELEC, 2022)*

La norma EN 50524 especifica los requisitos para la información de la hoja de datos y la placa de características proporcionada con los inversores fotovoltaicos conectados a la red. Esta norma pretende garantizar que tanto los fabricantes como los usuarios tengan acceso al conjunto mínimo de datos necesarios para configurar y operar un sistema fotovoltaico de forma segura y óptima.

Proporciona una descripción técnica que refleja la construcción duradera y las características de rendimiento del inversor. Los puntos clave de la norma EN 50524 incluyen:

- Información esencial para la configuración: La norma EN 50524 exige que la ficha técnica y la placa de características del inversor incluyan información esencial que garantice una instalación segura y un rendimiento óptimo de los inversores fotovoltaicos en un sistema conectado a la red. Esto incluye parámetros como el rango de tensión de entrada, la potencia máxima de CC, la potencia máxima de salida de CA y los índices de eficiencia.
- Rendimiento y especificaciones técnicas: La ficha técnica debe proporcionar detalles sobre los parámetros de rendimiento del inversor, como la capacidad del factor de potencia, los rangos de regulación de tensión y los límites de distorsión armónica. Estas especificaciones ayudan a los diseñadores de sistemas y a los instaladores a adaptar los inversores a los requisitos operativos del sistema fotovoltaico y de la red.
- Durabilidad y construcción: La placa de características y la hoja de datos también incluyen información sobre la calidad de construcción del inversor, incluidos los índices de durabilidad ambiental y mecánica. Esto garantiza que el inversor está construido para soportar factores ambientales externos como variaciones de temperatura, humedad y posible exposición al polvo o al agua, todos ellos factores esenciales para garantizar la fiabilidad a largo plazo del equipo.
- Seguridad y conformidad: La norma EN 50524 exige que las hojas de datos y las placas de características de los inversores incluyan datos de seguridad, como los requisitos de aislamiento eléctrico y las normas de protección, para garantizar que el inversor cumple las normas de seguridad europeas. Esto es importante para garantizar la seguridad de los usuarios, instaladores y operadores durante la vida útil del inversor.

Al proporcionar este conjunto estandarizado de información, la norma EN 50524 ayuda a garantizar que los inversores fotovoltaicos conectados a la red puedan entenderse fácilmente y desplegarse con seguridad sobre el terreno, minimizando los errores de instalación y maximizando la fiabilidad operativa.

*EN 50530: Eficiencia global de los inversores fotovoltaicos (CENELEC, 2013)*

La norma EN 50530 describe los procedimientos para medir la eficiencia global de los inversores fotovoltaicos, centrándose en el rendimiento del seguimiento del punto de máxima potencia

(MPPT). Esta norma desempeña un papel crucial a la hora de evaluar la eficiencia de conversión de energía de los inversores y garantizar que funcionen con la mayor eficiencia posible tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Entre sus puntos clave se incluyen:

- **Evaluación del rendimiento del MPPT:** Uno de los principales objetivos de la norma EN 50530 es evaluar la precisión del sistema de seguimiento del MPPT en los inversores fotovoltaicos. El MPPT es una característica crítica de los inversores fotovoltaicos, ya que garantiza que el inversor ajuste continuamente el sistema para extraer la máxima cantidad de energía de los paneles solares. La norma proporciona un marco para evaluar tanto la eficiencia MPPT estática (es decir, cuando la entrada solar es constante) como la eficiencia MPPT dinámica (es decir, durante las variaciones en la irradiancia solar).
- **Cálculo de la eficiencia global del inversor:** Basándose en la eficiencia MPPT y en la eficiencia de conversión del inversor, la norma EN 50530 proporciona un método para calcular la eficiencia global del inversor fotovoltaico. La eficiencia global considera tanto las condiciones estáticas como las dinámicas, teniendo en cuenta lo bien que el inversor convierte la potencia de CC de los paneles solares en potencia de CA que puede inyectarse a la red. La eficiencia MPPT dinámica se indica por separado, proporcionando información sobre el rendimiento del inversor en condiciones de fluctuación de la luz.
- **Evaluación del rendimiento energético:** Al determinar la eficiencia del sistema MPPT, la norma EN 50530 ayuda a los fabricantes y operadores de sistemas a evaluar cuánto rendimiento energético puede proporcionar un inversor fotovoltaico específico en diversas condiciones ambientales. Esta información es crucial para predecir el rendimiento a largo plazo del inversor y para optimizar el diseño del sistema fotovoltaico global.
- **Evaluación comparativa:** La norma también proporciona una base para comparar el rendimiento de distintos inversores, lo que permite a los clientes, fabricantes y diseñadores de sistemas comparar los inversores en función de su eficiencia energética. Esto ayuda a seleccionar los inversores más eficientes para proyectos solares específicos, garantizando que el sistema proporcione la máxima generación de energía al menor coste posible.
- **Rendimiento operativo a lo largo del tiempo:** la norma EN 50530 también tiene en cuenta la degradación del rendimiento de los inversores a lo largo del tiempo. Al normalizar los métodos

de medición de la eficiencia, la norma ayuda a los operadores a hacer un seguimiento de la salud operativa a largo plazo de los inversores, garantizando que el mantenimiento del sistema se realice cuando sea necesario para mantener altos niveles de producción de energía.

### **Conclusiones**

Comprender y cumplir el variado conjunto de normas es crucial para el diseño, la fabricación y la integración de inversores fotovoltaicos fiables y seguros. Estas normas abordan diferentes necesidades regionales, especificaciones técnicas y requisitos de seguridad, garantizando que los inversores funcionen de forma óptima en diferentes entornos de red y mejorando al mismo tiempo la fiabilidad y estabilidad generales de los sistemas de energía renovable en todo el mundo. El cumplimiento de estas normas fomentará la integración segura de las tecnologías de energía solar en la red eléctrica, promoviendo la transición hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

### **Bibliografías**

- Ali, M., & Thotakura, N. L. (2022). Smart inverters and controls for grid-connected renewable energy sources. In S. K. Das, M. R. Islam, & W. Xu (Eds.), *Advances in Control Techniques for Smart Grid Applications* (pp. 201–266). Singapore: Springer.
- Amirabadi, M., Balakrishnan, A., Toliyat, H. A., & Alexander, W. C. (2014). High-frequency AC-link PV inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(1), 281–291.
- Arbab-Zavar, B., Palacios-Garcia, E. J., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2019). Smart inverters for microgrid applications: A review. *Energies*, *12*(5), 840.
- Blaabjerg, F., Yang, Y., Kim, K. A., & Rodriguez, J. (2023). Power electronics technology for large-scale renewable energy generation. *Proceedings of the IEEE*, *111*(4), 335–355.
- Boscaino, V., Ditta, V., Marsala, G., Panzavecchia, N., Tinè, G., Cosentino, V., Cataliotti, A., & Di Cara, D. (2024). Grid-connected photovoltaic inverters: Grid codes, topologies, and control techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *189*, Part A, 113903.
- Bower, W., & Key, T. (2021). Status of microgrid protection and related standards and codes: Protection supports integration. *IEEE Power and Energy Magazine*, *19*(3), 83–92.
- Couture, E. D., & Ninad, N. (2024). Demonstration of a simulated inverter laboratory using unintentional islanding tests from IEEE 1547.1. In *2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (pp. 0075–0080). Seattle, WA, USA.

- Dhanamjayulu, C., Sanjeevikumar, P., & Muyeen, S. M. (2022). A structural overview on transformer and transformer-less multilevel inverters for renewable energy applications. *Energy Reports*, 8, 10299–10333.
- European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2013). *EN Standard 50530: Overall efficiency of grid-connected photovoltaic inverters*.
- European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2022). *EN Standard 50524: Data sheet for photovoltaic inverters*.
- Guo, X., Yang, Y., & Zhu, T. (2018). ESI: A novel three-phase inverter with leakage current attenuation for transformerless PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(4), 2967–2974.
- Guo, X., Yang, Y., & Zhu, T. (2022). Overview of recent advanced topologies for transformerless dual-grounded inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(10), 12679–12704.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2018). *IEEE Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces (IEEE Std 1547-2018)*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (1999). *IEC Standard 61683: Photovoltaic systems—Power conditioners—Procedure for measuring efficiency*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2004). *IEC Standard 61727: Photovoltaic (PV) systems—Characteristics of the utility interface*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2007). *IEC Standard 60068-2-6: Environmental testing—Part 2-6: Tests—Test Fc: Vibration (sinusoidal)*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2010). *IEC Standard 62109-1: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems—Part 1: General requirements*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2011). *IEC Standard 62109-2: Safety of power converters for use in photovoltaic power systems—Part 2: Particular requirements for inverters*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2014). *IEC Standard 62116: Utility-interconnected photovoltaic inverters—Test procedure of islanding prevention measures*.
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2018). *IEC Standard 60529: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*.

- International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC Standard 61000: Electromagnetic compatibility (EMC)*.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2023). *IEC Standard 62477: Safety requirements for power electronic converter systems and equipment - Part 1: General*.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2018). *IEC Standard 62909-1: Bi-directional grid-connected power converters - Part 1: General requirements*.
- Keyhani, A., & Chatterjee, A. (2012). Automatic generation control structure for smart power grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1310–1316.
- Kibria, M. F., Elsanabary, A., Tey, K. S., Mubin, M., & Mekhilef, S. (2023). A comparative review on single-phase transformerless inverter topologies for grid-connected photovoltaic systems. *Energies*, 16, 1363.
- Kolantla, D., Mikkili, S., Pendem, S. R., & Desai, A. A. (2020). Critical review on various inverter topologies for PV system architectures. *IET Renewable Power Generation*, 14, 3418–3438.
- Li, Y., & Yan, J. (2023). Cybersecurity of smart inverters in the smart grid: A survey. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(2), 2364–2383.
- Mahmud, R., Hoke, A., & Narang, D. (2018). Validating the test procedures described in UL 1741 SA and IEEE P1547.1. In *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)* (pp. 1445–1450). Waikoloa, HI, USA.
- Mirafzal, B., & Adib, A. (2020). On grid-interactive smart inverters: Features and advancements. *IEEE Access*, 8, 160526–160536.
- Morey, M., Gupta, N., Garg, M. M., & Kumar, A. (2023). A comprehensive review of grid-connected solar photovoltaic system: Architecture, control, and ancillary services. *Renewable Energy Focus*, 45, 307–330.
- Morari, H. B., Bortolini, R. J. F., Bellinaso, L. V., & Michels, L. (2023). Improved methodology for testing the compliance of residual current detection of non-isolated grid-connected photovoltaic inverters. *Eletrônica de Potência*, 28(3), 256–263.
- Ninad, N., Desjardins-Couture, E., & Apablaza-Arancibia, E. (2022). Validating IEEE 1547 capabilities of DER inverter model using a real-time simulated inverter laboratory testbed. In *2022 IEEE 10th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)* (pp. 105–110). Oshawa, ON, Canada.

- Ninad, N., & D. Couture, E. (2023). Assessment of a DER inverter model for IEEE 1547 ride-through requirements using a model in the loop testbed. In *2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 1–6). San Juan, PR, USA.
- Noman, A. M., Al-Shamma’a, A., Addoweesh, K. E., Alabduljabbar, A. A., & Alolah, A. I. (2018). Cascaded multilevel inverter topology based on cascaded H-bridge multilevel inverter. *Energies, 11*, 895.
- Pamujula, M., Ohja, A., Kulkarni, R. D., & Swarnkar, P. (2020). Cascaded ‘H’ bridge-based multilevel inverter topologies: A review. In *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)* (pp. 1–7). Belgaum, India.
- Pourasl, H. H., Barenji, R. V., & Khojastehnezhad, V. M. (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports, 10*, 3474–3493.
- Spring, A., Wirth, G., Becker, G., Pardatscher, R., & Witzmann, R. (2016). Grid influences from reactive power flow of photovoltaic inverters with a power factor specification of one. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(3), 1222–1229.
- Sun, L., & You, F. (2021). Machine learning and data-driven techniques for the control of smart power generation systems: An uncertainty handling perspective. *Engineering, 7*, 1239–1247.
- Underwriters Laboratories (UL) (2021). *Standard for Inverters, Converters, Controllers, and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources (UL 1741 Ed. 3)*.
- Xue, Y., & Guerrero, J. M. (2015). Smart inverters for utility and industry applications. In *Proceedings of the PCIM Europe 2015: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management* (pp. 1–8). Nuremberg, Germany.
- Xue, Y., Starke, M., Dong, J., Olama, M., Kuruganti, T., Taft, J., & Shankar, M. (2018). On a future for smart inverters with integrated system functions. In *Proceedings of the 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)* (pp. 1–8). Charlotte, NC, USA.
- Xiao, H. (2021). Overview of transformerless photovoltaic grid-connected inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics, 36*(1), 533–548.
- Yao, Z. (2021). Review of dual-buck-type single-phase grid-connected inverters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9*(4), 4533–4545.

Zeb, K., Uddin, W., Khan, M. A., Ali, Z., Ali, M. U., Christofides, N., & Kim, H. J. (2018). A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid-connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *94*, 1120–1141.

Zidane, T. E. K., et al. (2023). Grid-connected solar PV power plants optimization: A review. *IEEE Access*, *11*, 79588–79608.