

Avances recientes en inversores multifuncionales en sistemas fotovoltaicos.

Recent advances in multifunctional inverters in photovoltaic systems.

Edison Andrés Caicedo-Peñaranda¹, Aldo Pardo-García², María Alejandra Mantilla-Villalobos³,
Luis David Pabón-Fernández⁴

^{1,2,4}Universidad de Pamplona, Pamplona - Colombia

³Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga - Colombia

ORCID: ¹[0000-0003-4557-1061](https://orcid.org/0000-0003-4557-1061), ²[0000-0003-2040-9420](https://orcid.org/0000-0003-2040-9420), ³[0000-0002-8388-3886](https://orcid.org/0000-0002-8388-3886), ⁴[0000-0003-1788-4781](https://orcid.org/0000-0003-1788-4781)

Recibido: 24 de noviembre de 2023.

Aceptado: 5 de abril de 2024.

Publicado: 1 de mayo de 2024.

Resumen- Los inversores pueden ser considerados una tecnología en desarrollo, en la cual, durante cerca de cinco décadas, se han presentado avances significativos que han creado líneas de investigación enfocadas en topologías, métodos de control, optimización y modelado, entre otros tópicos. El presente artículo revisa contribuciones recientes enfocadas en el inversor con características multifuncionales para sistemas fotovoltaicos, proporcionando a los lectores una revisión sintetizada como herramienta de conocimiento para afrontar los desafíos de la integración de los inversores y el perfeccionamiento del sistema eléctrico en términos de calidad de la energía.

Palabras clave: inversor, multifuncional, calidad de la energía, sistema fotovoltaico.

Abstract— Inverters may be regarded as a developing technology, wherein significant advancements have been made over the course of nearly five decades, giving rise to research lines focused on topologies, control methods, optimization, and modeling, among other topics. Therefore, this article endeavors to compile recent contributions centered on inverters with multifunctional characteristics for photovoltaic systems, with the aim of providing readers with a comprehensive and thorough review. This review seeks to inspire technological development to meet the challenges of inverter integration and the enhancement of the electrical system in terms of power quality.

Keywords: inverter, multifunctional, power quality, photovoltaic system.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: edison.caicedo@unipamplona.edu.co (Edison Andres Caicedo Peñaranda).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: E. A. Caicedo-Peñaranda, A. Pardo-García, M. A. Mantilla-Villalobos y L. D. Pabón-Fernández, “Avances recientes en inversores multifuncionales en sistemas fotovoltaicos”, *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 2, pp. 243-248 2024, doi: [10.15649/2346030X.4159](https://doi.org/10.15649/2346030X.4159)

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas solares fotovoltaicos son un actor importante en las fuentes de energía renovable, por la tendencia creciente de su implementación, han participado significativamente en los sistemas eléctricos del mundo [1]. En estos sistemas, los inversores han desempeñado un papel esencial al permitir el funcionamiento de forma aislada, conectada a la red, de forma híbrida e integrados en microrredes, cambiando en términos de la topología, el control y las capacidades de incidir en variables adicionales, creando la familia de los denominados inversores multifuncionales. Estos inversores pueden incidir en las variaciones de voltaje, frecuencia, potencia reactiva, velocidad de respuesta y calidad de la energía, aspectos que empiezan a tomar protagonismo en términos de la integración de las fuentes de generación no convencional en los sistemas eléctricos convencionales y con características de generación distribuida [1].

Es importante resaltar el interés internacional por regular el campo de los inversores, al determinar su papel fundamental en la integración de los sistemas fotovoltaicos en las redes eléctricas, dichas regulaciones se centran la calidad de la energía y control de variables adicionales que limiten el impacto de estos en los sistemas eléctricos, lo cual motiva propuestas de investigación que se encuentran en la transición de ser llevadas a aplicaciones industriales en una amplia gama de inversores, pero corriendo el riesgo de terminar con regulaciones tan específicas que limiten el desarrollo tecnológico en países o creando monopolios [1].

El reto planteado por las regulaciones asociadas a la calidad de la energía y fenómenos tales como; armónicos, sistemas desbalanceados, balances de potencia, entre otros, se pueden abordar por la teoría p-q, que define un conjunto de potencias instantáneas en el dominio del tiempo, sin restricciones sobre los comportamientos de voltaje o corriente, aplicable a sistemas trifásicos con o sin conductores neutros, válida para los estados estacionarios y transitorios y fundamentada en la utilización de la transformación $\alpha\beta$, también conocida como la transformación de Clarke, que permitió el rápido avance de los filtros activos [2].

Debido a la importancia de los sistemas fotovoltaicos en la transición energética del mundo actual, y a la relevancia de los inversores para dichas fuentes, junto con las regulaciones que se establecen y que cada día son más específicas, este artículo muestra una revisión de los Avances recientes en inversores multifuncionales en sistemas fotovoltaicos, con el fin de ser una herramienta de revisión y de conocimiento en el área.

II. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

El procedimiento del artículo se ha centrado en la búsqueda de trabajos de alto impacto en la base de datos Scopus, fundamentado en la clasificación de las revistas, debido a que por lo reciente de las publicaciones es limitada la posibilidad de evaluar las citas y relaciones del trabajo. Esto se realizó con múltiples palabras claves, partiendo de los términos más generales como inversor, hasta llegar al análisis del tópico multifuncional específico. Posterior a la identificación se procedió a la lectura y agrupamiento de los artículos bajo diferentes criterios que llevaron a la organización presentada.

III. RESULTADOS ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En el campo de la ampliación de los sistemas fotovoltaicos estos pueden estar ubicados como granjas solares de uso exclusivo de generación de potencia activa, generalmente conectadas a la red eléctrica en los sistemas de distribución primario, o en sistemas de transmisión, con potencias nominales que oscilan desde kilovatios (KW) hasta los gigavatios (GW). En sistemas de menor escala se encuentran en aplicaciones industriales y comerciales generalmente trifásicos, caracterizados por la utilización de máquinas rotativas que en muchos casos son operadas con variadores de frecuencia y que se acompañan de un sistema de compensación de reactivos o filtrado, en estos los sistemas fotovoltaicos convencionales suministran solo potencia activa, por lo que las empresas encargadas del suministro eléctrico proporcionan la potencia reactiva faltante total y la potencia activa oscilante [2], esto se convierte en un problema identificado que cuenta con propuestas específicas debido a que se puede agregar la función de compensar la potencia oscilante suministrada por el inversor, dejando a la red eléctrica solo con la función de recibir o suministrar potencia activa constante, aspecto que representa un costo elevado en la actualidad [3], dicha propuesta ha avanzado llegando a prescindir del sistema de generación y empleando el inversor multifuncional en el control de las máquinas eléctricas rotativas [4], [5].

Otra aplicación, son los sistemas fotovoltaicos para uso residencial los cuales se clasifican en dos: los aislados a la red eléctrica (Off Grid), aplicados generalmente en viviendas donde electrificar con los sistemas de distribución convencionales es económica o físicamente inviable, implicando costos elevados en la conexión a la red, dichos sistemas tienden a ser los de mayores problemas en términos de calidad de la energía y continuidad del servicio; debido a que la población objetivo termina por adquirir equipos con escasa regulación y verificación al funcionar al margen del sistema eléctrico regulado con la limitación de acceso de profesionales. La segunda opción es viable consistiendo en establecer una conexión con la red eléctrica (On Grid), generalmente monofásicos con picos de consumo en la jornada nocturna, sin ningún tipo de compensación de potencia reactiva y limitados generalmente al 30 o 50 % de la demanda del transformador instalado [6], lo que representa para la empresa comercializadora de energía un reto en términos de: coordinar la energía generada, suministrar la potencia reactivas y oscilantes de baja magnitud, junto con la variabilidad del sistemas.

La conexión a la red eléctrica trae como desventaja la dependencia de la generación fotovoltaica a la disponibilidad de la red, provocando interrupciones cuando la red eléctrica no se encuentre disponible, una alternativa para solucionar dicho problema consiste en agregar baterías a la acción multifuncional, garantizando el suministro de potencia ante la indisponibilidad de la red, efecto que también permitiría el funcionamiento ante variaciones de tensión [7], dejando como principal desventaja la integración de baterías al sistema, problema que se puede solucionar al utilizar artefactos que cuenten con baterías como vehículos eléctricos; integrándolos como fuente de energía para la carga y dando sostenibilidad [8], [9], permitiendo inclusive la adaptación de un modelo de gestión del flujo de energía [10].

En el caso de problemas más específicos, normalmente se proponen topologías de inversores alternativos; ejemplos de ello son las topologías H9 y H10 que buscan limitar las corrientes existentes en la interconexión de las tierras de redes residenciales e industriales [11], reducción o eliminación de componentes problemáticos en actualizaciones de las topologías como en condensadores [12] [13], en

transformadores [14] [15], o la creación de un bus robusto en la etapa de corriente directa [16] o el filtrado [17], destacando que las investigaciones relacionados con topologías son numerosas, dando poder a la hipótesis de que los inversores son una tecnología que se encuentra en desarrollo e inclusive muchos de los trabajos citados en sus mejoras, han modificado aspectos funcionales de los inversores o agregado etapas de adicionales en el bus de corriente directa, donde las topologías generalmente empleadas se caracterizan por tener una etapa de corriente directa antes del inversor.

En términos de la eficiencia es destacable que los inversores cuentan con muy buenos valores en el orden del 93 y 97%, pero se está trabajando en la integración de tecnologías emergentes en los interruptores, como los transistores de nitruro de galio (GaN), que aumenten la eficiencia de la aplicación [18], los enfoques están centrados en la reducción del número de interruptores [19], adaptación de topologías poco exploradas en aplicaciones de conexión a red eléctrica [20], y/o reducción de las conmutaciones; efecto que puede ser contraproducente en la etapa de corriente directa, por lo que se deben evaluar los métodos de control.

En cuanto a los métodos de control, es común de las investigaciones buscar la reducción de corrientes armónicas, eliminar la componente de corriente directa, mantener los buses en voltajes constantes en las estrategias clásicas como las modulaciones de ancho de pulso PWM [4], aplicaciones tradicionales de reducción de armónicos pero con novedades en la comparación: como lo es la creación de portadoras en niveles parabólicos en rangos de sobre y bajo modulación [21], se han abierto debates como la asociación de las conmutaciones a inestabilidades al operar en frecuencias superiores a la frecuencia de Nyquist, proponiendo la creación de modelos multifrecuencia, que no agreguen imprecisiones en el funcionamiento de frecuencia nominal [22]. En este campo, otra propuesta es la creación de las modulaciones discontinuas DPWM, que mejoran la eficiencia de conmutación, pero reducen la vida útil de los condensadores; aspecto que requiere de optimización [23], y también técnicas para reducir las pérdidas [24].

Las conmutaciones de alta frecuencia son consideradas fundamentales en la obtención de un bus de corriente directa, que al concentrarse en las actividades multifunción, como el suministro de potencia reactiva, puede generar oscilaciones [25], pero pueden traer consigo efectos de compatibilidad electromagnética [26], por lo cual es necesario evaluar alternativas, como la supresión del convertidor de corriente directa a corriente directa [27], o considerar esquemas de control robusto en inversores de fuente de voltaje con técnicas avanzadas de modos deslizantes como Lyapunov [28] técnica que puede incidir positivamente en la estabilidad [29].

En el campo de la funcionalidad del suministro de potencia reactiva, existe un límite delgado en sobre compensar o reducir sustancialmente la eficiencia del inversor, limitando la integración de topologías [30], por lo que se ha propuesto la utilización de un método de control inteligente, diseñado a medida, considerando los escenarios de operación de la red, suponiendo inclusive mejoras en los perfiles de tensión [31], el establecimiento de los escenarios de operación del inversor permite agregar funcionalidades adicionales, mejorando las condiciones de los sistemas eléctricos [32]. Estos escenarios que deben ser analizados en la experimentación, para determinar su viabilidad, lo cual es un común denominador de las aplicaciones de electrónica de potencia [33].

; En gran parte de los trabajos consultados, el enfoque residencial se ha centrado en sistemas monofásicos, pero se debe evaluar que estos se encuentran conectados a sistemas trifásicos, propensos a sufrir de desbalance o a modificar su comportamiento de falla producto del sistema de generación [34], [35]. Este efecto se espera que aumente con la integración de las microrredes de generación, por lo que se han propuesto métodos de compensación, en términos de la potencia reactiva, activa, desbalances de potencias y puntos de referencia [36]. Siendo también los inversores trifásicos incluidos con el suministro de potencia reactiva y respuesta ante variaciones dinámicas [37], e inclusive se pueden percibir como el sistema que pueda regular los desequilibrios de corriente, de potencia activa, reactiva y armónicos [38], donde los algoritmos adaptativos o estrategias de control adaptativo pueden proporcionar un panorama en el corto plazo [39].

En los inversores trifásicos existen también propuesta de multifunción como lo son el diagnóstico y detección de fallas [40], modos de operación ante condiciones de falla que pueden afectar la integridad del equipo [40], lo cual es una funcionalidad integrable en sistemas monofásicos, que permitiría que el inversor funcione con variaciones de conmutación que le permitan cambiar su conexión física o continuar operando ante condiciones de fallos, comunes en un sistema tolerante a fallos que mantenga las condiciones de operación o reduciendo la indisponibilidad del equipo [41].

Otro aspecto de avance es la intervención de las modulaciones con el punto de máxima potencia, llegando a propuestas que cuentan con una relación directa en los denominados puntos globales del punto de máxima potencia GPPT, aspecto que reduce la utilización de sensores y tiene eficacias en el orden del 99% [42].

Los inversores de fuente de voltaje son escasos en sistemas conectados a la red, pero son también objeto de estudio y cuentan con la funcionalidad de inyección de potencia reactiva [43], dichos inversores deben contar con filtros LCL sintonizados para garantizar el funcionamiento estable del convertidor y permitir las funciones adicionales del inversor [44]. En estos se trabajan en la reducción en el tamaño de los filtros LC dimensionados a medida con la aplicación de Fourier [45] y las salidas multinivel son una alternativa para la reducción de estos [46].

Al final la aplicación de inversores multifuncionales en sistemas de generación fotovoltaica, abre la discusión de los servicios que deben prestar en las redes de generación distribuidas [47], donde inclusive una percepción de la integración de múltiples fuentes de generación con variabilidades como la fotovoltaica consideran la creación de buses sólidos de corriente directa, para al final emplear un inversor como estrategia para mitigar los armónicos de las cargas no lineales [48], acompañado de un control altamente confiable y flexible [49].

Por último, la discusión de los inversores centralizados y los micro inversores sigue activa, donde en el caso de los microinversores los aspectos de debate son generalmente la inclusión de transformadores y filtros, escenarios de funcionamiento de sobremodulación [46], discusiones relacionadas al tamaño de los componentes, generalmente asociadas a diseños particulares, superando los problemas de calentamiento, con los que inicialmente partieron. En cuanto a los inversores centralizados, han tomado gran fuerza al poder contar con controles robustos y generalmente estar posibilitados de tomar las acciones multifunción descritas. Permitiendo incluso que el inversor conectado a la red permanezca en funcionamiento ante condiciones como: caídas transitorias, parpadeos de la irradiación solar, asociados a un seguidor del

punto de máxima potencia robusto [50], efecto que también afecta la distorsión de la energía suministrada a la red y que debe ser compensada [51].

De la presente revisión se han listado las investigaciones relacionadas con inversores multifuncionales con la capacidad de:

- Compensación instantánea de la potencia oscilante [3].
- Inyección de corrientes armónicas [6].
- Suministro de energía ininterrumpida [8].
- Funcionalidad en reducciones de voltaje [8].
- Influencia en la tensión [31].
- Suministro de potencia reactiva [31].
- Operación ante fallas [34].
- Diagnóstico y detección de fallas [40].
- Respuesta ante fallas [40].
- Tolerancia a fallos [41].
- Funcionamiento ante bajo voltaje [50].
- Reducción de armónicos de corriente en condiciones de baja irradiancia [51].

IV. CONCLUSIONES

En conclusión, los inversores multifuncionales son una realidad de desarrollo científico, que progresivamente serán incluidos en los sistemas eléctricos, convirtiéndose en el eslabón que une las fuentes de energía renovables alternativas con los sistemas eléctricos convencionales, que serán modernizados progresivamente con la generación distribuida y adaptados para la penetración de la electrónica de potencia, con los retos de mantener y mejorar las condiciones de calidad de la energía, eficiencia energética y perfiles de voltaje. Esta transformación se esperaría en el mediano plazo sin renovación de la infraestructura de los sistemas eléctricos.

El presente artículo se convierte en un referente teórico significativo respecto a las posibilidades de los inversores multifuncionales, clasificándolas y describiendo la coexistencia de éstas, abriendo también la discusión de los aspectos a mejorar, en donde no existe predominantemente, siendo el común denominador la mejora de la distorsión armónica; reto que se esperaría superar en el corto plazo.

V. REFERENCIAS

- [1] M. Morey, N. Gupta, M. M. Garg, and A. Kumar, "A comprehensive review of grid-connected solar photovoltaic system: Architecture, control, and ancillary services," *Renewable Energy Focus*, vol. 45, pp. 307–330, Jun. 2023, doi: [10.1016/j.ref.2023.04.009](https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.04.009).
- [2] H. Akagi, E. Hirokazu Watanabe, and M. Aredes, *INSTANTANEOUS POWER THEORY AND APPLICATIONS TO POWER CONDITIONING*, IEEE Press Editorial., vol. 1. 2007.
- [3] A. M. Dos Santos Alonso, L. De Oro Arenas, J. P. Bonaldo, J. D. A. Olímpio Filho, F. P. Marafão, and H. K. M. Paredes, "Power Quality Improvement in Commercial and Industrial Sites: An Integrated Approach Mitigating Power Oscillations," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 50872–50884, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3385991](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3385991).
- [4] X. Zhang, J. Y. Gauthier, X. Lin-Shi, R. Delpoux, and J. F. Tregouet, "Modeling, Control, and Experimental Evaluation of Multifunctional Converter System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, pp. 7747–7756, Sep. 2021, doi: [10.1109/TIE.2020.3013779](https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3013779).
- [5] X. Zhang, J. Y. Gauthier, and X. Lin-Shi, "Cost-Efficient Fault-Tolerant Scheme for Three-Phase Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines Fed by Multifunctional Converter System under Open-Phase Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 6, pp. 5502–5513, Jun. 2022, doi: [10.1109/TIE.2021.3094478](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3094478).
- [6] Z. Xiang et al., "A Residential Miniboost Photovoltaic Inverter with Maximum Power Point Operation and Power Quality Compensation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, doi: [10.1109/TIE.2022.3187573](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3187573).
- [7] S. Kumar, L. N. Patel, B. Singh, and A. L. Vyas, "Self-Adjustable Step-Based Control Algorithm for Grid-Interactive Multifunctional Single-Phase PV-Battery System under Abnormal Grid Conditions," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 2978–2987, May 2020, doi: [10.1109/TIA.2020.2981437](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2981437).
- [8] N. Saxena, I. Hussain, B. Singh, and A. L. Vyas, "Implementation of a Grid-Integrated PV-Battery System for Residential and Electrical Vehicle Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6592–6601, Aug. 2018, doi: [10.1109/TIE.2017.2739712](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2739712).
- [9] A. Verma and B. Singh, "CAPSA Based Control for Power Quality Correction in PV Array Integrated EVCS Operating in Standalone and Grid Connected Modes," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 57, no. 2, pp. 1789–1800, Mar. 2021, doi: [10.1109/TIA.2020.3041812](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3041812).
- [10] M. A. Khan, A. Haque, and V. S. B. Kurukuru, "Power Flow Management With Q-Learning for a Grid Integrated Photovoltaic and Energy Storage System," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 10, no. 5, pp. 5762–5772, Oct. 2022, doi: [10.1109/JESTPE.2022.3165173](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3165173).
- [11] S. Jahan, M. F. Kibria, S. P. Biswas, M. R. Islam, M. A. Rahman, and K. M. Muttaqi, "H9 and H10 Transformer-Less Solar Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression and Harmonic Current Reduction," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 2, pp. 2446–2457, Mar. 2023, doi: [10.1109/TIA.2022.3218272](https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3218272).
- [12] S. Kan, X. Ruan, and X. Li, "Topology and Control for Second Harmonic Current Reduction in Two-Stage Single-Phase Inverter Without Electrolytic Capacitors," *IEEE Trans Power Electron*, 2024, doi: [10.1109/TPEL.2024.3384539](https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3384539).
- [13] S. Kan, X. Ruan, and X. Huang, "Compensation of Second Harmonic Current Based on Bus Voltage Ripple Limitation in Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 7, pp. 7525–7532, Jul. 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3201349](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3201349).
- [14] A. Srivastava and J. Seshadrinath, "A Single-Phase Seven-Level Triple Boost Inverter for Grid-Connected Transformerless PV Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 9, pp. 9004–9015, Sep. 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3215815](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3215815).

- [15] A. R. Paul, A. Bhattacharya, and K. Chatterjee, "A Novel Single Phase Grid Connected Transformer-Less Solar Micro-Inverter Topology With Power Decoupling Capability," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 1, pp. 949–958, Jan. 2023, doi: [10.1109/TIA.2022.3207445](https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3207445).
- [16] V. T. Tran, K. M. Nguyen, D. T. Do, and Y. O. Choi, "A New Topology of Single-Phase Common Ground Buck-Boost Inverter With Component Voltage Rating Reduction," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 58333–58348, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3284459](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3284459).
- [17] A. Bhattacharya, A. R. Paul, and K. Chatterjee, "A Coupled Inductor Based Ćuk Microinverter for Single Phase Grid Connected PV Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2023, pp. 981–993. doi: [10.1109/TIA.2022.3208214](https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3208214).
- [18] A. Al Hadi, X. Fu, E. Hossain, and R. Chaloo, "Hardware Evaluation for GaN-Based Single-Phase Five-Level Inverter," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 64248–64259, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3288482](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288482).
- [19] M. A. Hosseinzadeh, M. Sarebanzadeh, R. Kennel, E. Babaei, and M. Rivera, "New Generalized Circuits for Single-Phase Multisource Multilevel Power Inverter Topologies," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 38, no. 6, pp. 6823–6830, Jun. 2023, doi: [10.1109/TPEL.2023.3259342](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3259342).
- [20] J. Gutierrez-Escalona, C. Roncero-Clemente, O. Husev, F. Barrero-Gonzalez, A. M. Llor, and V. F. Pires, "Three-Level T-Type qZ Source Inverter as Grid-Following Unit for Distributed Energy Resources," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 10, no. 6, pp. 7772–7785, Dec. 2022, doi: [10.1109/JESTPE.2022.3193258](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2022.3193258).
- [21] S. K. Yadav, N. Mishra, and B. Singh, "An Improved Multicarrier PWM Technique for Harmonic Reduction in Cascaded H-Bridge Based Solar Photovoltaic System," *IEEE Trans Industr Inform*, 2024, doi: [10.1109/TII.2024.3381796](https://doi.org/10.1109/TII.2024.3381796).
- [22] Y. Jiang, Y. Sun, J. Lin, S. Xie, and M. Su, "Multifrequency Small-Signal Model for Single-Phase Grid-Tied Inverters Considering the Effect of PWM," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 39, no. 2, pp. 2128–2139, Feb. 2024, doi: [10.1109/TPEL.2023.3333390](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3333390).
- [23] T. Ryu and U. M. Choi, "Discontinuous PWM Strategy for Reliability and Efficiency Improvements of Single-Phase Five-Level T-Type Inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 3, pp. 2567–2577, Mar. 2024, doi: [10.1109/TIE.2023.3265046](https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3265046).
- [24] C. Karasala, R. R. Lekkala, H. Myneni, and S. K. Ganjikunta, "PV Grid-Connected Inverter With DC Voltage Regulation in CCM and VCM Operation to Reduce Switching Losses," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 11, pp. 11262–11275, Nov. 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3231323](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3231323).
- [25] G. M. Pelz, S. A. O. da Silva, J. A. C. Neves, and L. P. Sampaio, "Improvement of grid injected currents in single-phase inverters rejecting DC link voltage oscillations based on multi-resonant filtering," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 156, Feb. 2024, doi: [10.1016/j.ijepes.2023.109694](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109694).
- [26] S. Miric, P. S. Niklaus, J. Huber, C. Stager, M. Haider, and J. W. Kolar, "Analysis and Experimental Verification of the EMI Signature of Three-Phase Three-Level TCM Soft-Switching Converter Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 57391–57400, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3283921](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3283921).
- [27] A. Srivastava and J. Seshadrinath, "A Novel Single Phase Three Level Triple Boost CG Switched-Capacitor Based Grid-Connected Transformerless PV Inverter," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 2, pp. 2491–2501, Mar. 2023, doi: [10.1109/TIA.2022.3220721](https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3220721).
- [28] R. K. Jain, V. R. Barry, and H. K. V. Gadiraju, "An Effective Control Strategy for Single-Phase Single-Stage PV Grid-Tied Inverter under Abnormal Grid Conditions," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 12, no. 2, pp. 1249–1260, Apr. 2024, doi: [10.1109/JESTPE.2023.3321374](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3321374).
- [29] F. El Aamri et al., "Stability Analysis for DC-Link Voltage Controller Design in Single-Stage Single-Phase Grid-Connected PV Inverters," *IEEE J Photovolt*, vol. 13, no. 4, pp. 580–589, Jul. 2023, doi: [10.1109/JPHOTOV.2023.3263253](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3263253).
- [30] Y. Miguchi, H. Obara, and A. Kawamura, "Control Scheme for the Lagging Power Factor Operation of a Single-Phase Grid-Connected Inverter Using an Unfolding Circuit," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 5, pp. 145–161, 2024, doi: [10.1109/OJPEL.2024.3351147](https://doi.org/10.1109/OJPEL.2024.3351147).
- [31] J. Hrouda, M. Cernan, and K. Prochazka, "A New Method of Smart Control of Single-Phase Photovoltaic Inverters at Low Voltage for Voltage Control and Reactive Power Management," *IEEE Access*, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3410374](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3410374).
- [32] H. K. M. Paredes, D. T. Rodrigues, J. C. Cebrian, and J. P. Bonaldo, "CPT-Based Multi-Objective Strategy for Power Quality Enhancement in Three-Phase Three-Wire Systems under Distorted and Unbalanced Voltage Conditions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53078–53095, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3069832](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069832).
- [33] N. Gupta, M. Morey, M. M. Garg, and A. Kumar, "An experimental investigation of variable-step-size Affine Projection Sign based algorithm for power quality enhanced grid-interactive solar PV system," *Electric Power Systems Research*, vol. 228, Mar. 2024, doi: [10.1016/j.epr.2023.110036](https://doi.org/10.1016/j.epr.2023.110036).
- [34] Y. Liao et al., "Small-Signal Stability Analysis of Three-Phase Four-Wire System Integrated With Single-Phase PV Inverters Considering Phase to Phase Coupling," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 39, no. 1, pp. 82–96, Mar. 2024, doi: [10.1109/TEC.2023.3299701](https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3299701).
- [35] Y. Liao, H. Nian, Y. Wang, and D. Sun, "Small-Signal Stability Analysis of Three-Phase Four-Wire System Integrated with Single-Phase PV Inverters Considering Phase to Phase Coupling Effect under Asymmetric Grid," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 63852–63862, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3288282](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288282).
- [36] M. E. Akdogan and S. Ahmed, "Novel Compensation Methods Using Energy Storage System (ESS) in Islanded Unbalanced Single-/Three-Phase Multimicrogrids," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 5457–5468. doi: [10.1109/TIA.2022.3175763](https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3175763).
- [37] J. Zhu, H. Wu, L. Li, J. Wang, M. Hua, and Y. Xing, "Modified T-Type Three-Level AC-DC Converter Based Multifunctional Compensator for Three-Phase AC Power System With Low-Frequency Pulsed Load," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 11844–11855, Dec. 2022, doi: [10.1109/TIE.2021.3130322](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3130322).
- [38] J. P. Bonaldo, V. A. De Souza, A. M. D. S. Alonso, L. D. O. Arenas, F. P. Marafao, and H. K. M. Paredes, "Adaptive Power Factor Regulation under Asymmetrical and Non-Sinusoidal Grid Condition with Distributed Energy Resource," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 140487–140503, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3119335](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119335).
- [39] W. Guo and W. Xu, "Research on optimization strategy of harmonic suppression and reactive power compensation of photovoltaic multifunctional grid connected inverter," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 145, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.ijepes.2022.108649](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108649).
- [40] S. Xu et al., "Multiple Open-Switch Fault Diagnosis for Three-Phase Four-Leg Inverter Under Unbalanced Loads via Interval Sliding Mode Observer," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 39, no. 6, pp. 7607–7619, Jun. 2024, doi: [10.1109/TPEL.2024.3372650](https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3372650).

- [41] K. Zhang, L. Wang, Y. Pang, S. Liao, X. Yang, and M. C. Wong, "Power Selective Control With Fault Tolerance of Multifunctional Inverter for Active Power Injection and Power Quality Compensation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 5, pp. 4309–4319, May 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3186357](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3186357).
- [42] P. A. R. Freitas et al., "New Global Maximum Power Point Tracking Technique Based on Indirect PV Array Voltage Control for Photovoltaic String Inverters With Reduced Number of Sensors," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 43495–43505, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3380475](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380475).
- [43] C. Karasala and S. K. Ganjikutta, "An Adaptive DC-Link Voltage Control of a Multifunctional SPV Grid-Connected VSI for Switching Loss Reduction," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12946–12956, Dec. 2022, doi: [10.1109/TIE.2021.3128897](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3128897).
- [44] J. P. Bonaldo, José. Filho, A. Alonso, F. Marafão, and H. Morales Paredes, "Modeling and Control of a Single-Phase Grid- Connected Inverter with LCL Filter," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 19, no. 2, pp. 250–259, Feb. 2021.
- [45] D. Kang et al., "LC Filter Parameters Design Method Based on Harmonic Contents Analysis for Dual-Mode Single-Phase Inverter," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 39, no. 4, pp. 4438–4449, Apr. 2024, doi: [10.1109/TPEL.2023.3347474](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3347474).
- [46] M. Wang, X. Zhang, M. Wu, Z. Guo, P. Wang, and F. Li, "A Control Strategy for Achieving the Whole Operation Range Power Matching of Single-Phase Cascaded H-Bridge PV Inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 6, pp. 5896–5906, Jun. 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3192696](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3192696).
- [47] T. McKerahan, "Optimized Exploitation of Ancillary Services: Compensation of Reactive, Unbalance and Harmonic Currents Based on Particle Swarm Optimization," *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 19, no. 2, pp. 314–325, Feb. 2021.
- [48] I. Khan, A. S. Vijay, and S. Doolla, "Nonlinear Load Harmonic Mitigation Strategies in Microgrids: State of the Art," *IEEE Syst J*, 2021, doi: [10.1109/JSYST.2021.3130612](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3130612).
- [49] K. Zeb et al., "High-performance and Multi-functional Control of Transformerless Single-phase Smart Inverter for Grid-connected PV System," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 6, pp. 1386–1394, Nov. 2021, doi: [10.35833/MPCE.2019.000331](https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000331).
- [50] M. Talha, S. R. S. Raihan, N. A. Rahim, M. N. Akhtar, O. M. Butt, and M. M. Hussain, "Multi-Functional PV Inverter With Low Voltage Ride-Through and Constant Power Output," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 29567–29588, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3158983](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3158983).
- [51] V. M. Rodrigues De Jesus, A. F. Cupertino, L. S. Xavier, H. A. Pereira, and V. F. Mendes, "Operation Limits of Grid-Tied Photovoltaic Inverters with Harmonic Current Compensation Based on Capability Curves," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 3, pp. 2088–2098, Sep. 2021, doi: [10.1109/TEC.2021.3050312](https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3050312).
- [52] T. Zhao, Z. Sun, Z. Feng, M. Wang, M. Wu, and X. Zhang, "An Optimized Active Power Backflow Suppression Strategy for Cascaded H-Bridge PV Grid-Connected Inverter During Inter-Phase Short-Circuit Fault," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 38, no. 7, pp. 9127–9142, Jul. 2023, doi: [10.1109/TPEL.2023.3266613](https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3266613).