

Control strategies of photovoltaic systems

Roberto Fuentes, Diego Rojas, Marco Rivera, José Riveros, Javier Muñoz, and Patrick Wheeler

Abstract—The control in an inverter system for photovoltaic applications is important as it can impact on the efficiency of the system. In this paper a review of the main control strategies used in photovoltaic systems is presented. The study is divided into two branches: grid connected systems and off-grid systems. The paper includes a review of strategies common to both types of systems, including a comparison of both linear and non-linear control strategies. In addition, the implementation of an MPPT algorithm which gives an increase in the efficiency of the generation systems is described. Although there is a large variety of control strategies, there are some that offer better results, from both point of view the computational consumption and the system efficiency, these differences are identified in the presented results.

Keywords—Control strategy, MPC, MPPT, Off-grid systems, On-grid systems, Photovoltaic, Stand-alone.

I. INTRODUCCIÓN

LOS sistemas fotovoltaicos están tomando mucha atención. La importancia para la generación eléctrica, debido a las políticas energéticas y a la demanda que cada vez está aumentando. Además, debido a la disminución de costos asociados a los módulos fotovoltaicos junto al aumento de eficiencia y densidad de potencia de los semiconductores, es que esta tecnología ha tomado mucho interés [1].

A nivel mundial, los números son muy altos ya que la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos para la generación eléctrica es de 623 GW aproximadamente, lo cual mantiene a la energía solar dentro de las energías renovables no convencionales con mayor capacidad instalada a nivel mundial [2].

Para un adecuado funcionamiento, los sistemas fotovoltaicos requieren de convertidores de potencia para adecuar las variables eléctricas a los requerimientos del sistema [3]. Gracias a los convertidores de potencia, los sistemas fotovoltaicos pueden ser instalados tanto en modo isla o conectado a la red eléctrica. También permiten la integración de los módulos fotovoltaicos en distintas configuraciones, tales como central, multistring, string y por módulos (microinversor) [1], [2], [4].

Sin embargo, para aumentar la confiabilidad, la estabilidad y la robustez del sistema fotovoltaico, estos convertidores de potencia van en conjunto con una estrategia o técnica de control [5]–[8]. Las técnicas de control permiten que el sistema fotovoltaico no solo realice la conversión energética de los módulos fotovoltaicos, sino que permite aumentar las

funcionalidades, con enfoque a mejorar la confiabilidad y robustez del sistema. Los objetivos de control o funcionalidades que se pueden realizar gracias a las estrategias de control tanto para sistemas off-grid y on-grid son: controlabilidad del flujo de potencia [9], [10], control de potencia reactiva [11], regulación de la frecuencia [12]–[15], compensación de armónicos [16]–[19], capacidad fault-ride-through [20]–[23], eficiencia [24]–[26] y regulación del voltaje y corriente de salida [6], [27], [28], entre otros. Una revisión de técnicas de control en sistemas fotovoltaicos es presentada en [29], la cual se ha basado en dos objetivos principales en donde el primero obtener la máxima potencia disponible y el segundo está relacionado con la conversión de energía y su uso.

El siguiente artículo presenta una revisión de distintas técnicas de control aplicadas a los sistemas fotovoltaicos. La sección II presenta estrategias de control aplicados a sistemas on-grid y la sección III presenta técnicas de control aplicados a sistemas off-grid (stand-alone).

II. ESTRATEGIAS DE CONTROL DE SISTEMAS ON-GRID

La generación fotovoltaica cumple principalmente la función de producir la energía eléctrica que se consume en una cierta región [30], no obstante, para generación domiciliar o distribuida, existen aspectos a considerar. Si bien, la función principal es la misma, existen momentos del día en que la producción energética supera a la demanda, o por el contrario, es insuficiente.

Es por ello que al momento de diseñar una planta fotovoltaica es necesario considerar si lo que se desea es almacenar el excedente energético para utilizarlo en momentos en que la producción no es suficiente, o, de ser posible, conectarse a la red eléctrica para ofrecer el excedente a la compañía distribuidora y que sea aprovechada en ese mismo momento. Según lo anterior, existen dos metodologías de diseño, una planta on-grid o una off-grid, con sus respectivas características técnicas y económicas [31].

En caso de optar por un sistema on-grid, es necesario utilizar un convertidor acorde para ello, considerando que el esquema más común es el control de la corriente de salida [32]. Por lo general, un sistema on-grid se presenta tal como se muestra en la Fig. 1. Este sistema presenta un string conectado a un convertidor dc-ac, el cual se conecta a la red y a la carga. Si se deseara implementar un sistema de baterías, el sistema se presenta de manera diferente, presentando primeramente un convertidor dc-dc para alimentar las baterías, no obstante, al ser lo inusual, no se considerará en este trabajo para sistemas on-grid.

Las estrategias de control más recurrentes pueden ser divididas en estrategias de control lineales y no lineales [33], tal como se aprecia en la Fig. 2.

R. Fuentes, D. Rojas. Estudiantes del Doctorado en Sistemas de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: rioberf@gmail.com, diego.rojass@utalca.cl).

M. Rivera, J. Muñoz. Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: marcoriv@utalca.cl, jamunoz@utalca.cl).

J. Riveros. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay (e-mail: joservs@gmail.com).

P. Wheeler. Power Electronics, Machines and Control Group, The University of Nottingham, Nottingham, UK (e-mail: Pat.Wheeler@nottingham.ac.uk).

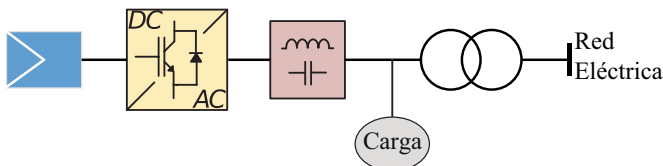


Figura 1: Esquema general de un sistema on-grid.

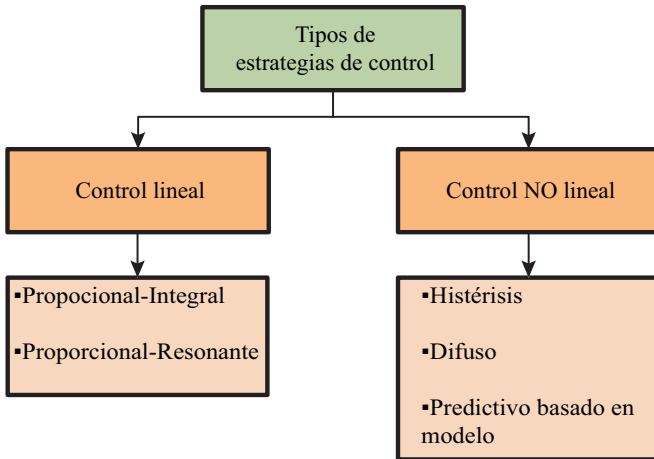


Figura 2: Tipos de estrategias comúnmente usadas en sistemas on-grid.

II-A. Estrategias de control lineales

Dentro de las estrategias de control lineales se presentan: el control Proporcional-Integral (PI) en coordenadas dq [34] y el control Proporcional-Resonante (PR) [35]. El control PI ofrece una gran robustez a la vez que no requiere de una gran capacidad de cómputo, haciéndolo un control extendido dentro de los convertidores. No obstante, requiere de exactitud del modelo al momento de sintonizar para obtener resultados óptimos, además de realizar una transformación de coordenadas a dq implicando la necesidad de algoritmos PLL para la sincronización ya que este control sólo ofrece cero error en estado estacionario para una referencia dc [36]–[39]. El diagrama de bloques que representa este control aplicado se muestra en la Fig. 3. El segundo control lineal utilizado dentro de sistemas on-grid es el control PR. Este control está diseñado precisamente para trabajar bajo referencias sinusoidales, ya que, a diferencia del control anterior, ofrece cero error en estado estacionario para referencia alterna. Esta característica hace que no sea necesario aplicar transformación dq , y por ende, sin requerir de la medición constante de la frecuencia de red, obteniendo, aún así, excelentes resultados [40]–[42]. El diagrama de bloques correspondiente se observa en la Fig. 4.

II-B. Estrategias de control no lineales

El control por histéresis y el control difuso son los controles más usados que no requieren de un modelo matemático [43]. También está el control predictivo, que si bien requiere de un modelo, éste puede ser obtenido por un modelo basado en datos tales como control fuzzy, redes neuronales o machine learning.

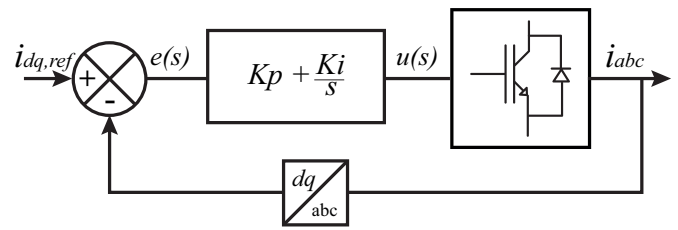


Figura 3: Diagrama de control PI para el convertidor AC/DC en un sistema on-grid..

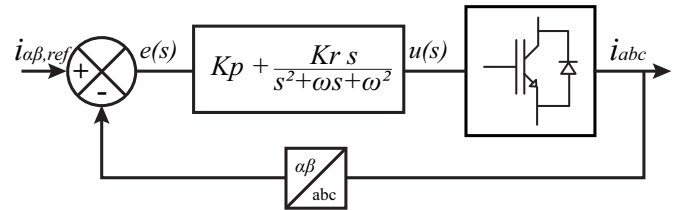


Figura 4: Diagrama de control PR para el convertidor AC/DC en un sistema on-grid..

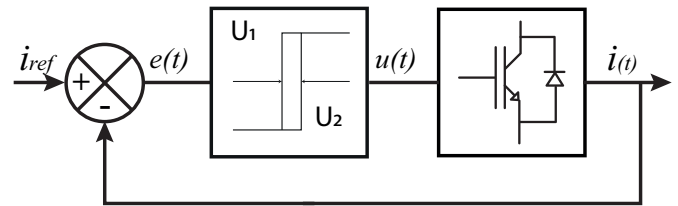


Figura 5: Diagrama de control por histéresis para el convertidor AC/DC en un sistema on-grid.

El control por histéresis es el control más básico que se puede implementar. Es un control por banda que presenta una respuesta oscilatoria cercana a la referencia. Esta técnica, si bien requiere de muy poca capacidad computacional, es una técnica que genera gran cantidad de armónicos y que no ofrece cero error en ningún momento [44]. Su representación en bloques viene dada por la Fig. 5, donde el bloque adquiere la señal de error como entrada y -dependiendo de la banda previamente descrita- modifica la señal de control.

El control difuso, al contrario que el control por histéresis, requiere de una mayor capacidad de cálculo [45], ya que se basa en el cálculo de reglas expertas que, a medida que se van asignando, van requiriendo mayor capacidad computacional. Esta estrategia ofrece un control más robusto sin necesidad de requerir un modelo, siempre y cuando el diseñador sepa qué reglas son óptimas para el sistema. Este control si ofrece cero error en estado estacionario [46]–[49]. Viene dado por el esquema de la Fig. 6, donde se recibe una señal de entrada (previamente definida), la cual se fuzzifica para ser relacionada con el resto de variables difusas en función de las reglas implementadas, para luego calcular un valor de acción de control para cada salida mediante la etapa de desfuzzificación. Otra técnica de control aplicable a un sistema on-grid, es el control predictivo basado en modelo (MPC). Este control, como se mencionó, si requiere de un modelo discreto.

La técnica usa el modelo discreto del sistema para optimizar

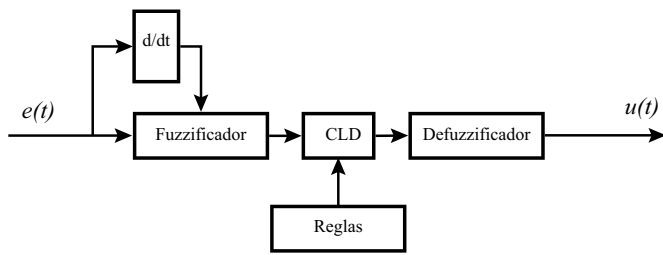


Figura 6: Diagrama de control difuso para el convertidor AC/DC en un sistema on-grid.

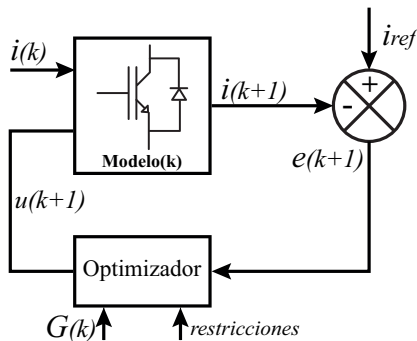


Figura 7: Diagrama de control predictivo basado en modelo para el convertidor AC/DC en un sistema on-grid.

una función de costo para hallar el estado que ofrece la mejor respuesta. Si bien requiere un costo computacional medio, hoy en día es totalmente cubierto por las alternativas de mercado, ofreciendo una de las opciones más usadas en el control de convertidores en estos últimos años [50]–[53]. Un diagrama que ejemplifica su funcionamiento se puede observar en la Fig. 7, donde al aplicar una entrada al modelo, éste entrega opciones de acción de control, las que pasan por un algoritmo de costo, hallando la que mejor se acomode al objetivo del controlador. Además, el último tiempo se ha potenciado el uso de un control moderno no lineal de modos deslizantes en aplicaciones PV, como se ve en los estudios [54], [55].

III. ESTRATEGIAS DE CONTROL DE SISTEMAS OFF-GRID

Los sistemas off-grid también son conocidos como sistemas fotovoltaicos stand-alone. La aplicación más común de un sistema fotovoltaico es en la instalación de módulos sobre techos residenciales o edificios, atendiendo las necesidades de iluminación dc y ac, alimentación eléctrica de distintos dispositivos y elementos del hogar tanto dc como ac (radio, televisor, refrigeración, entre otras) [56], satélites, sistemas de bombeo de agua, etc. Una de las aplicaciones importantes es permitir el acceso a electricidad a lugares lejanos de la generación eléctrica central [57].

Dentro de los sistemas off-grid ac, se pueden clasificar, de acuerdo a las etapas de conversión, sistemas de única etapa y doble etapa (similar al caso de sistemas on-grid ac [1], [58], tal como se representa en la Fig. 8. Además, dentro de los sistemas stand-alone, también se pueden dividir en sistemas con y sin almacenamiento de energía [59].

La ventaja de incorporar un sistema de almacenamiento es que mejora la calidad y confiabilidad, permitiendo además

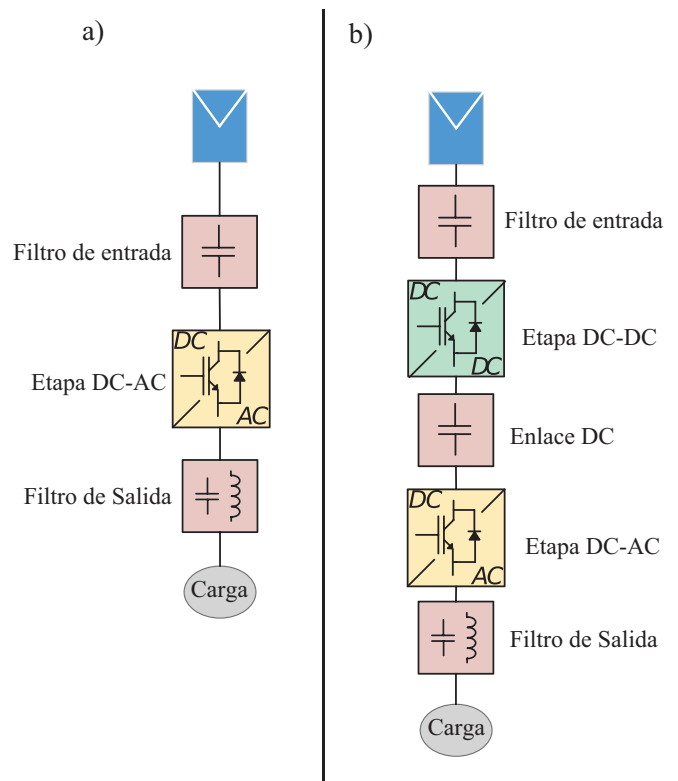


Figura 8: Esquema de los sistemas de conversión fotovoltaicos en sistemas ac off-grid. a) única etapa, b) doble etapa.

contar con energía de respaldo. Sin embargo, la desventaja es que aumenta la complejidad de diseño de la estrategia de control junto con una mayor cantidad de dispositivos dentro del sistema. Con el avance de la investigación de las baterías, los almacenamientos de energía son primordiales en la integración de sistemas fotovoltaicos stand-alone. Por eso, en esta sección presentarán estrategias de control aplicados tanto para sistemas dc como ac con almacenamiento energético.

En la Fig. 9 se presenta la clasificación de los sistemas stand-alone. Mirado desde la etapa dc-dc, la mayoría de las veces, las estrategias de control van en conjunto de algún algoritmo MPPT (algoritmo del seguimiento del máximo punto de potencia) que genera una referencia como señal. Una estrategias de control de voltaje y/o corriente es el proporcional-integral (PI) que se caracteriza por una rápida respuesta dinámica y diseño simple [60]–[64].

El control Fuzzy o difuso presentado en [65], [66] se caracteriza por una rápida respuesta ante cambios de referencias y el diseño no depende del modelo del sistema fotovoltaico sino que de distintas reglas, lo cual entre más de éstas contenga el control, más complejo se torna diseñar la técnica y mayor es la carga computacional.

Otra estrategia es la técnicas de control predictivo basado en el modelo (MPC) [67] que también presenta una rápida respuesta dinámica, es simple de implementar, con una alta confiabilidad y robustez ante perturbaciones del sistema, lo que lo hecho atractivo gracias a los avances tecnológicos en dispositivos procesadores de señales. Sin embargo, una desventaja es que la técnica de control depende de la exactitud

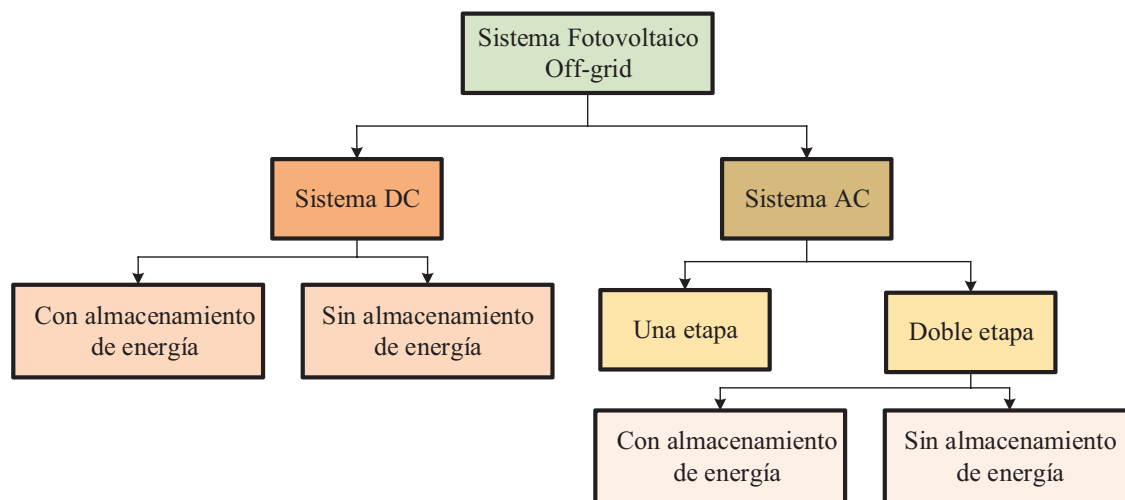


Figura 9: Clasificación de los sistemas off-grid o stand-alone.

del modelo discretizado del sistema fotovoltaico.

Otra técnica de control aplicado en estos sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía es la evolución dinámica [63]. Cabe mencionar que en estos sistemas fotovoltaicos stand-alone es clave la coordinación adecuada de los distintos convertidores junto a la regulación del flujo de potencia, por lo tanto, distintos autores proponen diversos algoritmos encargados de gestionar la potencia tales como: diagramas de estados [60], filtración [68], filtración con deadbeat [69], gestión dinámica [63] y control droop [70].

Las estrategias de control para la etapa dc-ac aplicados en los sistemas fotovoltaicos son: control PI en coordenadas dq [71], [72], control PR [60], control predictivo [73], [74] y control en modo deslizante [75]. Finalmente, cabe mencionar que el algoritmo MPPT es implementado en un convertidor dc-dc para un sistema fotovoltaico de dos etapas, en cambio para un sistema fotovoltaico de una etapa, el algoritmo MPPT se implementa en el convertidor dc-ac.

IV. CONCLUSIONES

Existen distintos tipos de controles que son usados para el control de sistemas fotovoltaicos, ya sea conectado a la red o en sistemas isla, lo que ofrece variadas alternativas.

Si bien, cada alternativa tiene sus ventajas y desventajas, existen ciertas características que hacen destacar unos métodos de control por sobre otros. Es el caso del control PR, el que nace precisamente de la necesidad de seguir una referencia alterna, por lo que es una buena alternativa en la etapa de conversión dc-ac, siempre y cuando el modelo sea lo suficientemente exacto, ya que el inconveniente de esta estrategia radica precisamente en eso, requerir un modelo linealizado. Al trabajar con un modelo linealizado en aplicaciones fotovoltaicas existe la falencia de que estos sistemas poseen incertidumbre en su operación. Es necesario acompañar con un algoritmo adaptativo o un método de linealización que no precise de un punto de operación.

Por otro lado, esto se subsana con un control predictivo, el cual es bastante eficiente para trabajar con multiobjetivos, ya que no requiere de un modelo lineal. En la reciente literatura se

encuentra esta estrategia como la predilecta para aplicaciones solares. Además, en la práctica, la implementación de un algoritmo MPPT mejora bastante la eficiencia general del inversor fotovoltaico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al financiamiento del Programa FONDECYT Regular a través del proyecto 1191028 y FONDAP SERC Chile 15110019.

REFERENCIAS

- [1] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging pv converter technology," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 47–61, 2015.
- [2] "Trends in photovoltaic applications," 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3myonWU>
- [3] *Power Conditioning*. John Wiley & Sons, Ltd, 2017, ch. 5, pp. 103–171. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119280408.ch5>
- [4] M. Jamil, M. Rizwan, and D. Kothari, *Grid Integration of Solar Photovoltaic Systems*, 11 2017.
- [5] Y. Zhu, H. Wen, G. Chu, X. Wang, Q. Peng, Y. Hu, and L. Jiang, "Power-rating balance control and reliability enhancement in mismatched photovoltaic differential power processing systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 879–895, Jan 2022.
- [6] L. Callegaro, C. A. Rojas, M. Ciobotaru, and J. E. Fletcher, "A controller improving photovoltaic voltage regulation in the single-stage single-phase inverter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 354–363, Jan 2022.
- [7] M. Saeedian, M. Poursmaeil, A. Sepehr, S. Taheri, and E. Poursmaeil, "Small-signal stability analysis of synthetic inertia-based photovoltaic generators," in *2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe)*, Sep. 2021, pp. 1–8.
- [8] P. Mariani, L. Vesce, and A. Di Carlo, "A novel class of dye-sensitized solar modules. glass-plastic structure for mechanically stable devices," in *2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI)*, Sep. 2018, pp. 1–5.
- [9] S. V and R. Kalpana, "Power flow management of a solar pv and battery powered telecom load with bidirectional grid power exchange," in *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Sep. 2021, pp. 1–6.
- [10] L. Cheng, H. Zang, Z. Wei, T. Ding, R. Xu, and G. Sun, "Short term solar photovoltaic power prediction learning directly from satellite images with regions of interest," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 1–1, 2021.

- [11] V. Jain, Seema, and B. Singh, "Three phase grid connected pv based ev charging station with capability of compensation of reactive power," in *2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Sep. 2021, pp. 1–6.
- [12] Y. Fuyuan, T. Xueqin, X. Tong, and W. Xinlei, "Adaptability assessment of hydrogen energy storage system based on proton exchange membrane fuel cell under the scenarios of peaking shaving and frequency regulation," in *2021 4th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE)*, Sep. 2021, pp. 84–90.
- [13] M. Qian, D. Zhao, L. Zhao, L. Zhu, F. Wu, N. Chen, W. Qin, and C. Xu, "Research on primary frequency regulation of grid integrated concentrating solar power plant," in *2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, April 2021, pp. 683–687.
- [14] V. Paduani, H. Yu, B. Xu, and N. Lu, "A unified power-setpoint tracking algorithm for utility-scale pv systems with power reserves and fast frequency response capabilities," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 1–1, 2021.
- [15] P. Zhang, G. Wang, and F. Li, "Comparative analysis of simulation and measurement of photovoltaic power station participating in primary frequency regulation," in *2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC)*, Aug 2021, pp. 430–436.
- [16] M. K. Mishra and V. N. Lal, "An enhanced control strategy to mitigate grid current harmonics and power ripples of grid-tied pv system without pll under distorted grid voltages," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, 2021.
- [17] —, "An advanced proportional multiresonant controller for enhanced harmonic compensation with power ripple mitigation of grid-integrated pv systems under distorted grid voltage conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 5, pp. 5318–5331, Sep. 2021.
- [18] A. Mishra, S. Chauhan, P. Karuppanan, and M. Suryavanshi, "Pv based shunt active harmonic filter for power quality improvement," in *2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, Feb 2021, pp. 905–910.
- [19] 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.
- [20] G. Custer, "Inverter protection and ride-through: Today's photovoltaic and energy storage inverters," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 43–49, June 2021.
- [21] M.-T. Kuo, "Establishment of low voltage ride-through curves and stability analysis with high photovoltaic penetration in power systems," in *2021 IEEE/IAS 57th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I CPS)*, April 2021, pp. 1–10.
- [22] M. A. Khan, A. Haque, and V. S. B. Kurukuru, "Dynamic voltage support for low-voltage ride-through operation in single-phase grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 12 102–12 111, Oct 2021.
- [23] P. Chao, W. Li, S. Peng, X. Liang, L. Zhang, and Y. Shuai, "Fault ride-through behaviors correction-based single-unit equivalent method for large photovoltaic power plants," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 715–726, Jan 2021.
- [24] G. Perrakis, A. C. Tasolamprou, G. Kenanakis, E. N. Economou, S. Tzortzakis, and M. Kafesaki, "Passive radiative cooling for the temperature and efficiency control of photovoltaics," in *2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 2021, pp. 1–2.
- [25] K. Minakova and R. Zaitsev, "Photovoltaic thermal pv/t systems: increasing efficiency method," in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Sep. 2021, pp. 303–306.
- [26] Y. Li, E. Moon, J. Phillips, and I. Lee, "A stacked-photovoltaic-cell energy harvester with gt;81% indoor light harvesting efficiency for millimeter-scale energy-autonomous sensor nodes," in *ESSCIRC 2021 - IEEE 47th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC)*, Sep. 2021, pp. 235–238.
- [27] X. Sun, J. Qiu, Y. Tao, and Y. Yi, "Cost-effective coordinated voltage control in active distribution networks with photovoltaics and mobile energy storage systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, pp. 1–1, 2021.
- [28] Y. Yang, K. Kim, F. Blaabjerg, and A. Sangwongwanich, *Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems*, 09 2018.
- [29] D. Murillo-Yarce, J. Alarcón-Alarcón, M. Rivera, C. Restrepo, J. Muñoz, C. Baier, and P. Wheeler, "A review of control techniques in photovoltaic systems," *Sustainability*, vol. 12, no. 24, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10598>
- [30] O. Prakash Mahela and A. Gafoor Shaik, "Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems," 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.096>
- [31] SolarElectronics, "Las diferencias entre off-grid y on-grid," 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/30263gq>
- [32] H. Kim, S. Baek, E. Park, and H. J. Chang, "Optimal green energy management in Jeju, South Korea e On-grid and off-grid electrification," 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.03.004>
- [33] M. Shayestegan, "Overview of grid-connected two-stage transformer-less inverter design," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0367-z>
- [34] Z. Chen, "PI and sliding mode control of a Cuk converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 8, 2012.
- [35] E. Oggier, F. Botterón, G. Oggier, and G. García, "Control digital desacoplado de inversores trifásicos de cuatro piernas para alimentar cargas equilibradas y desequilibradas," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 17, no. 3, 2020.
- [36] R. K. Subroto, L. Ardhenta, and E. Maulana, "Nonlinear observer based PI sliding surface of adaptive sliding mode control for boost converter in PV system," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 7, no. 2, 2019.
- [37] F. A. Samman, C. Srun, and R. S. Sadjad, "Adaptive look-up table and interpolated PI gain scheduling control for voltage regulator using DC-DC converter," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 15, no. 2, 2019.
- [38] O. Rabiaa, B. H. Mouna, S. Lassaad, F. Aymen, and A. Aicha, "Cascade Control Loop of DC-DC Boost Converter Using PI Controller," in *International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies, ISAECT 2018 - Proceedings*, 2019.
- [39] T. G. Workineh, B. Z. Taye, A. H. Nebey, and E. M. Getie, "PI-like fuzzy based synchronous SEPIC converter control for PV-fed small scale irrigation DC pump," *Cogent Engineering*, vol. 8, no. 1, 2021.
- [40] Y. Yu and C. Zhang, "Bifurcation analysis of cascaded H-bridge converter controlled by proportional resonant," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, 2021.
- [41] B. J. Kumar and B. Banakara, "Current mode proportional resonant controlled multi input-SEPIC-re-boost-system," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 2, 2019.
- [42] J. Zhang, L. Li, D. G. Dorrell, and Y. Guo, "Modified PI controller with improved steady-state performance and comparison with PR controller on direct matrix converters," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 1, 2019.
- [43] J. F. Silva and S. F. Pinto, "Linear and Nonlinear Control of Switching Power Converters," in *Power Electronics Handbook*, 2018.
- [44] Y. Wang, X. Ruan, Y. Leng, and Y. Li, "Hysteresis Current Control for Multilevel Converter in Parallel-Form Switch-Linear Hybrid Envelope Tracking Power Supply," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, 2019.
- [45] D. Ibrahim, "An overview of soft computing," *Procedia Computer Science*, vol. 102, pp. 34–38, 1 2016.
- [46] C. A. Torres-Pinzón, L. Paredes-Madrid, F. Flores-Bahamonde, and H. Ramirez-Murillo, "LMI-fuzzy control design for non-minimum-phase DC-DC converters: An application for output regulation," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 5, 2021.
- [47] H. Khabou, M. Souissi, and A. Aitouche, "MPPT implementation on boost converter by using T-S fuzzy method," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 167, 2020.
- [48] O. Saleem, U. T. Shami, K. Mahmood-ul Hasan, F. Abbas, and S. Mahmood, "Robust-optimal output-voltage control of buck converter using fuzzy adaptive weighted combination of linear feedback controllers," *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 21, no. 2, 2019.
- [49] T. U. Hassan, R. Abbassi, H. Jerbi, K. Mehmood, M. F. Tahir, K. M. Cheema, R. M. Elavarasan, F. Ali, and I. A. Khan, "A novel algorithm for MPPT of an isolated PV system using push pull converter with fuzzy logic controller," *Energies*, vol. 13, no. 15, 2020.
- [50] D. Ramirez, R. D. J. Castillo, M. E. Zarei, and J. Serrano, "Linear multi-vector model-based predictive control for grid side converters of renewable power plants under severe grid disturbances," *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 5, 2021.
- [51] H. Cho, G. Bacelli, and R. G. Coe, "Model predictive control tuning by inverse matching for a wave energy converter," *Energies*, vol. 12, no. 21, 2019.
- [52] J. Umeda, H. Goto, T. Fujiwara, T. Taniguchi, and S. Inoue, "Study on Model Predictive Control for the Wave Energy Converter with a Linear Generator," *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, vol. 28, no. 0, 2018.

- [53] Y. Sun, Z. Li, and Z. Zhang, "Hybrid predictive control with simple linear control based circulating current suppression for modular multilevel converters," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 3, no. 4, 2019.
- [54] Y. M. Alsmadi, A. Alqahtani, R. Giral, E. Vidal-Idiarte, L. Martinez-Salamero, V. Utkin, L. Xu, and A. Y. Abdelaziz, "Sliding mode control of photovoltaic based power generation systems for microgrid applications," *International Journal of Control*, vol. 94, 2021.
- [55] C. Sandeep and C. Chakravarthy, "Sliding mode control of hybrid renewable energy system," *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, vol. 9, pp. 9–15, 2021.
- [56] S. Rahman, M. Khallat, and B. Chowdhury, "A discussion on the diversity in the applications of photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 4, pp. 738–746, 1988.
- [57] W. O'Neill, "Remote photovoltaic, standalone systems," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 6, no. 10, pp. 15–19, 1991.
- [58] E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski, and Q.-C. Zhong, "Grid-connected photovoltaic plants: An alternative energy source, replacing conventional sources," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 18–32, 2015.
- [59] S. Duryea, S. Islam, and W. Lawrance, "A battery management system for stand-alone photovoltaic energy systems," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 67–72, 2001.
- [60] S. Kotra and M. K. Mishra, "A supervisory power management system for a hybrid microgrid with hess," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3640–3649, May 2017.
- [61] B. Wang, Y. Wang, Y. Xu, X. Zhang, H. B. Gooi, A. Ukil, and X. Tan, "Consensus-based control of hybrid energy storage system with a cascaded multiport converter in dc microgrids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2356–2366, 2020.
- [62] S. Augustine, M. K. Mishra, and N. Lakshminarasamma, "A unified control scheme for a standalone solar-pv low voltage dc microgrid system with hess," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1351–1360, 2020.
- [63] N. R. Tummuru, M. K. Mishra, and S. Srinivas, "Dynamic energy management of hybrid energy storage system with high-gain pv converter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 1, pp. 150–160, 2015.
- [64] J. Faria, J. Pombo, S. Mariano, and M. D. Rosário Calado, "Power management strategy for standalone pv applications with hybrid energy storage system," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*, 2018, pp. 1–6.
- [65] S. Sikkabut, P. Mungporn, C. Ekkaravarodome, N. Bizon, P. Tricoli, B. Nahid-Mobarakeh, S. Pierfederici, B. Davat, and P. Thounthong, "Control of high-energy high-power densities storage devices by li-ion battery and supercapacitor for fuel cell/photovoltaic hybrid power plant for autonomous system applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 5, pp. 4395–4407, 2016.
- [66] S. Hajiaghahi, A. Salemnia, and M. Hamzeh, "Hybrid energy storage performance improvement in microgrid application," in *2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2018, pp. 392–397.
- [67] B. R. Ravada and N. R. Tummuru, "Control of a supercapacitor-battery-pv based stand-alone dc-microgrid," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 3, pp. 1268–1277, 2020.
- [68] U. Manandhar, B. Wang, A. Ukil, and H. B. Gooi, "Dynamic evolution control based power sharing method for hybrid energy storage system," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 2, pp. 276–283, 2019.
- [69] B. Wang, U. Manandhar, X. Zhang, H. B. Gooi, and A. Ukil, "Deadbeat control for hybrid energy storage systems in dc microgrids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1867–1877, 2019.
- [70] M. Aeini, A. Salemnia, and A. S. Nasab, "A new decentralized control strategy for hybrid energy storage system in islanded dc microgrid," in *2019 Iranian Conference on Renewable Energy Distributed Generation (ICREDG)*, 2019, pp. 1–6.
- [71] N. Kumar, T. K. Saha, and J. Dey, "Multilevel inverter (mli)-based stand-alone photovoltaic system: Modeling, analysis, and control," *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 909–915, 2020.
- [72] O. Krishan and S. Suhag, "Power management control strategy for hybrid energy storage system in a grid-independent hybrid renewable energy system: a hardware-in-loop real-time verification," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 3, pp. 454–465, 2020.
- [73] B. r. Ravada and T. N. Reddy, "Performance evaluation of photovoltaic grid-connected microgrid with hybrid energy storage using predictive current control," in *2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, 2020, pp. 1–6.
- [74] M. J. Rana and M. A. Abido, "Energy management in dc microgrid with energy storage and model predictive controlled ac-dc converter," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 11, no. 15, pp. 3694–3702, 2017.
- [75] S. Kumar, A. Agrawal, and R. Gupta, "Power balance for wtg - solar pv fed dc microgrids with battery and supercapacitor support," in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2018, pp. 1–6.