

## POWER QUALITY ISSUES OF HYBRID MICROGRID: REVIEW

E. Hernández-Mayoral<sup>1\*</sup>, C. R. Jiménez-Román<sup>1</sup>, O. Rodríguez-Rivera<sup>1</sup>, C. D. Aguilar-Gómez<sup>2</sup>,  
E. Dueñas-Reyes<sup>3</sup>, G. Martínez-Reyes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energías Renovables – Xochicalco s/n, Azteca, 62588, Temixco, Mor., México. \*[embema@ier.unam.mx](mailto:embema@ier.unam.mx)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Chiapas – Carretera Tuxtla Gutiérrez, 29150, Suchiapa, Chiapas, México.

<sup>3</sup>Universidad del Istmo – Cd. Universitaria s/n, 70760, Tehuantepec, Oax., México.

### RESUMEN.

Las Microrredes Eléctricas (MRs) son sistemas que integran la generación de electricidad y el almacenamiento energético (SAE), capaces de reducir las pérdidas de transmisión y de mejorar la eficiencia en la utilización de electricidad y calor. Sin embargo, hay muchas características en estos sistemas: una gran cantidad de equipos semiconductores, naturaleza estocástica de las fuentes de energía renovable (FER) y flujos de potencia bidireccionales. Por lo tanto, una tarea importante es garantizar los indicadores de calidad de energía requeridos. Por lo que, este artículo está dedicado a resumir exhaustivamente los principales aspectos de la calidad de la energía de las MRs cuando operan tanto en modo isla como conectada a la red principal. Finalmente, este documento servirá como base para futuras investigaciones, análisis comparativos y un mayor desarrollo de los problemas de la calidad de la energía en las MRs.

**Palabras Clave:** *Microrredes eléctricas, almacenamiento energético, calidad de la energía.*

### ABSTRACT.

Microgrids (MGs) are systems that integrate electricity generation and Energy Storage Systems (ESS), capable of reducing transmission losses and improving efficiency in the use of electricity and heat. However, there are many features to these systems: a large amount of semiconductor equipment, stochastic nature of renewable energy sources (RES), and bidirectional power flows. Therefore, an important task is to ensure the necessary power quality indicators. Therefore, this article is dedicated to exhaustively summarizing the main aspects of the power quality of MGs when operating both in island mode and connected to grid. Finally, this document will serve as a basis for future research, comparative analysis, and further development of power quality issues in MGs.

**Keywords:** *Microgrids, Energy Storage System, power quality.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Una microrred (MR) es un sistema eléctrico de potencia a pequeña escala con un grupo de cargas y generadores distribuidos que operan juntos a través de software y dispositivos de gestión de energía que actúan como una sola entidad controlable con respecto a la red. Las MRs se han convertido en un elemento clave de investigación en redes inteligentes y sistemas de distribución de energía ya que contienen diferentes fuentes de energía renovable (FERs) que

utilizan diversos avances tecnológicos basadas en electrónica de potencia. Sin embargo, las MRs presentan una salida inestable, lo que provoca diferentes problemas en la calidad de la energía como desbalance de voltaje [1], caídas de voltaje [2], aumentos de voltaje [3], distorsión armónica [4, 5], fluctuación de voltaje [6], entre otros. Estos problemas se han vuelto importantes recientemente debido a la necesidad de energía confiable para satisfacer las necesidades de los clientes y la presencia y el uso extensivo de diferentes tipos de aparatos electrónicos y eléctricos en los sectores comercial e industrial. Como resultado, en los últimos años se han desarrollado estándares y métodos para la mitigación de estos inconvenientes y, aunque estos métodos están bien documentados [7– 12], hasta ahora no se había presentado una descripción general comparativa. Por lo tanto, la motivación de este estudio tiene como objetivo llenar el vacío al revisar y comparar los problemas, soluciones y estándares de la calidad de la energía para aplicaciones en MRs. En resumen, las principales contribuciones de este artículo se enlistan a continuación:

- Se comparan los principales problemas relacionados con la calidad de la energía como son caída de voltaje, el aumento de voltaje, distorsión armónica de voltaje y corriente, desbalances del sistema y las fluctuaciones de voltaje y se analizan los métodos y técnicas que garantizan una potencia de salida de alta calidad.
- Se discuten las estrategias, controles y dispositivos para la mitigación de los problemas de la calidad de la energía en términos de costo y rendimiento.
- Esta revisión busca fortalecer los esfuerzos hacia la mitigación y el desarrollo de estándares de los problemas de calidad de la energía para aplicaciones de MRs.

Finalmente, en este documento se destacan algunas recomendaciones y sugerencias para mejorar la calidad de la energía para aplicaciones de MRs.

Este artículo de estructura de la siguiente manera: Sección 2 se detalla de manera general los conceptos de MRs y calidad de la energía. Sección 3 se describen los principales problemas de la calidad de la energía para aplicaciones en MRs. Sección 4 se analizan las estrategias de control para la

mitigación de los problemas de la calidad de la energía en MRs. Sección 5 se presenta una breve y clara discusión del tema. El artículo termina con una conclusión de tema en la Sección 6.

## 2. GENERALIDADES DE LAS MICRORREDES

Las MRs son sistemas eléctricos de potencia (SEPs) a pequeña escala que consisten en FER híbridas, sistemas de almacenamiento de energía (SAE), convertidores de potencia (CP), buses de CA-CD, cargas de CA-CD, unidad de control, monitoreo del sistema e interfaces de software [13] y que pueden operar en modo isla, con fuentes de alimentación autónomas; y en modo conectado a la red, donde se asumen todos los puntos de ajuste de la red principal [14, 15]. Básicamente, las MRs ofrecen beneficios significativos tanto para los usuarios como para la red eléctrica, reduciendo las emisiones de carbono a través de la diversificación de las FER, la operación económica al reducir los costos de transmisión y distribución (T&D), el uso de fuentes de generación distribuida (GD) menos costosas, la eficiencia energética distribuyendo a los precios de mercado en términos reales y una mejor calidad de la energía al administrar cargas locales. Las MRs pueden ser clasificadas en MR-CA, MR-CD y MR híbridas.

### 2.1. Microrred de Corriente Alterna (MR-CA).

En este sistema, todos los generadores distribuidos que incluyen SAE y cargas están vinculadas a los buses de la red principal de CA mediante un CP. Sin embargo, es posible conectar los generadores de CA, como las microturbinas, diésel y los aerogeneradores, directamente a la red principal sin la necesidad de CPs. Alternativamente, para conectar las fuentes de alimentación de CD como SAE basados en baterías (BESS) y sistemas fotovoltaicos (SFV) a la red eléctrica, es esencial un inversor de CD-CA. Por lo tanto, las cargas se conectan directamente a los buses de CA. No obstante, las MRs-CA presentan varios inconvenientes y una red de este tipo implica problemas complejos de control y sincronización. Sin embargo, esta red todavía se utiliza mucho en la actualidad.

### 2.2. Microrred de Corriente Directa (MR-CD)

La mayoría de los generadores que componen una MR producen energía en CD, que debe convertirse en CA para adaptarse a la red principal. Para esto, se requiere realizar la conversión de la CD al final del sistema ya que algunos equipos requieren CA para funcionar. Sin embargo, la conversión CD-CA-CD en una MR-CA reduce la eficiencia y provoca pérdidas de energía. Esto se puede solucionar mediante la operación de una MR-CD ya que está diseñada para abordar este problema. A diferencia de una MR-CA, la MR-CD ofrece considerables ahorros de energía al disminuir el número de CPs en un solo proceso de conversión mediante un solo CP. Las MRs-CD son más adecuadas para los sistemas de distribución en áreas residenciales que las redes distribuidas de CA causando pocos problemas de calidad de la energía ya que muchos

dispositivos modernos funcionan con CD y no tienen CPs que generen distorsión armónica. Por consiguiente, el nivel de conversión en las MRs-CD es bajo porque omite la etapa de CA en medio del proceso.

### 2.3. MR Híbridas

El objeto de estudio de este artículo son las MRs híbridas por lo que se dará mayor énfasis en esta sección a este tipo de MRs. Una estructura de MR híbrida típica consta de una red de CA, una red de CD, una red convencional y una etapa de interfaz como se muestra en la Figura 1. Basándose en la conexión de generadores distribuidos y los SAE al bus principal y la interconexión del bus principal con la red eléctrica principal, la MR híbrida se puede dividir en tres topologías: acoplada a CA, acoplada a CD y acoplada a CA-CD [16].

### 3. CALIDAD DE LA ENERGÍA EN MICRORREDES.

La calidad de la energía es una preocupación importante en las MRs ya sea operando en modo isla como conectadas a la red debido a la presencia de cargas no lineales y desbalanceadas, que constituyen una proporción mayor de la carga total de la MR. La presencia de estas cargas crean problemas como distorsión armónica, fluctuación de voltaje así como subidas/bajadas de voltaje en un sistema relativamente débil [5]. De la misma manera, es probable que se produzcan perturbaciones como distorsión o desbalance de voltaje debido a los muy altos niveles de impedancia, así como a la distribución de la carga y a los problemas ocasionados por la intermitencia de las FER como la eólica, la solar y las pilas de combustible (ver Tabla 1).

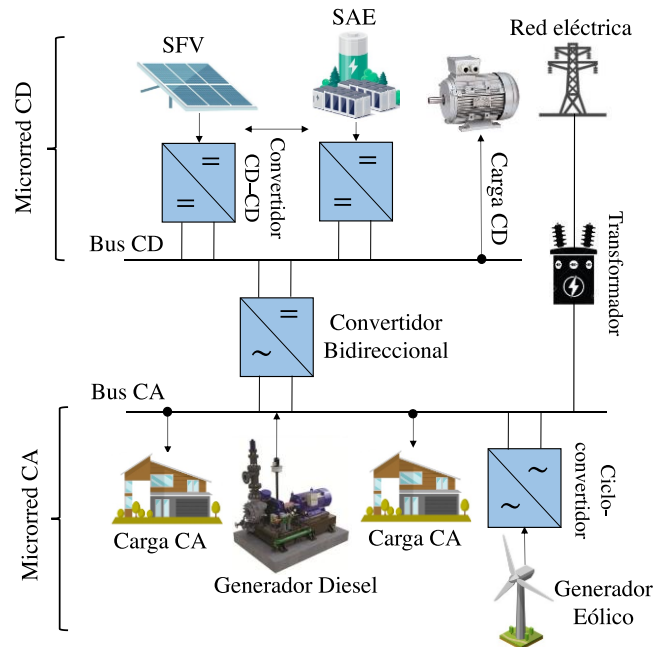


Figura 1. Diagrama de una MR-híbrida.

**TABLA 1.**  
 Problemas de calidad de la energía en MR-CA conectadas a la red.

Problema de calidad de energía	Generador distribuido				
	SFV	GE	Hidro	Biomasa	Diésel
Caída/aumento de voltaje	×	✓	✓	✓	✓
Desbalance	✓	×	×	✓	×
Armónicas	✓	✓	✓	×	×
Interrupción	✓	✓	×	✓	×

\*GE=Generador Eólico.

### 3.1. Calidad de la energía en MRs (modo isla)

En este modo de operación, los problemas más frecuentes son las perturbaciones, los desbalances de voltaje de la red, el flujo inverso de potencia, las caídas de voltaje y la distorsión armónica [17–19]. Respecto a las caídas de voltaje, éstas representan uno de los desafíos más serios en materia de calidad de energía ya que son causados principalmente por fallas lo que conducen a la inestabilidad del sector eléctrico y a la interrupción en la operación de dispositivos electrónicos sensibles, lo cual es típico en MRs híbridas compuestas de FER. Por otro lado, el aumento de voltaje, cuyo comportamiento es opuesto al de las caídas de voltaje, es otro problema serio de calidad de la energía; sin embargo, rara vez ocurre [2].

### 3.2. Calidad de la energía en MRs (modo conectado)

La interacción entre las cargas, las FER y los SAE durante los estados de transición puede generar impactos adversos en la calidad de la energía de la MR híbrida operando en modo isla. La distorsión armónica sigue siendo uno de los problemas de la calidad de la energía más importantes en las MRs híbridas operando en modo conectado a la red ya que no solo se presentan armónicas sino que éstas dan lugar a la presencia de inter-armónicas, sub-armónicas y supra-armónicas [20, 21]. En estos estudios se consideraron solo cargas lineales, no lineales y una combinación de cargas lineales y no lineales (mixtas) donde se concluye que las MRs híbridas con cargas no lineales presentan valores de Distorsión Armónica Total (THD) más altos que las MRs híbridas compuestas únicamente por cargas lineales (Ver Tablas 2 y 3). Curiosamente, los valores de THD no siempre aumentan durante la operación en modo isla debido al cambio en la impedancia de la red, lo que resulta en un comportamiento diferente entre cargas y generadores. También, es de notar que en estos estudios se muestra la aparición de componentes de frecuencia cercanos a la frecuencia de conmutación (10–12 kHz) de los CPs, comprometiendo así el funcionamiento de la

MR híbrida por posibles resonancias electromagnéticas. Otros estudios que analizan la distorsión armónica se registran en [22–23].

**TABLA 2.**  
 Comparación del THD de voltaje (%) de MRs operando tanto en modo isla como conectada a la red considerando diferentes tipos de carga.

Carga	THD <sub>v</sub> (%)		
	Conectada a red	Isla	Diferencia
Lineal	1.6	2.5	0.9
No-lineal	0.4 – 10.4	1.1 – 25	0.7 – 14.6
Inductiva	0.4	1.1	0.7
Mixta	0.4 – 1.88	1.3 – 8	0.9 – 6.12

**TABLA 3.**  
 Comparación del THD corriente (%) de MRs operando tanto en modo isla como conectada a la red considerando diferentes tipos de carga.

Carga	THD <sub>i</sub> (%)		
	Conectada a red	Isla	Diferencia
Lineal	1.7	1.12	-0.47
No-lineal	1.08	0.61	-0.47
Inductiva	0.27	0.29	0.02
Mixta	0.24	1.11	0.87

### 3.3. Estándares y normas para la calidad de la energía en MRs.

A medida que aumenta la integración de las FER en las MRs híbridas, muchos estándares y códigos de red imponen nuevas regulaciones, como la capacidad de soportar caídas de voltaje (LVRT, por sus siglas en inglés) y aumentos de voltaje (HVRT, por sus siglas en inglés). Estas normativas exigen que las MRs híbridas se desconecten de las redes principales en caso de que la bajada o subida de voltaje tenga una duración determinada [24]. En caso de caídas de voltaje, la norma alemana dicta que las MRs híbridas permanezcan conectadas y soporten el evento aportando potencia reactiva aunque el voltaje caiga al 0% de su valor nominal durante 0.15 s; de lo contrario, la desconexión es obligatoria. Caso contrario, para subidas de voltaje, la norma alemana dicta que la MR híbrida debe permanecer conectada aunque el voltaje suba al 120% de su valor nominal durante 0.1 s; de lo contrario, tendrá que desconectarse [4]. El desbalance de voltaje es el fenómeno de calidad de la energía que ocurre con más frecuencia en las MRs híbridas conectadas a la red principal. El factor de desbalance de voltaje (VUF, por sus siglas en inglés), se define como la relación entre la secuencia positiva y negativa de los componentes de voltaje y se utiliza para medir el grado de desbalance en el sistema [25]. En cuanto a la distorsión armónica son las cargas no lineales, los CPs, los controladores informáticos y los motores de velocidad variable los principales causantes de la generación de este fenómeno. Cuando la distorsión armónica es grande, indudablemente provocará fallas de comunicación, pérdidas de línea, sobrecalentamiento y disparo del interruptor automático [26]. Por lo que, las MRs deben reducir la emisión de la distorsión

armónica de acuerdo con lo que dictan los estándares y códigos vigentes [27, 28].

#### **4. ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA MITIGAR LOS PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.**

En esta sección se abordará el tema de las estrategias de control, especialmente en las MRs híbridas debido a que requieren estrategias de control más complejas que las redes de distribución convencionales ya que integran las subredes de CA y CD. Generalmente, la estabilidad, protección, balance de potencia, transición fluida de energía entre los modos de operación, la transmisión de potencia, la sincronización con la red principal y la optimización son las características que debe cumplir una estrategia de control en el entorno de las MRs híbridas [29]. No obstante, dependiendo de las responsabilidades asumidas por los diferentes niveles de control, la MRs híbridas pueden controlarse en modo centralizado, descentralizado, distribuido o jerárquico.

##### **4.1. Estrategia de control centraliza.**

Los métodos de control en los que las unidades de GD (UGD) son controladas por un controlador central (CC) se denominan estrategia de control centralizada. En realidad, está diseñado con un esquema de control básico que se ha utilizado en los SEPs convencionales con la finalidad de compartir la energía en las MRs híbridas [30, 31]. Este sistema tiene controladores locales que gobiernan cada componente del sistema. Cada controlador local tiene una capa de comunicación con el CC, el cual es único y recopila toda la información requerida de los controladores locales. Cabe mencionar que los controladores locales no tienen ninguna capa de combinación entre ellos, y tampoco pueden actuar por sí mismos sino que recopilan datos de las unidades distribuidas de la MR híbrida. Luego, estos datos se procesan y los comandos se devuelven mediante enlaces de comunicación digital. Sin embargo, en esta estrategia de control, el punto único de falla provoca una baja confiabilidad. Por estas razones, esta estrategia de control es más adecuada para MRs híbridas pequeñas. El control maestro-esclavo es un método utilizado en la estrategia de control centralizada el cual es responsable de la regulación del voltaje del bus común. En esta estrategia, un CP que opera como fuente de voltaje (VSC, por sus siglas en inglés) se considera como el maestro y los otros se consideran unidades esclavas siguiendo los órdenes del convertidor maestro basándose en una comunicación de banda ancha. Esta estrategia tiene desventajas como un punto único de falla y depender del CP principal. Sin embargo, proporciona un mayor nivel de coordinación en el control multicapa al permitir que la MR híbrida opere simultáneamente [32].

##### **4.2. Estrategia de control descentralizada.**

En el control descentralizado, no hay ningún CC ya que cada controlador local genera sus propias variables de control utilizando sus propias medidas sin ningún enlace de combinación con otros controladores locales. En realidad, el controlador lo-

cal de cada unidad también actúa como CC. Sin embargo, esta estrategia de control tiene la desventaja de que no cuenta con información suficiente acerca de las unidades de los sistemas. Por lo que, se considera que es el control más confiable, ya que no hay necesidad de enlaces de comunicación entre las diferentes unidades del sistema. Especialmente, para MRs híbridas a gran escala instaladas en un área amplia, esta estrategia sin requisitos de comunicación puede considerarse como la mejor opción, consiguiendo una gestión energética altamente eficiente ya que gestiona todo el flujo de energía desde un único centro hacia el CC. Adicionalmente, este control puede continuar funcionando incluso si se rompe alguna conexión [33]. Las ventajas del control descentralizado son que es adecuado para sistemas diversos, complejos y de gran escala, más fácil de conectar y usar, bajo costo computacional y control de fallas en más de un punto. Las desventajas de este control son la necesidad de una nueva estructura de comunicación y la necesidad de sincronización.

##### **4.3. Estrategia de control distribuida.**

Muchos investigadores se centran en el diseño y la implementación de sistemas de control distribuido para aplicaciones de MRs híbridas y así conseguir un CC confiable y de alto rendimiento [34, 35]. La estrategia de control distribuida tiene ventajas sobre la estrategia de control centralizada ya que incluye las ventajas del control centralizado y descentralizado como la potencia compartida, regulación de voltaje y balance del estado de carga (SoC) de la batería [36]. Las UGDs se utilizan cada vez más en las MRs híbridas lo que dificulta la implementación y el uso de la estrategia de control centralizada. Con el control distribuido, la función de control se distribuye por toda la red aumentando la confiabilidad del sistema ya que el sistema puede continuar operando en caso de un mal funcionamiento en una unidad [37]. Además, puede proporcionar una alta confiabilidad con un requisito de comunicación reducido, lo que resulta en una complejidad y un costo reducido en comparación con la estrategia del control descentralizada. Adicionalmente, esta estrategia no requiere de un CC debido a que el control se distribuye junto con la MR híbrida mejorando su escalabilidad y la resiliencia del sistema contra fallas de punto único [38].

##### **4.4. Estrategia de control jerárquica.**

Los sistemas de control de alto nivel son necesarios para realizar conjuntamente los propósitos básicos del control de potencia, corriente y voltaje en los SEPs. Estas estrategias de control consideradas multicapa se utilizan para objetivos muy específicos como compartir potencia entre las UGDs, mejorar la calidad de la energía, minimizar los costos operativos y garantizar una participación efectiva en los mercados de energía. Estos objetivos son muy difíciles de lograr utilizando un solo nivel de control, por lo que estas actividades se pueden realizar mejor con un control multicapa [39]. La arquitectura de control jerárquica consta de tres jerarquías de control: primaria, secundaria y terciaria. De manera resumida:



- La capa de control principal consiste en la fuente local y los controladores de carga para controlar el voltaje del bus común
- La capa de control secundaria asegura que la frecuencia y el voltaje estén dentro de ciertos valores en la MR híbrida.
- En la estrategia de control jerárquico, el sistema de gestión de la distribución y el control del flujo de potencia en el sistema tienen lugar en la capa de control terciaria [40].

Al aplicar una arquitectura de control jerárquico apropiada al sistema, éste se vuelve más flexible y expandible para que se puedan integrar en el sistema más UGDs.

## 5. DISCUSIÓN

En los últimos años se han presentado diferentes revisiones que tratan diversos aspectos de la calidad de la energía en las MRs híbridas. Por ejemplo, la referencia [41] propone una revisión dispositivos como el UPQC (Unified Power Quality Conditioner) con la finalidad de mejorar la calidad de energía en la MR híbrida. En [42], se presenta un estudio que revisa y compara los problemas, soluciones y estándares de la calidad de la energía en MRs híbridas considerando como principales problemas la caída de voltaje, aumento de voltaje, distorsión armónica de voltaje y corriente, desbalances del sistema y las fluctuaciones. La referencia [43], revisa críticamente las definiciones y los indicadores de calidad de energía especificados en la norma IEC 61000 e IEEE Std. 1159 y se analizan las causas y consecuencias de los problemas de calidad de la energía en las MRs. En [44], se mencionan los principales desafíos a los que se enfrentan los desarrolladores de MRs híbridas construidas específicamente para garantizar un SEP sostenible. En [45], se presenta una revisión exhaustiva de los elementos de una MR híbrida y de los diferentes tipos de control y estrategias operativas en donde se aplica detalladamente los niveles primario, secundario y terciario para contribuir a las políticas y regulaciones adoptadas por ciertos países, sus esquemas de protección, mercados transactivos y restauración de carga. En [46], se enumeran los desafíos de las UGDs para aplicaciones, oportunidades y soluciones de las MRs híbridas en materia de estrategias de control jerárquico y categorías de potencia compartida concluyendo que, los enfoques basados en el control de modelo predictivo (MPC) se emplean mayormente en controles recientes y estrategias de distribución de energía desde un punto de vista integral y simple. En [47] se proporciona una revisión de las técnicas, los problemas y las direcciones futuras con respecto a la protección de las MRs híbridas basadas en diversas UGDs. En [48], se presenta una revisión exhaustiva de los métodos de control distribuido para MRs híbridas operando en modo isla. Como se puede observar, estos artículos de revisión cubren uno de los parámetros clave asociados con las MRs híbridas.

## 6. CONCLUSIÓN

En este artículo se presentaron las principales áreas de investigación referente al tema de las MRs híbridas sabiendo que

éstas son el siguiente paso en la realización de un SEP descentralizado y un paradigma de red inteligente, la cual posee muchas ventajas sobre las redes eléctricas tradicionales debido a su confiabilidad mejorada, la eliminación de múltiples conversiones y a los servicios auxiliares.

El documento aborda el tema de la calidad de la energía en las MRs híbridas en ambos modos de operación: modo isla y modo conectado a la red. Asimismo, se describen los problemas de la calidad de la energía más importantes como: la caída de voltaje, la distorsión armónica y el desbalance de fase. No obstante, también existen muchos desafíos prácticos, así como problemas operativos, control de coordinación, de protección, de estabilidad, infraestructura de comunicación, estándares y normativas, así como tendencias del mercado eléctrico citados en este artículo que deben resolverse para ofrecer redes seguras confiables.

Aún existen nichos de oportunidad en temas de MRs híbridas como la protección el cual presenta un importante vacío en la investigación, y en esta área es necesario seguir explorando nuevas técnicas para no comprometer la calidad de la energía. Sin duda, este estudio servirá como base para futuras investigaciones, análisis comparativos y un mayor desarrollo de técnicas novedosas con respecto a las MRs híbridas

## REFERENCIAS

- [1] K.W. Kow, Y.W. Wong, and R.K. Rajkumar. Power quality analysis for PV grid connected system using PSCAD/EMTDC. *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 5, 2015, pp. 121–132.
- [2] W.X. Hu, X.Y. Xiao, and Z.X. Zheng. Voltage sag/swell waveform analysis method based on multidimension characterization. *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 14, 2020, pp. 486–493
- [3] F. Zheng, Y. Chen, Y. Zhang, Y. Lin, and M. Guo. Low voltage ride through capability improvement of microgrid using a hybrid coordination control strategy. *Journal Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, 2019, 034102.
- [4] I. Erlich, and U. Bachmann. Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany. in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Jun. 2005, pp. 1253–1257.
- [5] Y.W. Li, and J. He. Distribution system harmonic compensation methods: An overview of DG-interfacing inverters, *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, 2014, pp. 18–31.
- [6] Y.J. Kim. Development and analysis of a sensitivity matrix of a 3 $\phi$  voltage unbalance factor, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, 2018, pp. 3192–3195.
- [7] M. Castilla, J. Miret, J. Matas, L.G. de Vicuna, and J.M. Guerrero. Linear current control scheme with series resonant harmonic compensator for single phase grid connected photovoltaic inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, 2008, pp. 2724–2733.
- [8] Z. Li, W. Li, and T. Pan. An optimized compensation strategy of DVR for microgrid voltage sag. *Protect. Cont. Mod. Power Syst*, vol. 1, 2016, pp. 1–8.
- [9] M. Molinas, J. AreSuul, and T. Undeland. Low voltage ride through of wind farm with cage generators: STATCOM versus SVC. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, 2008, pp. 1104–1117.
- [10] A. Rasheed, and G. Keshava. Improvement of PQ for microgrid using fuzzy based UPQC controller, *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, 2015, 1–5.
- [11] L. Dai, W. Chen, X. Yang, M. Zheng, Y. Yang, and R. Wang. A Multi-Function Common Mode Choke Based on Active CM EMI Filters for AC/DC Power Converter. *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 43534–43546.
- [12] X. Yang, Y. Du, J. Su, L. Chang, Y. Shi, and J. Lai. An optimal secondary voltage control strategy for an islanded multibus microgrid, *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, 2016, pp. 1236–1246.

- [13] D.E. Olivares, et. al. Trends in microgrid control. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, 2014, pp. 1905–1919.
- [14] E. Planas, et. al. AC and DC technology in microgrids: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 43, 2015, pp. 726–749.
- [15] E. Unamuno, and J.A. Barrena. Hybrid ac/dc microgrids—Part I: review and classification of topologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 52, 2015, pp. 1251–1259.
- [16] Y.E. García-Vera, R. Dufo-López, and J.L. Bernal-Agustín. Optimization of Isolated Hybrid Microgrids with Renewable Energy Based on Different Battery Models and Technologies. *Energies*, vol. 13, 2020, 581.
- [17] R.A. Kaushik, and N.M. Pindoriya. A Hybrid AC-DC Microgrid: Opportunities Key Issues in Implementation. In Proc. 2014 Intern. Conf. on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE), India, 6–8 March 2014; pp. 1–6.
- [18] C. Li, S.K. Chaudhary, J.C. Vasquez, and J.M. Guerrero. Power Flow Analysis for Droop Controlled LV Hybrid AC-DC Microgrids with Virtual Impedance. In Proc. 2014 IEEE PES General Meeting Conference Exposition, National Harbor, MD, USA, 27–31 July 2014; pp. 1–4.
- [19] M.A. Hossain, H.R. Pota, M.J. Hossain, F. Blaabjerg. Evolution of Micro-grids with Converter-Interfaced Generations: Challenges and Opportunities *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 109, 2019, 160–186.
- [20] P. Tenti, H.K. Paredes, and P. Mattavelli. Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids. *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 26, 2011, pp. 664–673.
- [21] G. Abundis-Tinajero, J. Segundo-Ramírez, et. al. Harmonic issues assessment on PWM VS-based controlled microgrids using Newton methods. *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, 2018, pp. 1002–1011.
- [22] S. Ronnberg, M. Bollen, and J. Nomm. PQ measurements in a single-house microgrid. *CIGRE - Open Access Proc. J.* vol. 1, 2017, 818–822.
- [23] M.H. Bollen, R. Das, et. al. PQ Concerns in Implementing Smart Distribution-Grid Applications. *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, 2017, pp. 391–399.
- [24] F. Zheng, Y. Chen, Y. Zhang, Y. Lin, and M. Guo. Low voltage ride through capability improvement of microgrid using a hybrid coordination control strategy. *Journal Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, 2019, 034102.
- [25] Y.J. Kim. Development and analysis of a sensitivity matrix of a 3 $\phi$  voltage unbalance factor, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, 2018, pp. 3192–3195.
- [26] N. Alwaz, S. Raza, S. Ali, M.K. Bhatti, and S. Zahra. Harmonic power sharing and power quality improvement of droop controller based low voltage islanded microgrid, presented at the Int. Symp. Recent Adv. Electr. Eng. (RAEE), Aug. 2019, pp. 1-6.
- [27] T.M. Blooming, and D.J. Carnovale. Application of IEEE STD 519-1992 harmonic limits, in *Proc. Conf. Rec. Annu. Pulp Paper Ind. Tech. Conf.*, Jun. 2006, pp. 1–9.
- [28] N. Cho, H. Lee, R. Bhat, and K. Heo. Analysis of harmonic hosting capacity of IEEE Std. 519 with IEC 61000-3-6 in distribution systems, IEEE PES GTD Grand Int. Conf. Expo. Asia (GTD Asia), 2019, pp. 730–734.
- [29] A. Bidram, and A. Davoudi. Hierarchical structure of microgrids control system. *IEEE Trans. on Smart Grid.*, vol. 3, 2012, pp. 1963–1976.
- [30] R. Puente, S. Marzal, R. González-Medina, E. Figueres, G. Garcera. Experimental study of a centralized control strategy of a DC microgrid working in grid connected mode. *Energies* vol. 10, 2017, pp. 1627.
- [31] H.K. Morales, J.P. Bonaldo, and J.A. Pomilio. Centralized control center implementation for synergistic operation of distributed multifunctional single-phase grid-tie inverters in a microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, 2018, pp. 8018–8029.
- [32] T. Caldognetto, and P. Tenti. Microgrids operation based on master-slave cooperative control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.*, vol. 2, 2014, pp. 1081–1088.
- [33] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, L. de Vicuña. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, 2008, pp. 726–736.
- [34] J. Zhao, and F. Dörfler. Distributed control and optimization in DC micro-grids. *Automatica* vol. 61, 2015, pp. 18–26.
- [35] F. Dörfler, J.W. Simpson-Porco, and F. Bullo. Breaking the hierarchy: Distributed control and economic optimality in microgrids. *IEEE Trans. on Control of Netw. Syst.*, vol. 3, 2015, pp. 241–253.
- [36] J. Schonbergerschonberger, R. Duke, and S.D. Round. DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid. *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 53, 2006, pp. 1453–1460.
- [37] A. Khorsandi, and M. Ashourloo. A decentralized control method for a low voltage DC microgrid. *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 29, 2014, pp. 793–801.
- [38] S. Anand, B.G. Fernandes, and J.M. Guerrero. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids. *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol 28, 2012, pp. 1900–1913.
- [39] Q. Zhou, et. al. Optimal consensus-based distributed control strategy for coordinated operation of networked microgrids. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, 2019, pp. 2452–2462.
- [40] F.S. Al-Ismaail. DC microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. *IEEE Access* vol. 9, 2021, pp. 36154–36172.
- [41] W. Al-Saedi, S.W. Lachowicz, D. Habibi, and O. Bass. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization. *Int. J. of Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, 2012, pp. 139–149.
- [42] A. Alkahtani, S. Al-Falahi, A. Athamneh, V.G. Agelidis. Power quality in Microgrids including supraharmonics: issues, standards, and mitigations. *IEEE Access* vol. 8, 2020, pp. 127104–127122.
- [43] G. Van de Broeck, J. Stuyts, and J. Driesen. A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids. *Appl. Energy.*, vol. 229, 2018, pp. 281–288.
- [44] R. Sabzehgar. A Review of AC/DC Microgrid-Developments, Technologies, and Challenges. In Proc. 2015 IEEE Green Energy and Systems Conf. (IGESC), Long Beach, CA, USA, 9 November 2015; pp. 11–17.
- [45] Y. Zahraoui, I. Alhamrouni, et. al. Energy Management Systems in Micro-grids: A Comprehensive Review. *Sustainability* vol. 13, 2021, pp. 10492.
- [46] G. Chaudhary, J.J. Lamb, O.S. Burtheim, and B. Austbo. Review of Energy Storage and Energy Management System Control Strategies in Microgrids. *Energies* vol. 14, 2021, pp. 4929.
- [47] S. Sarangi, B.K. Sahu, and P.K. Rout. A Comprehensive Review of Distribution Generation Integrated DC Microgrid Protection: Issues, Strategies, and Future Direction. *Int. J. Energy Res.*, vol. 25, 2021, pp. 5006–5031.
- [48] E. Espina, J. Llanos, et. al. Distributed Control Strategies for Microgrids: An Overview. *IEEE Access.*, vol. 8, 2020, 1.