

Power Quality in Electrical Microgrids Applications: Issues and Mitigations

Emmanuel Hernández Mayoral
Wind Energy Laboratory
Institute of Renewables Energies
Temixco, Mor., México
emhema@ier.unam.mx

Efraín Dueñas Reyes
Wind Energy Studies
Isthmus University
Oaxaca, Oax., México
erd@ier.unam.mx

José Iván Barreto Muñoz
Wind Energy Studies
Isthmus University
Oaxaca, Oax., México
jose.ivan.barreto.munoz@gmail.com

Christian René Jiménez Román
Wind Energy Laboratory
Institute of Renewables Energies
Temixco, Mor., México
crjiro@ier.unam.mx

Reynaldo Iracheta Cortez
Wind Energy Studies
Isthmus University
Oaxaca, Oax., México
reynaldo.iracheta@conacyt.com

Carlos Damián Aguilar Gómez
Wind Energy
Politechnical University of Chiapas
Chiapas, Chiapas., México
megan_yf@hotmail.com

Resumen— Una microrred (MG), conjunta una serie de tecnologías para administrar un grupo de cargas y generadores distribuidos (DG) mediante dispositivos de gestión de energía que actúan como una única entidad controlable respecto a la red eléctrica. Dado que las MGs utilizan fuentes de energía renovables (RES) las cuales son de carácter intermitente debido a las condiciones climatológicas, éstas presentan una salida de potencia inestable lo que provoca diferentes problemas en materia de calidad de la energía para lo cual se han propuesto diferentes métodos y estándares en los últimos años para mitigar estos problemas. Aunque estos métodos están bien documentados, hasta ahora no se ha recopilado una revisión general comparativa. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo llenar este vacío documental revisando y comparando los problemas y soluciones actuales de la calidad de la energía en las MG's.

Keywords— Microrred, calidad de la energía, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda energética mundial ha aumentado el consumo de combustibles fósiles y por consecuencia, la emisión de gases de efecto invernadero. Como parte de la transición energética que busca mitigar el cambio climático, se ha adoptado el uso de fuentes de energía renovables (RES), pasando a representar el 33% de la capacidad instalada a nivel mundial al 2018 [1]. Sin embargo, a causa de la intermitencia de las RES al depender de las condiciones climáticas, las MGs se complementan con sistemas de almacenamiento de energía (ESS) y generación distribuida (DG).

La integración de MGs en la red eléctrica, disminuye las emisiones de CO₂, sin embargo, los problemas de calidad de la energía siguen siendo el mayor desafío técnico en su implementación. Entre los problemas de calidad de la energía más significativos para aplicaciones de MGs, se pueden mencionar las fluctuaciones de voltaje, distorsión armónica de corriente y voltaje, desbalances, mal funcionamiento de los dispositivos de protección, sobrecargas, fallas en el equipo eléctrico [4], por

mencionar algunos. Para solucionar estos inconvenientes se hace uso de dispositivos como los acondicionadores unificados de calidad de la energía (UPQC) [3], compensador síncrono estático (STATCOM) [4], restauradores de voltaje dinámico (DVR) [5] y compensadores estáticos de VArS (SVC) [6]. Además de estos dispositivos se han desarrollado diversos métodos y estrategias de control para la mitigación de problemas de calidad de la energía. Por ejemplo, la optimización del enjambre de partículas el cual, de manera eficiente, consigue compensar el desbalance de voltaje en una MG [7] mitigando la fluctuación de voltaje en la misma [8]. Otras estrategias de optimización, como el modelo de control predictivo (MPC) se utilizan en MGs para contrarrestar el desbalance de voltaje y la compensación armónica mediante [9], mientras que en [10] se utilizó un controlador de lógica difusa para mitigar la caída de voltaje en una MG que consta de un sistema fotovoltaico (PV) y sistemas eólicos. Adicionalmente, se utilizan otros controladores, como el control coordinado de convertidores de interfaz dual [11] para compensar tanto el desbalance de voltaje como las corriente armónicas en la MG. Por lo que este artículo se suma a la literatura existente con respecto a las tendencias de investigación en el campo.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección I se brinda un panorama actual de los problemas de la calidad de la energía en las MGs en diferentes modos de operación. En la sección II se aporta las generalidades más importantes de las MGs. En la sección III, se describen los problemas de la calidad de la energía más significativos en MGs. En la sección IV se mencionan los dispositivos, métodos y estrategias de control para mejorar la calidad de la energía en las MGs. Finalizando con las conclusiones en la sección V.

II. GENERALIDADES DE LAS MGs

Una MG se define como un sistema eléctrico a pequeña escala conformado por un clúster de cargas y fuentes de energía distribuida (DES) que trabajan juntos a través de software's y dispositivos para la gestión de energía para suministrar eficientemente.

entamente energía a una comunidad local. Generalmente, está conectada a niveles de bajo voltaje asociada con algunos DES como microturbinas, celdas de combustible y PV junto con ESS (volantes de inercia, baterías y supercapacitores) y cargas flexibles [12]. La Figura 1 ilustra la estructura típica de una MG que consta de RES, ESS, DG y cargas.

Las MGs presentan varias ventajas desde el punto de vista tecnológico y económico, tales como el ahorro de costos que supone la construcción de nuevas líneas de transmisión, la flexibilidad del sitio de la planta, la diversificación de fuentes de energía, la minimización de pérdidas en la red eléctrica y la mejora en la fiabilidad y estabilidad del sistema.

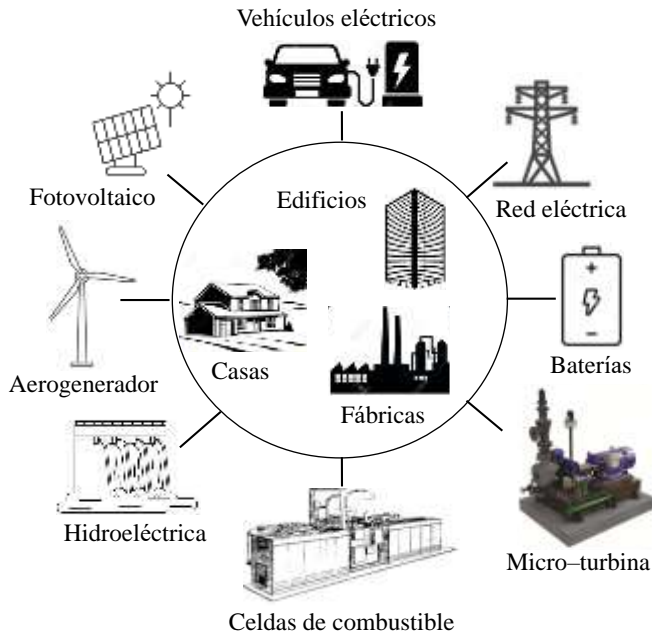


Figura 1. Estructura de una MG típica.

A. Clasificación de las MGs

Las microrredes se pueden clasificar en: MGs de corriente alterna (MGs-CA), MGs de corriente directa (MGs-CD) y MGs híbridas (MGs-CD/CA). Las MGs-CA son las de más amplia utilización en la actualidad [13], ya que se compone de cargas y generadores de CA que pueden incluso llegar a conectarse a la red principal sin la necesidad de convertidores electrónicos de potencia. No obstante, éstas MGs presentan varios inconvenientes como problemas complejos de control y sincronización. Un detalle importante a mencionar es que la regulación de la calidad de la energía en este tipo de MG se lleva a cabo en base al sistema de distribución convencional y al modo de operación [14]. Por otro lado, una MG-CD, ofrece considerables ahorros de energía al disminuir el número de convertidores en un solo proceso de conversión mediante un solo convertidor [15]. Especialistas afirman que las MGs-CD son más adecuadas para los sistemas de distribución en áreas residenciales ya que ocasionan pocos problemas de calidad de la energía [16]. Además, muchos dispositivos modernos funcionan con CD y no tienen dispositivos electrónicos de potencia que generen señales armónicas. Por consiguiente, el nivel de conversión en las MGs-CD es bajo porque omite la etapa de CA

en medio del proceso. Por lo que, una MG-CD es más suave que una MG-CA ya que no se tiene en cuenta la monitorización de fase y la frecuencia [17]–[19].

Finalmente, las MGs-híbridas consisten en redes de CA y CD conectadas entre sí por convertidores multidireccionales a gran escala. Este sistema podría disminuir las etapas de conversión (CD/CA/CD y CA/CD/CA) en MGs-CD o MGs-CA individuales y así reducir la ocurrencia de eventos de calidad de la energía. En este tipo de MGs, las fuentes y cargas de CA están vinculadas a la barra colectora de CA, mientras que las fuentes y cargas de CD están vinculadas a la barra colectora de CD. El sistema de almacenamiento se puede vincular a cualquiera de las dos MGs. La Figura 2 ilustra el diagrama unifilar de una MG híbrida [20]. La Tabla I muestra una comparación entre estas diferentes estructuras en términos de tipo de operación.

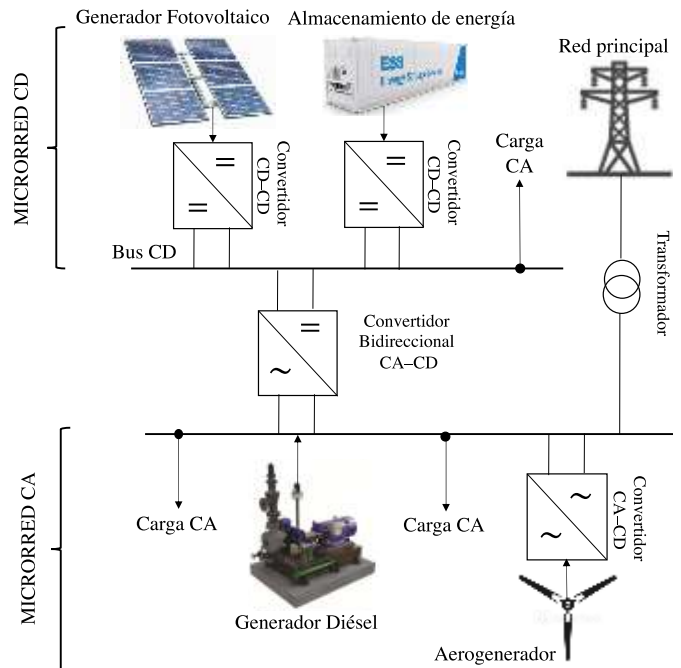


Figura 2. Estructura de una MG-híbrida.

B. Modos de operación de las MGs

Las MGs pueden conectarse y desconectarse de la red para permitir que opere tanto en modo “conectado a la red” [21] como en modo “isla” [22]. Para ello, debe de contar con flexibilidad que le permita funcionar en ambos modos de operación para mejorar la eficiencia y la seguridad de la red [23]. En modo “conectado a la red”, las MGs pueden mantener una frecuencia estable en el sistema mediante el intercambio de potencia con la red principal. Sin embargo, en modo “isla”, las MGs están diseñadas como sistemas fuera de la red [24] donde es crítico el control de la frecuencia primaria. La operación de la MG en modo “isla” es su característica más destacada y se habilita mediante el uso de interruptores en el punto de acoplamiento común (PCC), el cual permite que la MG se desconecte de la red en caso de perturbaciones aguas arriba o fluctuaciones de voltaje [25].

TABLA I.
COMPARACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LAS MGs

Tipo	MG-CD	MG-CA	MG-Híbrida
Integración	<ul style="list-style-type: none"> Se puede integrar fácilmente con aerogeneradores (WT), paneles fotovoltaicos (FV) y celdas de combustible (FCs). 	<ul style="list-style-type: none"> Solo se puede integrar con unidades de generadores de distribución de CD mediante niveles de conversión Es necesaria la sincronización para la integración en CA. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede ser integrada directamente. Apropiada para la generación basada en DC (por ejemplo: FV, vehículos eléctricos (VE), almacenamiento de energía. Sin necesidad de convertidores de potencia.
Conversión de voltaje	<ul style="list-style-type: none"> Convertidor de potencia bidireccional CD/CA y CD/CD vinculado a la barra colectora. 	<ul style="list-style-type: none"> La estabilidad de la transferencia de voltaje se logra mediante el uso de un convertidor CA/CD/CA. Las cargas de CA son conectadas directamente a la línea del bus. Es necesario un convertidor CA/CD para las cargas de CD. 	<ul style="list-style-type: none"> Se emplea un transformador para el lado de CA para la conversión de voltaje. Sin embargo, el convertidor CD-CD se utiliza para la conversión de voltaje del lado CD.
Esquema de protección	<ul style="list-style-type: none"> Fusibles Disyuntor de potencia (DP) Caja moldeada del DP Caso aislado del DP Interruptor estático 	<ul style="list-style-type: none"> Disyuntor de potencia miniatura (DPM) DP seccionalizado Relés de sobrecorriente Reconectores Fusibles 	<ul style="list-style-type: none"> Las cargas de CA y CD conectadas a través de dos transformadores y dos convertidores de cuatro cuadrantes XY.
Pros	<ul style="list-style-type: none"> Se puede formar un enlace directo entre cargas de CD y buses de CD. Son necesarios pocos convertidores de potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Fácilmente reconfigurable a través de redes existentes. Es necesaria la sincronización de la unidad de generación distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> Conectada directamente a la red. No es necesaria la sincronización de la unidad de generación distribuida. Minimiza las pérdidas de potencia. Control simplificado.
Contras	<ul style="list-style-type: none"> El voltaje no está estandarizado. Se necesita un sistema de almacenamiento de energía adicional. No es reconfigurable desde la red actual. Es difícil mantener la seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> Es difícil la sincronización con la red eléctrica. Baja fiabilidad y eficiencia. Controlador y arquitectura complejos 	<ul style="list-style-type: none"> Gestión y controles complejos, especialmente en operación modo isla. Baja confiabilidad. Baja eficiencia.

III. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA PARA APLICACIÓN EN MGs

Las MGs presentan problemas de calidad de la energía diferentes a los de los sistemas convencionales. Estos problemas se deben a su estructura única, modo de operación y a la configuración de los recursos de distribución [26]. Generalmente, existen tres tipos de problemas de calidad de la energía:

1. Problemas debidos a las condiciones de funcionamiento de los DES en las MGs (fluctuaciones en la potencia de salida generada por las RES como PV y aerogeneradores (WTs)).
2. Problemas debidos a la distorsión armónica de corriente y voltaje generadas por los dispositivos electrónicos de potencia de los DES.
3. Problemas debidos al desbalance de voltaje en la MG. Estos se generan normalmente por la presencia de cargas monofásicas o trifásicas desbalanceadas en la MG.

A. Problemas de calidad de la energía en MGs

Los problemas de calidad de la energía en MGs de operación modo "isla" o monovalente a pequeña escala, son debido a la relativa mayor proporción de sus cargas no lineales. Esta situación crea problemas en el voltaje como distorsión, fluctuación y caídas/elevaciones en un sistema relativamente débil [27]. En este modo de operación es más probable que se produzcan perturbaciones como distorsión o desbalance de voltaje debido a altos niveles de impedancia, así como a la distribución

de carga en comparación con las MGs que operan en modo "conectado a la red". Además, los problemas más frecuentes son las perturbaciones y los voltajes desbalanceados provenientes de la red [28]. La Tabla II muestra los problemas de calidad de la energía introducidos en diferentes unidades de DG [29]. Estos problemas se analizan con base en el desarrollo de estándares los cuales definen los niveles aceptables de distorsiones y desviaciones en diversas cantidades eléctricas, como corriente, voltaje y factor de potencia.

TABLA II.
PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA RELACIONADOS CON LAS UNIDADES DE GENERACIÓN EN MGs

Problemas de Calidad de la Energía	Solar	Eólica	Micro-turbinas	Diesel
Voltaje (caída/elevación)	×	✓	✓	✓
(Sobre/bajo) voltaje	×	✓	×	✓
Desbalance de voltaje	✓	×	×	×
Voltaje transitorio	×	✓	×	×
Distorsión armónica de voltaje	✓	✓	✓	×
Distorsión armónica de corriente	✓	✓	×	✓
Parpadeos eléctricos (flickers)	✓	✓	✓	×
Interrupción de voltaje	✓	✓	×	×

B. Caídas/elevaciones de voltaje en MGs

Las caídas de voltaje, causadas principalmente por fallas e interrupciones en el funcionamiento de dispositivos electrónicos sensibles, representan unos de los desafíos más serios en problemas de calidad de la energía. Por otro lado, las elevaciones de voltaje, es otro problema grave de la calidad de la energía; sin embargo, rara vez ocurre [30]. A medida que au-

menta la integración de las DES en las MGs, muchos estándares y códigos de red imponen nuevas regulaciones, como la capacidad de soportar huecos de tensión (LVRT) y elevaciones de tensión (HVRT). Dichas regulaciones requieren que las MGs se desconecten de la red en caso de que la caída o elevación de voltaje tenga una duración específica [31].

C. Distorsión armónica

La distorsión armónica es un problema ampliamente investigado en los sistemas de bajo voltaje. En una MG, se puede presentar debido a las RES con dispositivos de electrónica de potencia. La distorsión armónica elevada, puede ocasionar pérdidas en las líneas, sobrecalentamiento e incluso desconexión del disyuntor [32]. A medida que avanzan las especificaciones para la integración de las MGs en la red principal, también se implementan nuevos criterios acerca de la distorsión armónica para garantizar que el voltaje y la corriente sean compatibles con la red. Por lo tanto, se han impuesto algunos requisitos a los límites de distorsión armónica total e individual (THD) para las MGs conectadas a la red eléctrica principal [33], [34] y [15]. Para el THD de corriente (THD_i), todos los requisitos, estándares y códigos de red son similares, es decir, debe ser inferior al 5%. Los estándares del Reino Unido (EREC G83), por ejemplo, son más estrictos y requieren un THD_i <3% [35]. Con respecto a la THD de voltaje (THD_v), la literatura indica que la mayoría de los países siguen los estándares IEEE o IEC [16], en los cuales el THD_v no debe exceder el 5% en una MG.

D. Desbalance de voltaje y fluctuaciones

El desbalance de voltaje es el fenómeno de la calidad de la energía que ocurre con mayor frecuencia. El factor de desbalance de voltaje (VUF), que es la relación entre la secuencia positiva y negativa de las componentes de voltaje, se utiliza para medir el grado de desbalance en el sistema [36]. El desbalance de voltaje, causado por la diversidad de fuentes que integran una MG [37], puede provocar que los sistemas eléctricos de potencia (SEPs) sufran mayor número de pérdidas y sean menos estables. Aunado a lo anterior, se han establecido ciertos criterios en los códigos de red y estándares para garantizar una integración estable y balanceada de las MGs a la red principal para limitar el VUF. Por ejemplo, IEEE Std [15] no permite que el VUF supere el 3%. La norma IEC exige que todos los generadores de distribución mantengan el VUF por debajo del 2% [34]. Los requisitos de China y

Alemania establecen que el VUF no debe exceder del 2% [35], [39]. La Asociación Canadiense de Estándares (CAN/CSA-C61000-2-2) estableció el 2% como el límite máximo permitido de VUF; para el caso de cargas desbalanceadas, se permite el 3% [40]. Generalmente, los estándares globales indican que el límite aceptable de VUF debe estar entre el 1% y el 2% [35], [41].

IV. DISPOSITIVOS, MÉTODOS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL EN MGs PARA LA MEJORAR LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

Actualmente, son muchos los dispositivos y métodos de control que podrían ayudar a mitigar el riesgo de una mala calidad de la energía en los SEPs. Los métodos que a continuación se detallan mejoran la calidad de la energía en MGs que operan en modo “conectado a la red principal”.

A. STATCOM y SVC

STATCOM y SVC son dispositivos que se utilizan para resolver problemas de calidad de la energía que se deben principalmente a la integración de RES, como LVRT, para superar las elevaciones de voltaje en sistemas PV [42] y sistemas eólicos [43]. Se ha comparado la eficiencia tanto del SVC y STATCOM para abordar problemas de caídas de voltaje y se ha concluido que el STATCOM contribuye más al margen transitorio en comparación con SVC. También, STATCOM se utilizó para mitigar las fluctuaciones de voltaje en alta penetración de DER para aplicaciones de MGs y compensar la potencia reactiva en MGs en [44]. Otro estudio demostró la capacidad de presentar los STATCOM para reducir la fluctuación de potencia en MGs y aumentar la regulación de voltaje y el factor de potencia del sistema [45]. Respecto a la mitigación de armónicas en MGs que utilizan numerosas RES como aerogeneradores, generadores diesel, celdas de combustible, microturbinas y sistemas fotovoltaicos, el STATCOM las redujo de acuerdo a los estándares IEEE 1547 [46]. A partir de los estudios anteriores, se concluye que STATCOM tiene una alta capacidad para mitigar la fluctuación de voltaje y mejorar el perfil de voltaje en las MGs al mismo tiempo que mitiga las caídas/elevaciones de voltaje en menor medida. El SVC se utilizó en MGs para mejorar la calidad de la energía suministrada y para aumentar la eficiencia del sistema durante la caída de voltaje en una MG que opera en modo “isla”. Sin embargo, durante eventos de caídas de voltaje severos, el SVC funciona peor que el DVR y el STATCOM.

TABLA III.
COMPARACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS PARA MITIGAR LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGÍA

Factores	DSTATCOM	SVC	DVR	UPQC
Velocidad de operación	Menor que DVR	Menor que DVR	Rápido	Muy rápido
Potencia activa/reactiva	Reactiva	Reactiva	Ambos	Ambos
Armónicas	Menos	Menos	Mucho menos	Mucho menos
Problemas resueltos	Caídas/elevaciones de voltaje	Caídas/elevaciones de voltaje	Caídas/elevaciones/armónicas/fluctuaciones	Caídas/elevaciones/armónicas/transitorios/desbalances y flickers
Costo	Normal	Promedio	Alto	Muy alto
Complejidad	Alta	Alta	Alta	Muy alta

B. Regulador Diámico de Voltaje (DVR)

Un DVR se usa para mitigar los problemas de la calidad de la energía en las MGs, principalmente las caídas y elevaciones de voltaje mejorando así la calidad de la energía de las que contienen PV y baterías. Sin embargo, todavía existen algunas limitaciones en términos de LVRT. Por lo que, en [47] utilizan una técnica de optimización para mejorar el rendimiento del DVR y así resolver el problema de las caídas de voltaje en las MGs mediante lógica difusa. La efectividad de este método redujo el VUF a menos del 1%, mientras que la THD de corriente y voltaje se redujo a menos del 5%, como se indica en los códigos de red. En general, el DVR es uno de los mejores dispositivos para mitigar los problemas de calidad de la energía cuando la MG opera en modo “conectado a la red principal”.

C. Acondicionador Unificado de Calidad de Energía (UPQC)

El UPQC es la configuración completa de filtros híbridos y se identifica como un acondicionador de potencia multifuncional, utilizado para compensar diferentes perturbaciones de voltaje, corregir fluctuaciones de voltaje y evitar la entrada de corrientes armónicas en la red eléctrica. Originalmente, fue diseñado para mitigar las perturbaciones que afectan el desempeño de cargas sensibles y/o críticas y así mejorar la calidad de la energía de los SEPs [48]. En [49], se implementó la técnica de lógica difusa en un UPQC para minimizar armónicas de corriente y voltaje. Los resultados demuestran que la distorsión armónica general se redujo del 8.93% al 3.34%. La mitigación de la caída de voltaje y la reducción del THD utilizando el dispositivo UPQC mediante un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo (ANFIS) se muestra en [50]. Además, se diseña un UPQC para mejorar la calidad de la energía, y su desempeño fue evaluado en varias cargas no lineales. Los resultados muestran que el UPQC redujo el THD_i y el THD_v cuando se utilizaron técnicas de control de ANN para mejorar el rendimiento general. El THD se reduce de 12.6% a 3.7% y de 7.34% a 3.7% para voltaje y corriente, respectivamente. Si bien el UPQC se usa ampliamente para mitigar la distorsión armónica de voltaje y corriente, también se ha ocupado para mitigar el desbalance de voltaje en la MG en modo “conectado a la red principal”. Los resultados ilustran que el UPQC puede detectar la incidencia del desbalance de voltaje y reducir el VUF a menos del 2%, como lo establece los códigos de red.

Finalmente, sobre la base de la literatura descrita, la Tabla III ilustra una comparación entre los dispositivos más populares utilizados para mitigar los problemas de la calidad de la energía en MGs. La comparación se realizó en términos de costo, madurez tecnológica y desempeño. En general, el DVR es superior a SVC y STATCOM en términos de caídas y/o elevaciones de voltaje, fluctuaciones y desbalances de voltaje, mientras que el UPQC ofrece la mejor protección para cargas sensibles de fuentes de baja calidad.

V. CONCLUSIÓN

Una MG es una red de energía innovadora dirigida a la creación de una red inteligente y la integración de RES para satisfacer la creciente demanda energética. Sin embargo, la

producción de esas fuentes es inestable y dependen de las condiciones climáticas, a la par de que necesita muchos dispositivos electrónicos de potencia. Esta investigación proporcionó un estudio detallado sobre los problemas de calidad de la energía y las técnicas de mitigación, un factor esencial para el desarrollo de MGs. Después de proporcionar una descripción clara de los tipos, componentes, clasificación y configuración de las MGs, este documento analiza las técnicas y los esquemas disponibles para mejorar los problemas de la calidad de la energía en MGs, como la caída de voltaje (LVRT), las elevaciones de voltaje (HVRT), los voltajes y corrientes armónicas, fluctuaciones y desbalances de voltaje en las MGs. Además, se discuten las técnicas y los principales dispositivos utilizados para mitigar los problemas de calidad de la energía en las MGs. Entre los dispositivos utilizados para mitigar los problemas de la calidad de la energía en las MGs, el UPQC y el DVR resultan ser los mejores, seguidos del STATCOM y el SVC. Estos dispositivos se comparan en términos de costo, madurez en el mercado y rendimiento. En general, DVR es superior a SVC y STATCOM en términos de caída y elevación de voltaje, fluctuaciones y desbalances de voltaje mientras que el UPQC es el mejor dispositivo de protección para cargas sensibles de fuentes de baja calidad. La literatura indica que el mejor balance de voltaje se logró mediante el uso de un DVR.

REFERENCIAS

- [1] Global Status Report. (Jun. 22, 2019). *Renewables 2019 Global Status Report-REN21*. Accessed: Feb. 24, 2020. [Online]. Available: <https://www.unenvironment.org/resources/report/renewables-2019-global-status-report>.
- [2] P. K. Ray, et al, “Optimal feature and decision tree-based classification of power quality disturbances in distributed generation systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 200–208, Jan. 2014.
- [3] M. T. L. Gayatri, A. M. Parimi, and A. V. P. Kumar, “Utilization of unified power quality conditioner for voltage sag/swell mitigation in microgrid,” presented at the Biennial Int. Conf. Power Energy Syst., Towards Sustain. Energy (PESTSE), Jan. 2016, pp. 1–6.
- [4] M. M. Hashempour and T.-L. Lee, “Integrated power factor correction and voltage fluctuation mitigation of microgrid using STATCOM,” presented at the IEEE 3rd Int. Future Energy Electron. Conf. ECCE Asia (IFECC-ECCE Asia), 2017, pp. 1215–1219.
- [5] H. S. Thahaand, “Reduction of power quality issues in micro-grid using fuzzy logic-based DVR,” *Int. J. Appl. Eng.*, vol. 13, pp. 9746–9751, 2018.
- [6] P. C. Loureiro, A. M. Variz, L. W. de Oliveira, Â. R. Oliveira, and J. L. R. Pereira, “ANN-based SVC tuning for voltage and harmonics control in microgrids,” *J. Control, Autom. Electr. Syst.*, vol. 28, pp. 114–122, 2017.
- [7] S. F. Eilaghi, A. Ahmadian, and M. A. Golkar, “Optimal voltage unbalance compensation in a MG using PSO algorithm,” presented at the IEEE 7th Power India Int. Conf. (PIICON), Nov. 2016, pp. 1–6.
- [8] K. Tantrapon, P. Jirapong, and P. Thararak, “Mitigating microgrid voltage fluctuation using battery energy storage system with improved particle swarm optimization,” *Ener. Rep.*, vol. 6, pp. 724–730, 2020.
- [9] J. Liu, Y. Miura, and T. Ise, “Model-predictive-control-based distributed control scheme for bus voltage unbalance and harmonics compensation in microgrids,” presented at the IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Oct. 2017, pp. 4439–4446.
- [10] M. Farsadi, A. Gara Shahrak, and S. Dabbage Tabrizi, “DVR with fuzzy logic controller and photo-voltaic for improving the operation of wind farm,” presented at the 8th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. (ELECO), Nov. 2013, pp. 191–195.

- [11] J. He, B. Liang, Y. W. Li, and C. Wang, "Simultaneous microgrid voltage and current harmonics compensation using coordinated control of dual interfacing converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 4, pp. 2647–2660, Apr. 2017.
- [12] L. Yang, N. Tai, C. Fan, and Y. Meng, "Energy regulating and fluctuation stabilizing by air source heat pump and battery energy storage system in microgrid," *Renew. Energy*, vol. 95, pp. 202–212, 2016.
- [13] K. S. Rajesh, S. S. Dash, R. Rajagopal, and R. Sridhar, "A review on control of AC microgrid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. 1, pp. 814–819, 2017.
- [14] S. Zuo, A. Davoudi, Y. Song, and F. L. Lewis, "Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 10, pp. 5988–5997, 2016.
- [15] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems—Amendment 1, IEEE Standard 1547, Inst. Elect. Electron. Eng., New York, NY, USA, 2014.
- [16] D. W. Gao, E. Muljadi, T. Tian, M. Miller, and W. Wang, "Comparison of standards and technical requirements of grid-connected wind power plants in China and the United States," Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-5D00-64225, 2016.
- [17] O. Veneri, *Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles*. 1st ed. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 39–64.
- [18] H. Lotfi and A. Khodaei, "AC versus DC microgrid planning," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 296–304, Jan. 2017.
- [19] A. M. E. I. Mohamad and Y. A.-R.-I. Mohamed, "Investigation and assessment of stabilization solutions for DC microgrid with dynamic loads," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5735–5747, Sep. 2019.
- [20] T. Ma, M. H. Cintuglu, and O. A. Mohammed, "Control of a hybrid AC/DC microgrid involving energy storage and pulsed loads," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 1, pp. 567–575, Jan. 2017.
- [21] A. Colet-Subirachs, A. Ruiz-Alvarez, O. Gomis-Bellmunt, F. Alvarez-Cuevas-Figuerola, and A. Sudria-Andreu, "Centralized and distributed active and reactive power control of a utility connected microgrid using IEC61850," *IEEE Syst. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 58–67, Mar. 2012.
- [22] M. R. Aghamohammadi, and H. Abdolahinia, "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded Microgrid," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 54, pp. 325–333, 2014.
- [23] H. Daneshi, and H. Khorashadi-Zadeh, "Microgrid energy management system: A study of reliability and economic issues," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2012.
- [24] C. L. Trujillo, D. Velasco, E. Figueres, and G. Garcera, "Analysis of active islanding detection methods for grid-connected microinverters for renewable energy," *Appl. Energy*, vol. 87, pp. 3591–3605, 2010.
- [25] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island," *Appl. Energy*, vol. 121, pp. 149–158, 2014.
- [26] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management—Part II: System operation, power quality and protection," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 440–451, 2014.
- [27] Y. W. Li, J. He, "Distribution system harmonic compensation methods: An overview of DG-interfacing inverters," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 18–31, Dec. 2014.
- [28] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects," *Appl. Energy*, vol. 222, pp. 1033–1055, Jul. 2018.
- [29] J. Huang and Z. Jiang, "Power quality assessment of different load categories," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 345–351, Dec. 2017.
- [30] W. X. Hu, X. Y. Xiao, and Z. X. Zheng, "Voltage sag/swell waveform analysis method based on multi-dimension characterization," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 14, no. 3, pp. 486–493, Feb. 2020.
- [31] 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," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 3, May 2019.
- [32] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management—Part II: System operation, power quality and protection," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 440–451, 2014.
- [33] 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," presented at the IEEE PES Int. Conf. Expo. Asia (GTD Asia), 2019, pp. 730–734.
- [34] F. M. Cleveland, "IEC 61850-7-420 communications standard for distributed energy resources (DER)" presented at the IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting-Convers. Del. Elect. Ener 21st Century, Jul. 2008, pp. 1–4.
- [35] Y. K. Wu, J. H. Lin, and H. J. Lin, "Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: A review and comparison," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 4, pp. 3205–3216, Jul. 2017.
- [36] Y. J. Kim, "Development and analysis of a sensitivity matrix of a three-phase voltage unbalance factor," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 3192–3195, May 2018.
- [37] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, pp. 797–807, 2012.
- [38] State Grid Corporation of China, "Technical rule for PV power station connected to power grid," Chin. Enterprise Standards, Tech. Rep. GB/T 19964, 2012.
- [39] E. Troester, "New German grid codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid," presented at the 2nd Int. Workshop Concen-trating Photovoltaic Power Plants, Opt. Design, Prod., Grid Connection, 2009, pp. 9–10.
- [40] *Interconnection of Distributed Resources and Electricity Supply Systems*, Canadian Standards Association, Standard CSA C22.3 No. 9-08-R2015.
- [41] F. Ghassemi and M. Perry. (2014). *Review of Voltage Unbalance Limit in the GB Grid Code CC.6.1.5 (b)*. Accessed: Jul. 11, 2020. [Online].
- [42] A. Q. Al-Shetwi and M. Z. Sujod, "Modeling and control of grid-connected photovoltaic power plant with fault ride-through capability," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 140, no. 2, Apr. 2018.
- [43] M. Molinas, J. AreSuul, and T. Undeland, "Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1104–1117, May 2008.
- [44] T.-L. Lee, S.-H. Hu, and Y.-H. Chan, "D-STATCOM with positive-sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration of distributed-generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 1417–1428, Apr. 2013.
- [45] P. Chaudhari, et al, "Design and implementation of STATCOM for reactive power compensation and voltage fluctuation mitigation in microgrid," presented at the IEEE Int. Conf. Signal Process., Informat., Commun. Energy Syst. (SPICES), Feb. 2015, pp. 1–5.
- [46] M. Goyal, B. John, and A. Ghosh, "Harmonic mitigation in an islanded microgrid using a DSTATCOM," presented at the IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), Nov. 2015, pp. 1–5.
- [47] Z. Li, W. Li, and T. Pan, "An optimized compensation strategy of DVR for microgrid voltage sag," *Protection Control Mod. Power Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–8, Jul. 2016.
- [48] E. Fuchs and M. A. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011, pp. 121–166.
- [49] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, "Integration of UPQC for power quality improvement in distributed generation network—A review," presented at the 2nd IEEE PES Int. Conf. Exhib. Innov. Smart Grid Technol., Dec. 2011, pp. 1–5.
- [50] M. D. Singh, R. K. Mehta, and A. K. Singh, "Performance assessment of current source converter based UPQC for power quality improvement with simple control strategies," *J. Elect. Syst.*, vol. 15, pp. 276–290, 2019.