

Methodologies of Energy Management and Control in Microgrid

S. Monesha, S. Ganesh Kumar and M. Rivera

Abstract— Electrical energy consumption has been increasing in recent years which increases the electric power generation. Distributed Generation (DG) have been gaining interest due to its high reliability, high power quality, efficiency, reduced emissions, high security and effective load management. A better way to apply the benefits and potential of DG, microgrid concept has been gaining more attraction. Microgrid is the future Smart Grid, which works as a local energy provider and reduce energy expenses. So the energy consumption must be reduced to improve the efficiency by efficiently using the sources and thus the overall cost can be reduced. Different aspects of microgrid are discussed in this paper. An energy management strategy must be designed to optimize the power exchanged with the grid profile. The conventional energy management system must be improved and re-designed. Brief descriptions about different types of control techniques for microgrid control are provided. Further energy management schemes, future trends and challenges of microgrid are also described.

Keywords— Distributed generation, microgrid, smart grid, energy management, microgrid control.

I. INTRODUCCIÓN

LOS RECURSOS RENOVABLES reducen el impacto ambiental, esto aumenta la penetración de DG en la red. La integración, el control y la programación de los recursos de energía distribuida (por sus siglas en inglés DER) se han investigado en modo conectado a la red y en modo de operación independiente en [1-4]. La integración de DG es un factor desafiante que crea atracción en el campo de Microgrid (MG). La arquitectura MG se discute en [1, 5, 6]. La arquitectura de MG, los desafíos y los problemas se explican claramente en [4]. Las tecnologías de CA y CC en MG se discuten profundamente en [7]. Además, los desafíos en el uso de la potencia de CC se abordan en [8]. En 2017, se utilizó el método de optimización de enjambre de partículas modificado en la microgrid real de la Universidad Federal de Paraíba [9]. La evolución de las camas de prueba de MG en todo el mundo se revisa en [10, 11]. Del mismo modo, se llevan a cabo varios proyectos en todo el mundo sobre el diseño, control, gestión y operación de MG.

Los objetivos del sistema de administración de energía (por sus siglas en inglés EMS) en una MG son minimizar los costos operativos y de combustible de mantenimiento. La gestión de

la energía es importante para regular el voltaje y la frecuencia del sistema. Los sistemas de administración de energía son de vital importancia para la supervisión del control de la adecuada operación del MG

La operación y el control de la MG es una parte desafiante. Los grandes desafíos de la MG son su control y protección. Las diversas estrategias de control para una operación en modo aislado de MG se han investigado en [12]. Diferente estable operación de control y algoritmos de control para la operación estable de MG se discuten en [13-15]. Una estrategia de control mejorada para la gestión de energía con almacenamiento de energía y control de potencia activa PV se discute en [16]. Una visión general de las estrategias de control se discute en [17-19].

Una revisión del control MG basado en el inversor se realiza en [20, 22]. El modelado y la clasificación de las estrategias de control se discuten en [23-26]. Las arquitecturas de control avanzado. Algoritmos para MG inteligentes y la programación integrada se discuten en [27-32]. Los diferentes tipos de métodos de control como: control de caída [33-35], control directo de Lyapunov [36, 37], control predictivo de modelo [38], control de dos grados de libertad más controlador repetitivo e integral proporcional - controlador proporcional más controlador resonante [39], el controlador proporcional más un controlador resonante [40], el controlador basado en el principio del modelo interno [41], el controlador digital [40] y el control basado en la pasividad [43-45] se discuten. Las diversas estrategias de gestión energética se discuten en [46, 47]. La validación experimental del sistema de gestión en tiempo real se da en [48]. Hacer automatizar todo el sistema de red inteligente con comunicación inalámbrica se presenta en [49]. Las posibilidades de utilizar la optimización del enjambre de partículas para la mejora del rendimiento de MG se dan en [50]. Este artículo presenta el estudio de diferentes metodologías de MG EMS y control; Este estudio se realizó con la literatura más reciente en comparación con [1].

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: siguiendo esta sección, el concepto de MG se explica en la Sección II, los factores de motivación para esta encuesta bibliográfica se presentan en la Sección III, los requisitos funcionales de la gestión de MG se dan en la Sección IV. La clasificación de los esquemas de administración de energía se explica en la Sección V, la capa de control de MG se proporciona en la Sección VI, la descripción general de los diferentes tipos de técnicas de control para la operación mejorada de MG se explica en la Sección VII. Los diversos desafíos del control de MG y las tendencias futuras en MG se explican en la Sección VIII y IX. Finalmente, se sacan conclusiones.

Los autores S. Monesha, S. Ganesh Kumar son del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Facultad de Ingeniería de Guindy, Universidad de Anna, Chennai - 600025, India. Los autores se pueden conectar a través de smonesha92@gmail.com y ganeshkumar@annauniv.edu.

El autor Marco Rivera es del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, CHILE, el autor puede ser conectado a través de marcoriv@utalca.cl

Corresponding author: S. Monesha

II. MG CONCEPT

Las MG se definen como los DER integrados y los sistemas de almacenamiento de energía (por sus siglas en inglés ESS) que crean una red que alimenta diferentes cargas distribuidas en una red de bajo voltaje que puede funcionar en modo conectado a la red o en modo independiente [4,6,17, 18]. La arquitectura MG básica se muestra en la figura 1. Se compone de dos fuentes DG, un sistema de almacenamiento de energía, cargas de ac y dc y un vehículo eléctrico híbrido enchufable (por sus siglas en inglés PHEV).

El MG tiene dos autobuses:

- Bus DC: en el que están conectadas las fuentes DG, el dispositivo de almacenamiento y las cargas de DC.
- Bus AC: en el que se conectan las cargas de CA y la red pública.

Otras infraestructuras requeridas por la MG son las siguientes:

- Fuentes de energía renovables / generadores diésel
- Sistemas de conversión de energy
- Líneas de distribución
- Dispositivos de monitoreo e instrumentos
- Controlador adecuado para bajo diferentes modos de operación.

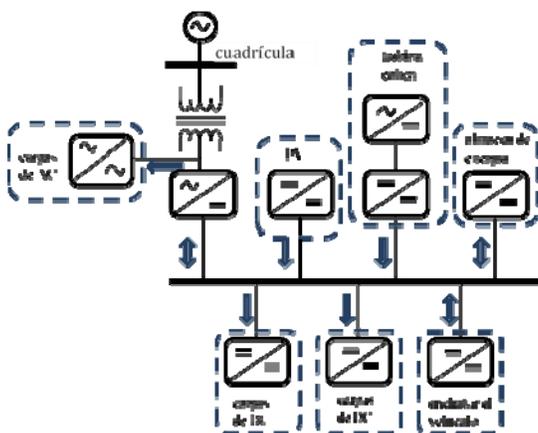


Figura 1. Arquitectura MG básica

La MG debe estar protegida contra fallas del circuito como corrientes de cortocircuito, voltaje alto o bajo excesivo debido a condiciones anormales. Para una protección adecuada, se deben instalar relés de protección para detectar las condiciones anormales y los interruptores de circuito se deben iniciar para aislar la parte en la que se ha producido la falla.

III. MOTIVACIÓN

Los factores de motivación para esta encuesta de literatura se basan en los problemas relacionados con la integración de DER, la operación y el control de MG y se discuten en esta sección [6].

Integración de recursos energéticos distribuidos

La integración exitosa de DER da como resultado una operación mejorada de MG y se relaciona con problemas de calidad de energía que deben tratarse cuidadosamente. Es obligatorio alcanzar valores de voltaje y frecuencia satisfactorios en modo conectado a la red y durante un modo

aislado de MG bajo estado; estable, así como en estado dinámico con total estabilidad operacional. La MG se desconecta de la red principal durante condiciones anormales y cambia del modo conectado a la red a un modo aislado; Se usa para superar la variabilidad e intermitencia [38]. Esto está ganando importancia debido a la reducción de los gases de efecto invernadero, la mejora de la eficiencia del sistema y la fiabilidad.

Operación y control de MG

La mayoría de las tecnologías de fuentes de energía no se pueden conectar directamente con la MG debido a diversas características. El inversor juega un papel importante en la conexión a la red. Los convertidores electrónicos de potencia deben continuar funcionando cuando la red principal no proporcione el voltaje y la frecuencia de la MG, y debe controlarse con DER. La calidad de la potencia también debe mantenerse. Varias técnicas con varios marcos de referencia se discuten en [44].

Las MG están diseñadas para mejorar la auto-sustentabilidad de las redes futuras. MG funciona en modo conectado a la red, o modo independiente que extrae/suministra energía desde/hasta la red. Por lo tanto, se implementa un método de control apropiado para una operación mejorada de la MG de una manera inteligente y coordinada [20, 21, 35].

Se deben considerar los problemas de estabilidad para el funcionamiento correcto de la MG en estado estable y condiciones transitorias. La estabilidad del estado estacionario se refiere al cálculo del límite máximo, y las fluctuaciones repentinas de la carga conducen a la inestabilidad dinámica [30].

IV. REQUISITOS FUNCIONALES DE LA ADMINISTRACIÓN DE MG

Los problemas de diseño del EMS se discuten en esta sección. EMS se utilizan para MGs emergentes. Son requisitos funcionales y desafíos de ingeniería. Un MG EMS se usa para un funcionamiento óptimo al monitorear y controlar los DER y la carga. La información de utilidad y el pronóstico del tiempo se recopilan cuando interactúa con varios DER, cargas y sistema externo. Los siguientes factores son los requisitos funcionales de EMS:

Pronóstico

La previsión es un requisito desafiante en un entorno MG, debido a la intermitencia y variabilidad inherente de DER y la incertidumbre en las cargas controlables. El EMS utiliza los datos históricos y otras entradas para pronosticar los DER, las cargas y el mercado en diferentes escalas de tiempo. Estos datos se utilizan como entrada para la optimización. El pronóstico del tiempo y el pronóstico de energía renovable deben hacerse; Este pronóstico se usa como entrada para la optimización en tiempo real.

Optimización en tiempo real

La optimización en tiempo real es el cerebro del EMS. Asegura la continuidad del suministro de carga y disminuye el costo total de la producción de energía [43]. Se siguen diferentes técnicas de optimización para diferentes

aplicaciones que normalmente se formulan como problemas de optimización no lineal con diferentes objetivos. Se proponen algoritmos extensos para varias funciones, como gestión de energía, respuesta de demanda (por sus siglas en inglés DR), carga EV coordinada y V2G en MG.

Análisis de datos y comunicación

Los datos de DER, cargas y mercado se utilizan para analizar el EMS. El análisis de datos proporciona una mejor comprensión sobre las características de los DER, las cargas y el mercado. Esto se puede utilizar para ajustar el pronóstico y los modelos de optimización para un mejor rendimiento y también se usa para diseñar políticas de control para nuevas aplicaciones.

Además, el operador MG interactúa con los otros módulos en el EMS utilizando la interfaz hombre-máquina (por sus siglas en inglés HMI). La interfaz de comunicación unificada es utilizada por el sistema para administrar los dispositivos sin el conocimiento de los protocolos y las tecnologías utilizadas para lograr la interoperabilidad y la extensibilidad. Una MG consiste en tipos heterogéneos de recursos energéticos. La interacción EMS debe ser interoperable y para interoperar con los sistemas externos fuera de la MG. La información entregada desde el sistema externo debe traducirse a la semántica interna y a los protocolos mediante EMS.

La interfaz de comunicación debe ser extensible para soportar las funcionalidades energizantes. En [52], la infraestructura de medición avanzada está diseñada para mejorar la velocidad de los mensajes.

Sistema de almacenamiento de energía para MG

La capacidad de generación de las micro fuentes es pequeña y requiere principalmente un inversor para convertir la salida adecuada para las especificaciones del sistema de potencia [16, 17]. Además, al utilizar la energía renovable de manera óptima y sin ningún problema, el sistema de almacenamiento de energía debe diseñarse adecuadamente y debe implementarse con la capacidad de operar en amplios rangos de potencia. La capacidad del sistema de almacenamiento de energía depende de las características de la compensación proporcionada en función de la cual se selecciona el tipo y la capacidad del almacenamiento de energía.

V. ESQUEMAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA

Los EMS son muy importantes para el funcionamiento correcto de la MG tanto en el modo conectado a la red como en el modo autónomo. En general, se clasifican como esquemas de comunicación y sin comunicación [23].

Esquema de gestión energética basado en la comunicación

En este esquema, la información del sistema se comunica para determinar el punto de funcionamiento de cada DG en la MG. Se utiliza un método de comunicación apropiado al considerar las distancias de las fuentes de alimentación, el nivel de seguridad, el costo y las tecnologías disponibles, tales como: fibra óptica, microondas, infrarrojos, PLC y/o redes inalámbricas de radio. Se divide en esquemas de gestión

energética centralizados y descentralizados [17, 20].

(i) Esquema centralizado de gestión energética

Este es un EMS de supervisión. En este esquema, un centro de control toma las decisiones para determinar los puntos de funcionamiento de las DG. Se muestra en la Fig. 2. Las señales medidas se reciben y los puntos de operación de las DG se establecen en función de los objetivos y las limitaciones para minimizar el funcionamiento del sistema, los costos de mantenimiento, el impacto ambiental y maximizar la eficiencia del sistema, etc.

Los sistemas de control DG envían las señales de control después de tomar decisiones. Los principales inconvenientes de este esquema son una gran carga de cálculo y fallas de comunicación que pueden colapsar el sistema. Pero, este esquema puede lograr la optimización global.

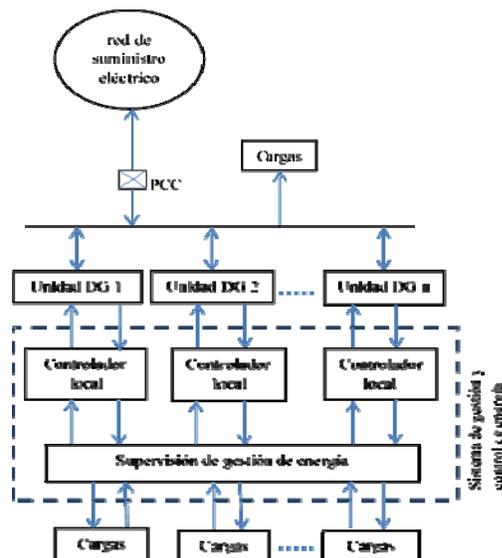


Figura 2. Esquema de administración de energía centralizada

(ii) Esquema de gestión de energía descentralizada

En este esquema, todos los controladores están conectados a través de un bus de comunicación y los datos entre los controladores DG se intercambian utilizando este bus. Todas las cargas también están conectadas con todos los controladores locales; Este EMS se muestra en la Fig. 3.

En este esquema, cada sistema de control local conoce el punto de operación de otros convertidores. Los puntos de funcionamiento de DG se determinan utilizando esta información [28]. En este esquema, se reduce el requisito de computación. Además, se mejora la redundancia y la modularidad del sistema.

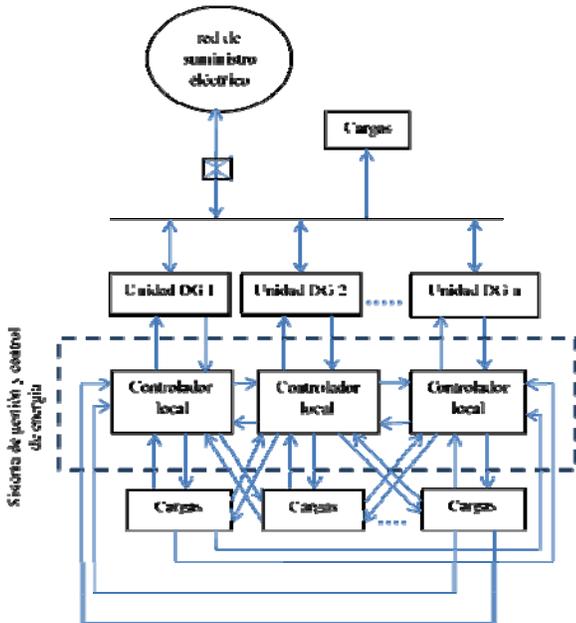


Figura 3. Esquema de gestión de la energía descentralizada

Esquema de gestión de energía sin comunicación

Cuando la comunicación es demasiado difícil o costosa, cada unidad DG debe poder funcionar de manera independiente.

Cada fuente de energía tiene su propio controlador sin tener enlaces de comunicación con los otros controladores como se muestra en la Fig. 4. Las ventajas son que no existe un requisito de comunicación y el sistema de control es expandible y más flexible para cargas lineales y no lineales con diferentes frecuencias de control.

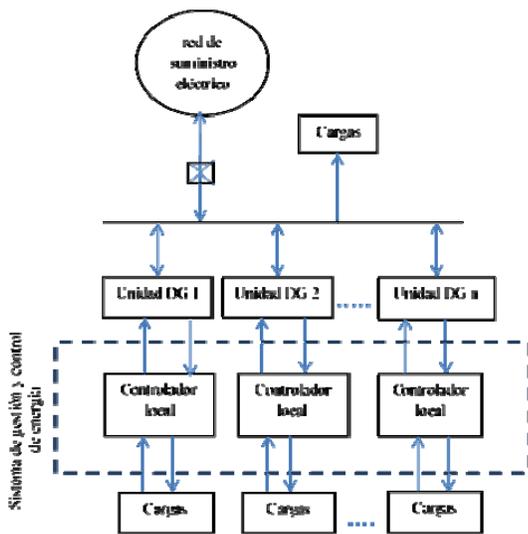


Figura 4. Esquema de gestión de energía sin comunicación

VI. CAPA DE CONTROL MG

Hay tres capas de control para toda la operación de control de la MG [4, 18, 20, 25, 34]. La estructura general del sistema de control MG se muestra en la Fig. 5 y se explica de la siguiente manera:

- *Control principal (nivel de campo):* Es el nivel inferior y contiene el controlador local. Es responsable del control de los DER, la carga local y los sistemas de

almacenamiento que utilizan convertidores de potencia en diferentes modos.

- *Control secundario (nivel de gestión):* Es el control central de MG. Su función principal es la restauración de frecuencia y tensión, el sincronismo entre la microgrid y la red, el deslastre de carga y la optimización de la producción de la microgrid. También se usa para control de calidad de energía, desequilibrio de voltaje y compensación de armónicos.
- *Control terciario (nivel de cuadrícula):* La compra y venta de energía entre los consumidores se facilita en esta área de alta gerencia. La inteligencia para todo el sistema introducido en este nivel está optimizada. Se incorpora un operador de mercado (por sus siglas en inglés MO) en el control del operador de red de distribución (por sus siglas en inglés DNO) que está situado en la red principal. Es responsable del despacho de fiabilidad de emisiones económicas.

VII. VISIÓN GENERAL DE MG CONTROL

Las estrategias de control de MG están destinadas a lograr un funcionamiento eficiente y estable durante la conexión a la red y en los modos aislados. La conversión de energía monofásica en DG con una configuración de control adecuada [39] hace que todo el sistema sea más flexible para funcionar en modo aislado. Los modos de operación y el tipo de carga (lineal o no lineal) desempeñan un papel vital en el diseño de un controlador que hace que MG opere en modo aislado o modo normal [53]. Esta sección discute los diferentes tipos de paradigmas de control.

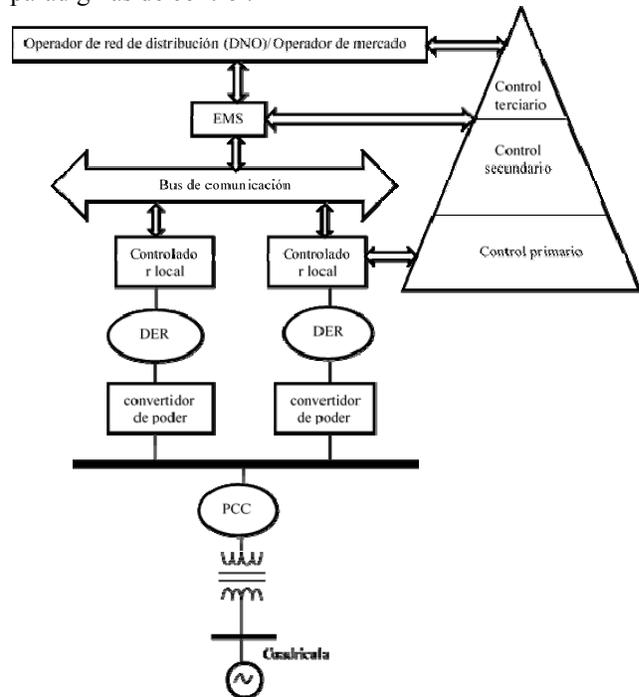


Figure 5. Estructura general de un sistema de control MG

Control de flujo de potencia por regulación actual

En este método, las potencias reales y reactivas se controlan usando el marco d-q [29]. Con este método, se logra una mejor respuesta dinámica. Esto se usa principalmente en modo conectado a la red, así como en un modo aislado.

Control de flujo de potencia por regulación de voltaje

Este control se realiza en función del voltaje de salida DG. El flujo de potencia real se regula utilizando el ángulo de fase de voltaje (δ). El flujo de potencia reactiva puede ser regulado por $V_l - V_g$, donde V_l es la tensión DG, V_g es el punto de la tensión de acoplamiento común (por sus siglas en inglés PCC) y δ es la diferencia de ángulo de fase entre V_l y V_g . El control integral está incluido en el controlador de potencia reactiva para mejorar la precisión del control de potencia reactiva [31]. Esta regulación de voltaje es sensible a la regulación actual.

Control basado en el agente

Los agentes MG se desarrollaron utilizando el Java Agent Development Framework (JADE) y tiene varias funcionalidades. El MGCC incluye un agente de extracción, un agente de base de datos, un agente de control, un agente de desplazamiento y un agente de restricción. El controlador de fuente micro incluye agente generador, agente de programación y agente de oferta. El controlador de carga (por sus siglas en inglés LC) incluye el agente de carga, el agente de estado y el agente de conmutación que están presentes en la plataforma del agente MG. Integra varias funcionalidades y para ser adaptable a la microgrid compleja.

Control distribuido basado en sistemas multi-agente (por sus siglas en inglés MAS)

En este tipo de control, se utiliza la tecnología MAS. Se muestra en la Fig. 6. Se adopta un enfoque totalmente descentralizado utilizando tres niveles de control distinguidos.

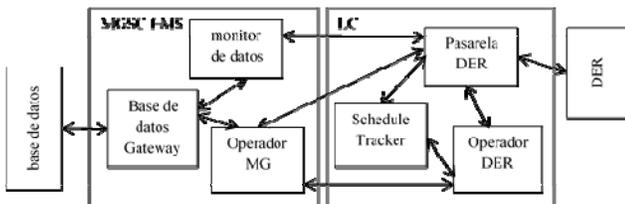


Figura 6. MAS Control [18]

DNO se refiere a las funciones operativas del sistema que es responsable del funcionamiento técnico de las microgrids. MO es responsable de las funciones de mercado del área que están en el nivel de voltaje medio y no pertenecen a la microgrid. La interfaz principal entre DNO/MO y la microgrid es el MGCC, cuya función principal es optimizar la operación de la microgrid y la coordinación de los controladores locales. El LC controla la DG, la producción, el almacenamiento y las cargas locales. Se utiliza para mejorar la solidez, la flexibilidad y la fiabilidad de las MG [20]. Para un diseño de control más complejo, proporciona un rendimiento plug and play.

Control PQ

Proporciona potencia activa y reactiva en un factor de potencia deseado. Un LC o MGCC define los valores de referencia de la potencia y este esquema de control puede implementarse como una fuente de corriente controlada por voltaje o una fuente de tensión controlada por corriente [2, 12].

Control VSI

El inversor se controla para alimentar la carga con valores predefinidos de voltaje y frecuencia. Este esquema se muestra en la Fig. 7. En este control, el inversor emula el comportamiento de la máquina síncrona [12]. También es posible incorporar el mismo esquema para el control de frecuencia en microgrid inteligentes [51]. Las caídas de potencia activa determinan la frecuencia de la tensión de salida 'f' y la caída de la potencia reactiva determina la magnitud del voltaje [33].

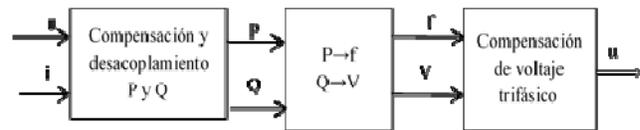


Figura 7. Estructura general de un sistema de control MG

Peer to Peer control

Este control se usa cuando el sistema tiene el mismo estado de control de todos los DGS utilizados. Incluso si hay alguna pérdida de componente / DG, este control permite la operación continua de la MG, aunque no haya un controlador maestro. Mejora la confiabilidad del sistema y, por lo tanto, el costo se reduce.

Control de caída

El uso compartido de potencia activo y reactivo se realiza utilizando el control de caída de P-f y el control de caída de Q-V. El intercambio de potencia reactiva depende de la impedancia de la línea de potencia, en un modo aislado. La impedancia de línea de transmisión equivalente podría ser desigual debido a las diferentes distancias entre los convertidores de interfaz DER. El control de caída Q-V supera el efecto de la impedancia de línea en el flujo de potencia reactiva [33]. Se utiliza para mejorar la cooperación entre los inversores electrónicos de potencia para mejorar la regulación de voltaje y el despacho de carga.

Diseño de control basado en la función de transferencia

Este diseño de control se adopta desde el enfoque clásico de control de retroalimentación. En este control, un PLL trifásico proporciona el ángulo de referencia. La componente de voltaje de carga 'q' se ajusta a cero y la componente 'd' se regula al valor deseado comparando con la señal de referencia y la señal de error se entrega al controlador.

Control directo de Lyapunov (por sus siglas en inglés DLC)

El control directo de Lyapunov se muestra en la figura 8, que proporciona una región estable para el funcionamiento de las DG. Durante la integración de la red, DLC proporciona un funcionamiento estable mediante la inyección continua de la potencia activa máxima a la frecuencia fundamental desde las fuentes DG a la red, compensando toda la potencia reactiva y los componentes de corriente armónica de las cargas no lineales [15, 36, 37]. Este método asegura la estabilidad asintótica global para las unidades DG.

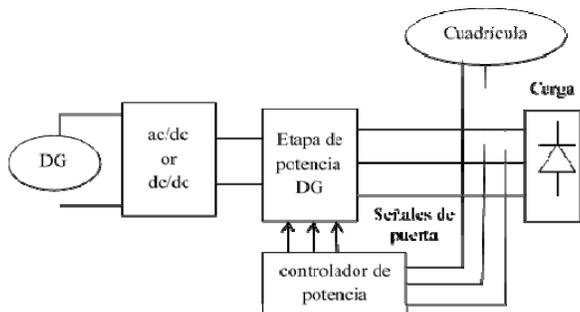


Figura 8. Control DLC

Control adaptativo de poder compartido

Esta técnica se usa para mejorar la estabilidad de múltiples unidades DG basadas en un inversor conectado en paralelo en MG a diferentes cargas compartidas. Esto se hace combinando las características de caída estáticas con una función de caída transitoria adaptativa para amortiguar las fluctuaciones del reparto de potencia en las unidades DG [35].

Control basado en la pasividad (por sus siglas en inglés PBC)

Este control se usa para el funcionamiento estabilizado de las unidades DG durante la integración y el reparto de potencia con cargas y/o red eléctrica. Este control proporciona compensación de corriente activa, reactiva y armónica de cargas en modo conectado a la red. Majid Mehrasa et al., Implementaron una metodología de inyección de amortiguación de conformación de energía para la operación estable de MG que implica el cálculo de estado [31, 33] y se muestra en la Fig. 9.

Modelo Predictive Control (por sus siglas en inglés MPC)

Este control se basa en la optimización del comportamiento del sistema en el futuro. La energía se produce de acuerdo con la demanda de energía como valores de predicción futuros que se utilizan para el control [43, 44].

Control jerárquico

Requiere un controlador centralizado para lograr una compensación de voltaje igual para evitar el desequilibrio en la distribución de corriente.

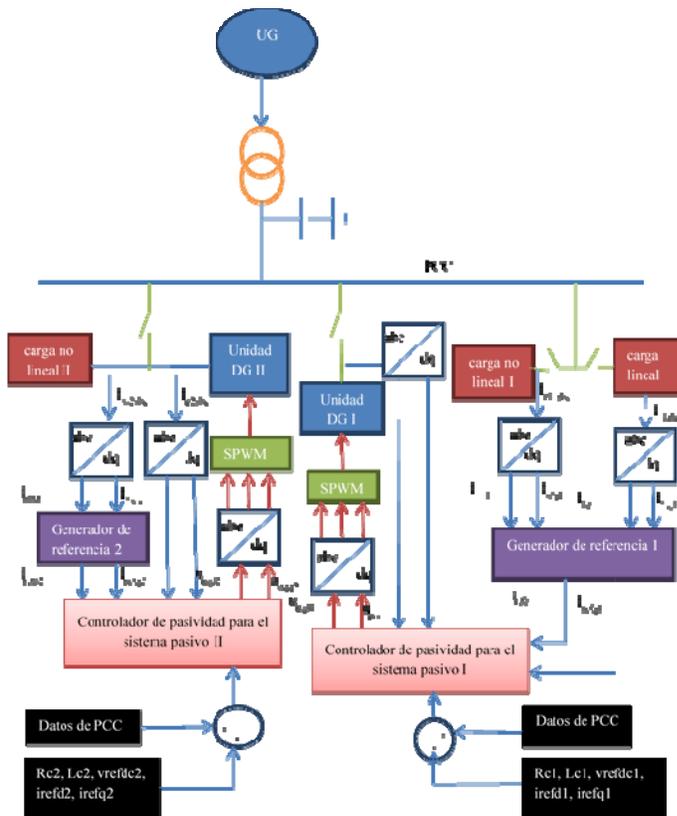


Figura 9. Control de PBC

Control promedio de uso compartido actual

Para mejorar la confiabilidad del sistema y la tolerancia contra fallas, la compensación de voltaje se realiza en base a la configuración distribuida [49].

VIII. DESAFÍOS DE LOS CONTROLES MG

Habrà un aumento significativo en las instalaciones de MG y la integración en los sistemas de distribución de BT en el futuro. Por lo tanto, los sistemas de distribución serán más significativos con más número de MG y difieren en las características de los sistemas de distribución convencionales actuales para los cuales se debe diseñar estrategias de control adecuadas para anticipar la diferencia.

El objetivo de los controles MG es optimizar la producción y el consumo de calor, gas y electricidad para mejorar la eficiencia general. Existe la posibilidad de requisitos contradictorios y comunicación limitada para controlar un gran número de RES a pequeña escala con diferentes características que serán un desafío. Cuando se trata de cargas lineales y no lineales en la misma conexión de bus en condiciones normales y en isla, los modos de conexión de bus y distribución de electricidad serán críticos.

La parte desafiante en el controlador descentralizado o centralizado es la acción de control requerida con pérdida de parámetros de entrada. Pueden producirse grandes desajustes entre la generación y las cargas durante las transiciones del modo conectado a la red a un modo aislado, lo que causa problemas severos de frecuencia y control de voltaje. El proceso de conexión y desconexión implica una mayor cantidad de micro fuentes al mismo tiempo. Por lo tanto, la

capacidad de "enchufar y usar" crea un problema grave. Operar en la misma frecuencia de control para diferentes tipos de cargas es típico y mantener la estabilidad en dicho sistema durante la operación se vuelve más crítico y bastante desafiante.

IX. FUTURAS TENDENCIAS

El desarrollo de convertidores de potencia sigue siendo un desafío; el análisis de estos se realiza, pero no se ha estudiado a fondo en escenarios MG. La capacidad plug-and-play debe ser estudiada. La modularización de los convertidores de potencia debe incluirse en el proceso de diseño para mejorar el rendimiento. Se debe realizar más investigación en potencia reactiva compartida, desviaciones de frecuencia y voltaje. Múltiples técnicas de control de gestión MG deben mejorarse para mejorar la eficiencia, la fiabilidad y el análisis de estabilidad. También se deben desarrollar estudios en estrategias de gestión energética para controlar el flujo de energía.

X. CONCLUSIÓN

MG reduce la dependencia de combustibles fósiles, aumenta la eficiencia general, la fiabilidad y la calidad de la energía de la red eléctrica. Los aspectos importantes de MG son la integración de la red y los esquemas de gestión de energía para una operación adecuada. Se revisó una descripción general del control de MG y diferentes esquemas de administración de energía para un funcionamiento mejorado y estable de la MG y la optimización del uso de recursos de energía renovable. Los desafíos del control de MG y las tendencias futuras de la MG también se discutieron en este documento.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y al Centro de Asuntos Internacionales de la Universidad de Anna, India, por el apoyo financiero. Además, los autores reconocen el apoyo financiero de Fondecyt Regular 1160690.

REFERENCIAS

- [1] S. Monisha, S. Ganesh Kumar, M. Rivera. Microgrid Energy Management and Control: Technical Review. *2016 IEEE Conf. on Automatica (ICA-ACCA)*. pp. 1-7, 2016.
- [2] P Basak, S, Chowdhury, S, Halder nee Dey and S.P, Chowdhury. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol.16, pp. 5545-5556, 2012.
- [3] Q. Jiang, M. Xue and G. Geng. Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes. *IEEE Trans. On Power Systems*. Vol. 28, no. 3, pp. 3380-3389, Aug 2013.
- [4] Nikos Hatzigiorgi. *Microgrids Architectures and Control*. IEEE press, wiley, 2014.
- [5] H. Jaiyi, J. Chuanwen and XuRong. A review on distributed energy resources and microgrid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol.12, pp. 2472-2483, 2008.
- [6] Robert H. Lassester. Microgrids and Distributed Generation. *Journal of Energy Engineering, American Society of Civil Engineers*. Sept 2007.
- [7] E. Planas, Jon Andreu, J.I. Garate and I. M. de Algeria, Edorta. AC and DC technologies in microgrids: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol.43, pp. 726-749, 2015.
- [8] P. Silva and C. Marques de Sa Medeiros. A Promising Future To DC Power System: A Review. *IEEE Latin America Trans.* vol. 15, no. 9, pp. 1639-1642, 2017.
- [9] J. Silva de Souza, Y. Percy Molina, C. Silva de Araujo, W. Pereira de Farias and I. Santos de Araujo. Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Sizing Photovoltaic System. *IEEE Latin America Trans.* vol. 15, no. 2, pp. 283-289, Feb. 2017.
- [10] E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir and R. Perez. Microgrid testbeds around the world. *Energy Convers Manage.* vol. 86, pp. 132-153, 2014.
- [11] T.S. Ustun, C. Ozansoy and A. Zayegh. Recent developments in microgrids and example cases around the world-A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol.15, pp. 4030-4041, 2011.
- [12] J.A.Pecas Lopes, C. L. Moreira and A. G. Madureira. Defining Control Strategies for Microgrids Islanded Operation. *IEEE Trans. On Power Systems* Vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [13] M. Mehraza, E. Pouresmaeil and J. P. S. Catalao. A Multifunction Control Strategy for the Stable operation of DG units in Smart Grids. *IEEE Trans. On Smart Grid.* vol. 6, no. 2, pp. 598-607, Mar. 2015.
- [14] E. Pouresmaeil, M. Mehraza, O. Erdinc and J.P.S. Catalao. A Control Algorithm for the stable operation of interfaced converters in microgrid systems. *5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*. pp. 1-6, Oct 2014.
- [15] M. Mehraza, E. Pouresmaeil and MA Shokridehaki. Stability Analysis for Operation of DG Units in Smart Grids. *IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2015, pp. 447-452.
- [16] D. Stimoniaris, D. Tsiamitros and E. Dialynas. Improved energy storage management and PV- Active power control infrastructure and strategies for microgrids. *IEEE Trans. On Power Systems*. vol. 31, no. 1, pp. 813-820, Jan 2016.
- [17] R. Zamora and A.K. Srivastava. Controls for microgrids with storage: Review, challenges and research needs. *Renew. And Sustain. Energy Reviews*. vol 14, 2009-2018, 2010.
- [18] M.N. Ahmed, M. Hojabri, A.M. Humada, H.B. Daniyal and H.F. Frayyeh. An overview on microgrid control strategies. *International J. of Engineering and Advanced Tech.* vol. 4, no. 5, pp. 93-98, June 2015.
- [19] C. Ahumada, R. Cardenas, D. Saez and J.M. Guerrero. Secondary control strategies for frequency restoration in islanded microgrids with consideration of communication delays. *IEEE Trans. On Smart Grid.* Vol. 7, no. 3, pp. 1430-1441, May 2016.
- [20] L. Meng, E.R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, Juan C. Vasquez and Josep M. Guerrero. Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 60, pp. 1263-1273, July 2016.
- [21] M. Mehraza, E. Pouresmaeil, H. Mehrjerdi, Bo NørregaardJørgensen, João P.S. Catalão. Control technique for enhancing the stable operation of distributed generation units within a microgrid. *Energy Convers. Manage.* vol. 97, pp. 362-373, 2015.
- [22] M. Mehraza, M EbrahimAdabi, EdrisPouresmaeil, JafarAdabi. Passivity- based control technique for integration of DG sources into the powergrid., *Electrical Power and Energy Systems*. vol. 68, pp. 281-290, 2014.

- [23] L.Olatomiwa, S. Mekhilef, M.S.Ismail and M.Moghavvemi. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 62, pp. 821-835 2016.
- [24] M. R. Miveh, M. F. Rahmat, A. A. Ghadimi and M. W. Mustafa. Control techniques for three-phase four-leg voltage source inverters in autonomous microgrids: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 54, pp. 1592-1610, Feb 2016.
- [25] Il-Yop Chung, W. Liu, D.A. Cartes, E. G. Collins and Seung-II Moon. Control Methods of Inverter-Interfaced distributed generators in a microgrid system. *IEEE Trans. On Indus. Apps.* Vol. 46, no. 3, pp. 1078-1088, May/June 2010.
- [26] A.Khorsandi, M. Ashourloo, H. Mokhtari and R.Iravani,. Automatic droop control for a low voltage dc microgrid. *IEEE Trans. IET Generation, Trans., Distribution.* Vol. 10, no. 1, pp. 41-47, Jan 2016.
- [27] Yunwei LI. Overview of control, integration and energy management of microgrids. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy.* vol. 2, no.3, pp. 212-222, 2014.
- [28] J.P. Torreglosa, P.Gracia-Trivino and L.M. Fernandez-Ramirez. Control strategies for DC networks: A systematic literature review. *Renew. Sustain. Energy Reviews.* vol.58, pp. 319-330, 2016.
- [29] Palizban O, Kauhaniemi K, Guerrero JM. Microgrids in active network management – Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. *Renew. Sustain. Energy Reviews.* vol 36, 428-439, 2014.
- [30] E Unamuno and JA Barrena. Hybrid ac/dc microgrids-Part II: Review and classification of control strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol. 53, pp. 1123-1134, 2015.
- [31] M. Marzband, A. Sumper, JL. Dominguez-Garcia and R. Gumara-Ferret. Experimental validation of a real time energy management system for microgrids in islanded mode using a local day-ahead electricity market and MINLP. *Energy Convers Manage.* vol. 76, pp. 314-322, 2013.
- [32] M.S. Mahumoud, S. AzherHussain and M.A. Abido,. Modeling and control of microgrid. *Journal of the Franklin Institute.* vol. 351, pp. 2822-2859, 2014.
- [33] Yun Wei Li and Ching-Nan Kao. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid. *IEEE Trans. On Power Electronics.* vol. 24, no 12, pp. 2977-2988, Dec 2009.
- [34] J.M. Guerrero, M. Chandorkar, Tzung-Lin Lee and P.C. Loh. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part I: Decentralized and Hierarchical control. *IEEE Trans. On Indus. Electrons.* Vol. 60, no. 4, pp. 1254-1262, Apr 2013.
- [35] Koohi-Kamali S, Rahim NA and Mokhlis H. Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load. *Energy Convers Manage.* vol.84, pp. 562-582, 2014.
- [36] J.M. Guerrero, P.C. Loh, Tzung-Lin Lee and M. Chandorkar. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids. *IEEE Trans on Indus. Electronics.* vol. 60, no. 4, pp. 1263-1270, Apr 2013.
- [37] A.Mehrizi-Sani and R. Iravani. Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes. *IEEE Trans. On Power Systems.* vol. 25, no. 4, pp. 1883-1891, Nov 2010.
- [38] M. Mazidi, A. Zakariazadeh, S. Jadid and P. Siano. Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in microgrid. *Energy Convers. Manage.* vol. 86, pp. 1118-1127, 2014.
- [39] I R. Ortega, O. Carranza, J. C. Sosa, V. Garcia and A. González. Application Control Configurations for Parallel Connection of Single-phase Energy Conversion Units Operating in Island Mode. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 14, No. 2, 694-703, Feb 2016.
- [40] J. A. M. Roque, R. O. González, J. J. R. Rivas, O. C. Castillo, and R. M. Caporal. Design of a New Controller for an Inverter Operation in Transitional Regime Within a Microgrid. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 14, No. 12, 4724-4732, Dec 2016.
- [41] R. E. Carballo, R. O. Núñez, V. H. Kurtz and F. Botterón. Design and Implementation of a Three-Phase DC-AC Converter for Microgrids Based on Renewable Energy Sources. . *IEEE Latin America Trans.* vol. 11, no. 1, pp. 112-118, Feb. 2013.
- [42] F. Botterón, R. E. Carballo, R. O. Núñez, A. P. Quintana and G. A. Fernández, High Reliability and Performance PWM Inverter for Standalone Microgrids. . *IEEE Latin America Trans.* vol. 11, no. 13, pp. 505-511, Feb. 2013.
- [43] N. Yang, D. Paire, F. Gao, A. Miraoui and W. Liu. Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve voltage regulation and load sharing. *Electrical Power and Energy Systems.* vol. 64, pp. 752-760, 2015.
- [44] N. Rezaei, and M. Kalantar. Smart microgrid hierarchical frequency control ancillary service provision based on virtual inertia concept: An integrated demand response and droop controlled distributed generation framework. *Energy Convers. Manage.* vol. 92, pp. 287-301, 2015
- [45] Y.A.R.I. Mohamed and F. Ei-Saadany. Adaptive Decentralized Droop Controller to Preserve Power Sharing Stability of Paralleled Inverters in Distributed Generation Microgrids. *IEEE Trans. on Power Electronics.* vol. 23, no. 6, pp. 2806-2816, Nov 2008.
- [46] M. Mehraza, E. Poursmaeil and J. P. S. Catalao. Direct Lyapunov Control Technique of Multilevel Converter-Based Distributed Generation in Power Grid. *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.* vol. 2, no. 4, pp. 931-941, Dec. 2014.
- [47] S. Daspupta, S.N. Mohan, S.K. Sahoo and S.K. Panda,. Lyapunov Function-Based current controller to control active and reactive power flow from a renewable energy source to a generalized three-phase microgrid system. *IEEE Trans on Indus. Electronics.* vol. 60, no. 2, pp. 799-813, Feb 2013.
- [48] .L. Valverde, C. Bordons and F.Rosa. Power management using model predictive control In a hydrogen-based microgrid. *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.* vol. 22, no. 5, pp. 5669-5676, 2012.
- [49] J. A. Dias, P. J. A. Serni, A. M. Bueno and E. P. Godoy. Study of Communication Between Distributed Generation Devices in an Smart Grid Environment. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 16, No. 3, 777-784, March 2018.
- [50] C. Marcelino, M. Baumann, P. Almeida and E. Wanner e M. Weil. A New Model for Optimization of Hybrid Microgrids Using an Evolutionary Approach,. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 16, No. 3, 799-805, March 2018.
- [51] P. F. Frack, M. Martinez, M. G. Molina, and P. E. Mercado. Emulation of Synchronous Generator for Frequency Control of Smart Microgrids. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 11, No. 1, 486-491, Feb 2013.
- [52] Y. Lopes, D. C. M. Saade, C. V. N. Albuquerque, N. C. Fernandes and M. Z. Fortes. Quality of Service for Wireless Network Implementation in Advanced Metering Infrastructure. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 15, No. 10, 1875-1880, Oct 2017.

- [53] R. Ortega, J. Sosa, O. Carranza and V. García. Comparison Controllers for Inverter Operating in Island Mode in Microgrids with Linear and Nonlinear Loads. *IEEE Latin America Trans.* Vol. 12, No. 8, 1441-1448, Dec 2014.



S. Monesha nació el 2 de abril de 1992 en India. Ella completó su B.E. y títulos de M.E. del Instituto de Tecnología Panimalar, Chennai, India y el Colegio de Ingeniería del Gobierno, Tirunelveli, India en 2013 y 2015, respectivamente. Ella actualmente está persiguiendo Ph.D. en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

en Anna University, Chennai. Sus intereses de investigación son el control y la protección de la microgrid.



S. Ganesh Kumar nació el 25 de mayo de 1977 en la India. Completó su B.E., M.E. y Ph.D. grados de la Universidad de Madras y la Universidad de Anna en 1998, 2005 y 2014, respectivamente. Actualmente trabaja en Anna University, Chennai como Profesor Asistente en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus áreas de interés son Máquinas Eléctricas y Accionamientos.



Marco Rivera (S'09 - M'11) recibió su B.Sc. en Ingeniería Electrónica y M.Sc. en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción, Chile en 2007 y 2008, respectivamente. Recibió su Ph.D. Diplomado en el Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), en Valparaíso, Chile, en 2011. Actualmente es Profesor Asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la

Universidad de Talca, Curicó, Chile. Sus principales áreas de investigación son el control digital aplicado a la electrónica de potencia, convertidores matriciales, control predictivo y control de convertidores de potencia para aplicaciones de energía renovable.