

MICRORREDES BASADAS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA: CARACTERÍSTICAS, OPERACIÓN Y ESTABILIDAD

Ricardo David Medina¹

Resumen

Desde mediados de la década de los setenta y a raíz de la crisis del petróleo se ha buscado diversificar las fuentes energéticas y desvincular la economía mundial del uso de combustibles fósiles. En la actualidad, el desarrollo de tecnologías para aprovechar fuentes energéticas alternativas, el aumento en la capacidad de almacenamiento a pequeña escala y la facilidad para comunicar estos equipos con la red han iniciado una transformación de la red eléctrica, llevándola al concepto de red inteligente (*Smart Grid*). El paso intermedio en esta transición es la creación de áreas de red que cuenten con la “inteligencia” para vincular a la red generación y almacenamiento distribuidos y a su vez mantenga el suministro con altos estándares de calidad y confiabilidad a precios razonablemente bajos; estas secciones de la red son denominadas microrredes. Otra característica novedosa de las estas es la posibilidad de participación en un mercado energético agrupando toda su demanda y su generación como una “unidad virtual” frente a la red, e interactuar como un agente de mercado. Este trabajo presenta una breve introducción y brinda una visión general del uso de tecnologías para la seguridad, operación, gestión y control de microrredes.

Palabras clave: Microrredes, electrónica de potencia, generación distribuida, redes inteligentes, sistemas multiagente.

Abstract

Since the mid-70s and following the oil crisis, much research has been developed in order to diversify energy sources and decoupling the world economy from fossil fuels. At present, the development of technologies to harness alternative energies, the increased of small-scale storage systems and communication technologies to link and command these elements have begun a transformation of the electricity grid, introducing the concept of intelligent grid (*Smart Grid*). The intermediate step in this transition is to create areas of the grid that have the "intelligence" to link distributed storage and generation to the grid, keeping high standards of quality and reliability at reasonably low prices; these sections of the grid are called micro-grids, a novel feature of the micro-grids is the possibility to participate in the energy market, as a "virtual unit" grouping all their demand and generation to interact with the market. This paper presents a brief introduction about micro-grids and provides an overview of the use of technologies for security, operation, management and its control.

Keywords: Micro-grid, power electronic, distributed generation, smart-grids, multiagent system.

¹Ingeniero eléctrico, candidato al grado de Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional de San Juan Argentina, investigador en el proyecto “Gestión de Activos Físicos” en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan-Argentina; actualmente, investigador invitado en el Instituto de Alta Tensión de la RWTH – Aachen University en Aquisgrán-Alemania. Autor para correspondencia ✉: ricardomedinav@gmail.com

Recibido: 10-09-2014, Aprobado tras revisión: 13-10-2014

Forma sugerida de citación: Medina, R. (2014). “Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad”. INGENIUS. N.º 12, (Julio-Diciembre). pp. 15-23. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Históricamente la producción de electricidad se ha basado en la generación a gran escala ubicada cerca de la fuente primaria de energía; este modelo presenta múltiples beneficios basados en la economía de escalas, sobre todo si las centrales de generación forman parte de un modelo verticalmente integrado, es decir, en ausencia de mercado [1].

Lamentablemente este esquema muestra algunas desventajas técnicas ya que las “grandes centrales”, por lo general, están muy alejadas de los centros de consumo y el transporte de esos volúmenes de energía implica una gran infraestructura y altas pérdidas. Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) modernos se caracterizan por su alta complejidad y expansión constante tanto geográficamente como en su potencia; paralelo al aumento de la demanda servida por los SEP, las cargas incrementan sus requerimientos en cuanto a la calidad del servicio [2].

Décadas atrás, los SEP se sobredimensionaban lo cual permitía mantener holgadamente los criterios de seguridad y calidad; en la actualidad, se realizan diseños más cercanos a los puntos de trabajo real y se procura evitar un sobredimensionamiento tanto de redes como de subestaciones, esto solo por aspectos económicos; por lo tanto, los SEP se ven sometidos continuamente a estrés y a trabajar cada vez más cerca de sus límites físicos, ante esta perspectiva se han buscado opciones para evitar la congestión de las redes. Una alternativa lógica es colocar generación cerca de la demanda.

La reducción de los costos de las tecnologías de energías renovables y los marcos regulatorios favorables han dado paso a que cada vez más usuarios opten por instalar microgeneradores; este proceso está transformando las redes eléctricas en el mundo entero, ya se habla de que la red debe tender a ser inteligente, la transición entre la red tradicional y la red inteligente (*Smart Grid*) se da mediante la implementación de las microrredes (MR) [3].

Este artículo presenta una introducción a las MR, en el apartado 2 se explicarán los principios del funcionamiento de una MR: sus características y elementos constituyentes; en el apartado 3 se revisarán los criterios de operación y seguridad de las MR. Al final se presentarán las conclusiones y la bibliografía citada.

2. Microrredes

Una microrred (MR) comprende una porción de la red de distribución (generalmente en baja tensión), ubicada a continuación de una subestación que contiene un conjunto de cargas de energía eléctrica y/o calor, generación distribuida (GD) de distintos tipos,

sistemas de almacenamiento distribuido (AD) con características y capacidades distintas [4].

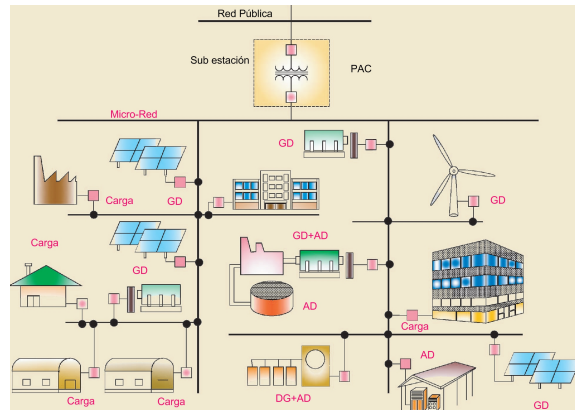


Figura 1. Estructura básica de una microrred [4].

El punto de conexión a la red de distribución se denomina punto de acoplamiento común (PAC) [5], este elemento de conexión debe permitir una transición suave entre los modos “conectado” – “desconectado”, además de permitir la sincronización en el momento de la reconexión a la red de distribución. La microrred puede también trabajar de manera aislada de la red en el caso de regiones a las cuales el sistema de transmisión no pueda llegar, este modo se denomina modo aislado [4].

En general la microrred genera electricidad para abastecer sus requerimientos, algunas tecnologías de generación producen calor como residuo; por ejemplo, en el caso de las turbinas el vapor de su salida puede emplearse para calefacción creando un circuito de calor lo cual aumenta la eficiencia del conjunto.

El desarrollo de tecnologías de estado sólido, la mejora de la confiabilidad de las comunicaciones y el incremento de la capacidad de los medios de almacenamiento han llevado a considerar a las microrredes como el siguiente paso en la evolución de los sistemas eléctricos de potencia [3], [6].

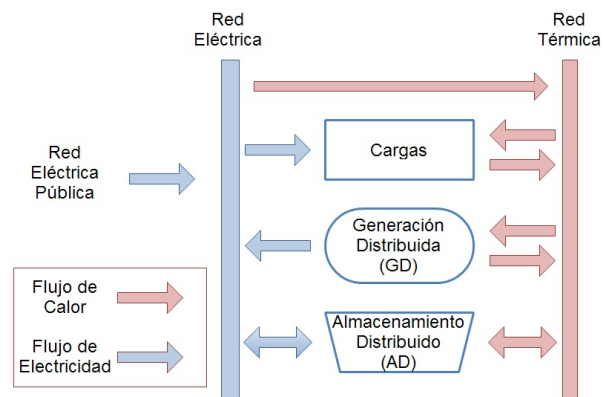


Figura 2. Esquema general de una microrred [4].

2.1. Ventajas / oportunidades / beneficios

- a) *Oferta de regulación primaria, secundaria, servicios complementarios a la red*

La MR puede considerarse una unidad de generación que se comporta como una central convencional, brindando servicios a la red a la que se halla conectada, estos servicios deben también ser liquidados a la MR [7], [8], [9], [10].

- b) *Autonomía*

Las MR permiten abastecer las cargas conectadas en su área de cobertura durante los períodos en los cuales la red no pueda hacerlo.

- c) *Calidad de energía*

Los usuarios conectados a la MR reciben una mayor calidad en el servicio al mejorar la continuidad y disponibilidad de la energía, reduciendo la energía no suministrada e incrementando la calidad de la forma de la onda.

- d) *Compatibilidad y escalabilidad*

La MR permite la entrada de diversos tipos de generación en la red, esto además de aumentar la energía disponible amplía la matriz energética permitiendo mayor confiabilidad y continuidad en la generación.

- e) *Eficiencia*

Se reducen las pérdidas de transmisión, se optimiza el uso de la red existente, además, al utilizar fuentes de energía disponibles en las zonas el consumo de energía primaria es menor. Por otra parte, las unidades pueden también producir como subproducto calor o vapor, que al localizarse cerca de los consumos puede ser utilizado en aplicaciones residenciales, industriales o comerciales.

2.2. Barreras / retos / nuevos desarrollos necesarios para la implementación

- a) *Regulatorias*

Las MR requieren un marco legal para poder participar del mercado en el cual se conectan ya que pueden ofrecer servicios a la red.

- b) *Descoordinación de protecciones del sistema*

La MR tiene un circuito equivalente distinto cuando se encuentra en modo conectado o desconectado de la red, el cambio básico radica en la potencia de cortocircuito, además, la ubicación de generación en medio de los ramales secundarios de la red de distribución obliga a que todas las protecciones sean direccionales. Todo esto en conjunto exige adoptar esquemas de protección mucho más complejos.

- c) *Costos, tiempos de recuperación de la inversión*

El sistema completo de MR requiere un conjunto de elementos y equipos de adquisición, procesamiento y comunicación de la información lo cual eleva los costos de implementación.

El precio de la generación con fuentes alternativas es relativamente alto, lo cual ofrece un panorama desalentador para las inversiones, esta situación puede ser evitada con incentivos de los Gobiernos u organismos internacionales, sin estos alicientes las MR tendrán un desarrollo mucho más lento [11].

- d) *Comunicación entre agentes² de la red*

La comunicación entre los agentes de la MR es parte fundamental del proceso de operación ya que las acciones de control se toman en tiempo real y en función de las mediciones de la red, este proceso sería imposible si no existiese un sistema rápido y confiable de comunicaciones.

Actualmente, la fibra óptica es la opción más práctica por su confiabilidad y velocidad, pero por su costo sigue siendo una opción secundaria frente a otras alternativas más económicas como por ejemplo, la comunicación por los mismos cables de la red usando *Power Line Communication* [12].

- e) *Estandarización de equipos y ontologías*

La MR es un concepto novedoso y se desarrolla en paralelo en varios centros de investigación a lo largo del mundo, por lo tanto, cada equipo de investigación utiliza las diversas herramientas que desembocan en una gran cantidad de formatos, normas y requerimientos en los equipos que a la postre terminarán complicando la unificación de estándares; la FIPA es una alternativa de estandarización de la IEEE.

Otro inconveniente que se presenta es la comunicación de los agentes de red al tener que intercambiar mucha información, es necesario establecer comunicaciones muy complejas [13], esta complejidad puede llevar a un problema en la intercomunicación entre MR que manejen lenguajes distintos.

2.3. Objetivos de una microrred

La microrred está planteada como una solución inteligente para incluir y controlar la generación distribuida que alimenta a las cargas locales [14], durante las etapas de diseño y planificación se deben establecer las metas y requerimientos del sistema a implantar, entre ellos se considera:

²Se denomina agente de la microrred a los equipos de generación distribuida, almacenamiento distribuido, cargas controladas, punto común de acople a la red, operador de la red, operador de mercado, controladores de otras microrredes que puede intercambiar información para trabajar de forma cooperativa o competitiva para conseguir metas globales.

- a) Aprovechar las fuentes energéticas disponibles en la zona del emplazamiento.
- b) Servir las cargas de la MR con altos parámetros de calidad y al menor costo posible.
- c) Definir los puntos de interconexión con la red y dotarlos con la capacidad de sincronización.
- d) Establecer contratos con el operador de la red para la compra y venta de energía además de proveer servicios complementarios a la red [6].
- e) Responder dinámica y eficientemente ante los cambios que se presenten en los parámetros del sistema.
- f) Ubicar y dimensionar los sistemas de almacenamiento de energía.

Los sistemas de almacenamiento distribuidos se emplean cuando la generación y consumo de la MR no pueden ser exactamente ajustados [5]. El análisis de este particular excede los límites de esta investigación por lo cual en adelante se asume que tanto la generación y el almacenamiento han sido debidamente calculados y llevados a un punto óptimo en la relación de servicio - costo [15].

2.4. Arquitectura de la microrred

Dentro del planteamiento teórico presentado anteriormente, una microrred consta básicamente de generación distribuida, almacenamiento distribuido y cargas. Todos estos elementos conectados tanto a circuitos de energía eléctrica como circuitos de calor, cada uno de estos elementos de la red es denominado agente.

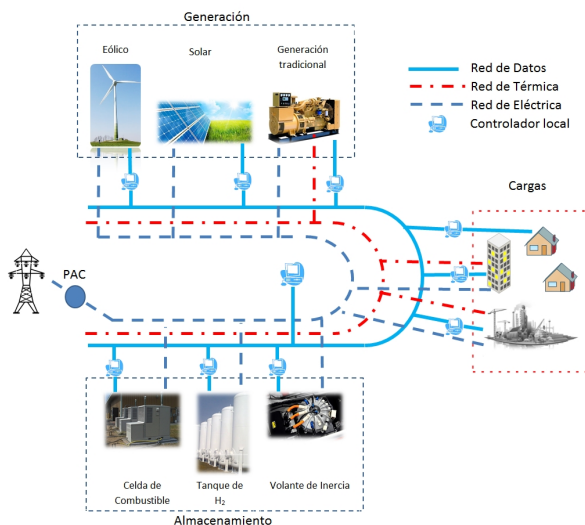


Figura 3. Elementos de una microrred [16].

2.4.1. Generación distribuida

Las redes eléctricas reestructuradas se enfocan en instalar en toda la red un gran número de fuentes de generación distribuida (GD) de pequeña capacidad, de manera que se pueda abastecer la demanda local con la generación embebida en la red [17]; esta configuración permite reducir el estrés sobre el sistema de transmisión, alargando la vida útil de la red y mejorando la continuidad de servicio; en caso de una falla, la GD puede compensar la baja calidad [16], [18], [19]. En esta línea, la generación distribuida consiste en diversos tipos de equipos de pequeña capacidad, generalmente menores a 10 MW [4]. No se debe confundir la generación distribuida con generación con fuentes renovables (FR). La generación puede contener tanto con fuentes renovables y no renovables.

La GD se clasifica en 1) máquinas rotantes y 2) máquinas acopladas electrónicamente [4]; las primeras consisten en generadores tipo diésel, turbinas hidráulicas o eólicas de velocidad controlada; por otro lado, las fuentes electrónicamente acopladas entre las cuales constan de unidades de generación en corriente continua o alterna a frecuencias variables; el acople electrónico permite inyectar la potencia con formas de onda que podrían no necesariamente ser sinusoidales a frecuencia fundamental, esto permite la compensación de distorsiones en la onda de servicio [19], [20].

La GD pueden también clasificarse en función del control que se puede realizar sobre el flujo de potencia; en este criterio se clasifican las unidades como 1) “despachables” y 2) “no despachables” [4]. Dentro del grupo de las despachables se encuentran todas las unidades a las que se puede controlar su fuente primaria de energía, tales como turbinas hidráulicas con almacenamiento, motores diésel, celdas de combustible; entre las no despachables se encuentran las unidades cuya producción no puede ser regulada de forma externa, es decir, sus fuentes de energía son variables; en este grupo están las centrales hidráulicas de pasada, eólicas, fotovoltaicas, donde se busca obtener la máxima potencia (MPPT) de cada dispositivo en cada momento.

2.4.1.1 Topologías de hardware para generación distribuida con acople electrónico basado en inversores

En [19] y [21] se presentan varias alternativas de sistemas de inversión para conectar la GD a redes de alterna. Los sistemas fotovoltaicos (FV) y celdas de combustible (CdC) tienen una estructura de inversores similares debido a las similitudes en la forma de generación de energía de estos, a su vez los generadores de turbina de viento dependen del sistema de generación que empleen.

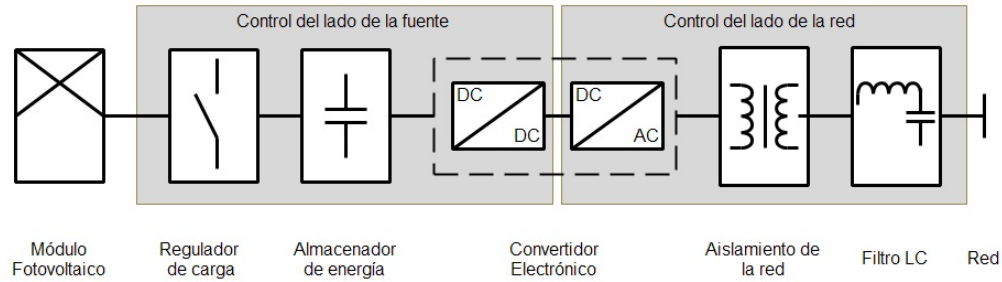


Figura 4. Configuración de elementos de sistemas fotovoltaicos o celdas de combustible [20].

a) *Generadores fotovoltaicos y de celda de combustible*

Los sistemas FV y CdC tienen su alimentación proveniente de los paneles solares o de las celdas, se requiere conectar varios paneles para obtener el voltaje y la corriente requeridas, por lo general se incluye un sistema de elevación de la tensión previo a la conversión en alterna. Para conectarse a la red comúnmente se emplea un filtro LC o LCL [22]. Como medida de protección al conjunto de paneles se puede aislarlos de la red mediante dos métodos: sistema dc/dc o usando un transformador elevador en el lado de alterna [20], esto es mostrado en la Figura 4.

b) *Generadores eólicos*

Los generadores eólicos básicamente están constituidos por las aspas acopladas a un sistema de conversión mecánica de la velocidad, generador y acople a la red. En el sistema de generación, a su vez, puede presentar las siguientes configuraciones [21]:

1. *Turbinas eólicas sin inversión electrónica*

Estas turbinas usan un generador tipo jaula de ardilla, el sistema de control de velocidad debe ser muy preciso para mantener la frecuencia dentro de niveles aceptables, el generador se conecta directamente a la red, cuenta, además, con un sistema de arranque suave ya que no es posible controlar la corriente de irrupción (*inrush*). Para compensar los reactivos que requiere este generador se lo dota de un capacitor colocado en paralelo, como se observa en la Figura 5a.

2. *Turbinas eólicas con inversión electrónica parcial*

Esta solución se presenta cuando la tensión de generación es baja y consecuentemente la corriente es alta, esto repercute en el uso de elementos de estado sólido ya que resultarían demasiado costosos, por ello se opta por usar un generador de anillos rozantes que permiten controlar la co-

riente de armadura y mediante un lazo de dc/ac compensar las variaciones en la tensión de salida. Este generador se muestra en la Figura 5b.

3. *Turbinas eólicas con inversión electrónica completa*

Este tipo de generadores emplea la rectificación completa de la fuente que consiste en un generador síncrono o uno jaula de ardilla como el mostrado en la Figura 5c: otra alternativa consiste en eliminar el regulador de velocidades y colocar un generador síncrono o uno síncrono de magnetos permanentes, mostrado en la Figura 5d. La ventaja de eliminar el sistema de regulación de velocidades radica en la mejora de la eficiencia y elimina un elemento al que se debe dar mantenimiento.

2.4.2. Almacenamiento distribuido

El almacenamiento distribuido (AD) consiste en elementos que permiten almacenar energía eléctrica en diversas formas (química, magnética, cinética, etc.) para luego utilizarla en los momentos que se requieran. Se tiene como alternativas viables: baterías, volantes de inercia, supercapacitores, almacenadores magnéticos, almacenadores de hidrógeno, almacenamiento de aire comprimido.

2.4.3. Cargas de la microrred

La microrred puede servir cargas industriales, comerciales y residenciales. Su meta es que estas cargas puedan ser servidas con la mayor calidad y a los menores costos [3], [16]. En el caso de que la red trabaje en modo desconectado o de forma aislada, se puede optar por un esquema de alivio de carga (*load-shedding*), en casos especiales se puede optar también por esta alternativa en el modo conectado a la red bajo consideraciones especiales³ [23].

³Entre estas consideraciones constan: altos precios de la energía, situaciones de emergencia o estrés del sistema eléctrico, imposibilidad de cumplir con los contratos asumidos por la MR.

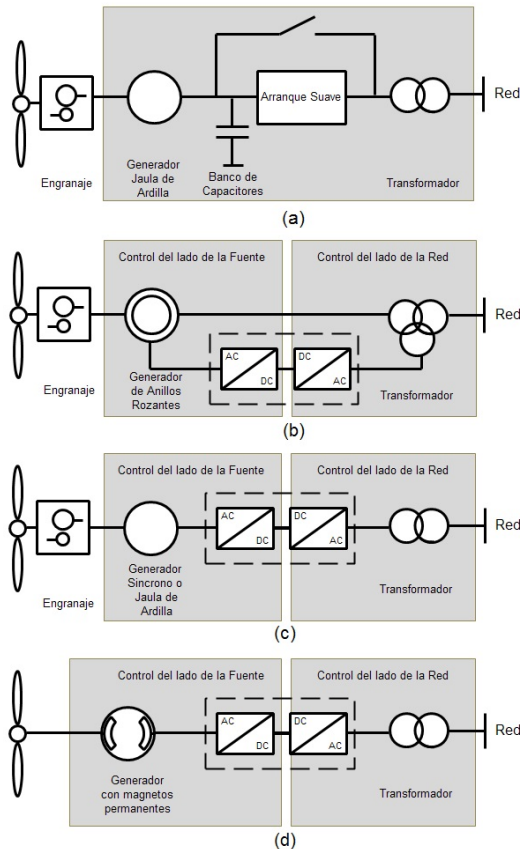


Figura 5. Turbinas de viento usando sistemas: (a) con mínima conversión electrónica, (b) conversión parcial con electrónica, (c y d) completamente invertido electrónicamente [21].

3. Operación y estabilidad de microrredes

La microrred básicamente es un sistema inteligente [4] que permite la administración de GD, AD y las cargas que están conectadas dentro de su área de cobertura, este conjunto de elementos están regidos por la normativa IEEE Std 1547 [24].

Durante la operación normal la MR se encarga de realizar un equilibrio constante entre la oferta y la demanda, además de los criterios técnicos tiene que trabajar con las restricciones económicas que buscan que todos los agentes de la MR se beneficien; este sistema de máximo beneficio económico es una restricción que no debe imponerse a la continuidad de servicio.

3.1. Operación de microrredes

3.1.1. Operación aislada de la red

Tradicionalmente los sistemas eléctricos aislados han sido servidos por generación *in situ*, basada en los recursos disponibles o en combustibles de fácil transporte y

almacenamiento principalmente hidrocarburos; la gran ventaja de las fuentes renovables es la utilización de energías como el sol, el viento o el recurso hídrico que pueden ser localmente abundantes y se convierten en opciones viables para lugares a los que es muy difícil transportar combustibles. En este entorno, las MR son una alternativa para administrar eficientemente la generación y controlar el proceso de carga y descarga de los almacenadores. [3], [14], [25].

Las fuentes deben ser dimensionadas para abastecer la carga y un margen de seguridad adecuado, los sistemas de control por lo tanto buscan mantener niveles de tensión y frecuencia con pocas desviaciones de los puntos de referencia.

La seguridad es un aspecto clave, ya que en estos sistemas se define una barra de referencia, pero al ser un sistema relativamente débil es proclive a que contingencias graves afecten seriamente la estabilidad y la continuidad de servicio.

3.1.2. Operación interconectada a la red

Este modo es presentado en la Figura 1, la MR que se conecta al sistema mediante un punto de acoplamiento común (PAC), este interruptor puede desconectar la red si la calidad del suministro disminuye por debajo de un umbral definido y previa orden del control de la MR.

1. Conectado a la red.

En este modo la MR procura abastecer la mayor cantidad de la demanda, gestionar la carga/descarga del AD, de manera que la red funcione como un nodo *slack* (*swing bus* o nodo de balance), absorbiendo o entregando las diferencias de energía; además, el punto de conexión provee una referencia de tensión y frecuencia que ayuda a mantener estos parámetros también en la microrred.

2. Desconectado a la red.

El modo desconectado de red, básicamente es activado cuando [3]:

- La red brinda suministro con baja calidad de la energía, alguno de los parámetros del sistema no cumple con las expectativas de las cargas.
- Como respuesta a los precios de la energía.
- Durante momentos de estrés del sistema, esto incluye horas pico, estado de alerta de la red, emergencia o recuperación del SEP.

Las MR que se aíslan de la red deben continuamente buscar el balance entre la generación y la demanda, por ello los sistemas de adquisición de información son muy importantes para una operación óptima; en experiencias desarrolladas en Europa y Japón [5] se

Tabla 1. Parámetros de sincronización (para reconectar la microrred a la red) [24].

Potencia de GD	Diferencia de frecuencia	Diferencias de tensión	Diferencia de ángulos
(MVA)	(Δf , %)	(Δv , %)	($\Delta \Phi$, °)
0.0–0.5	0.3	10	20
>0.5–1.5	0.2	5	15
>1.5–10	0.1	3	10

ha determinado que este equilibrio puede mantenerse con un error menor al 3% durante el 99% del tiempo, por ello la gestión activa de la demanda es un punto muy importante en la operación desconectada sobre todo si la capacidad de almacenamiento o la energía disponible de las fuentes no despachables no es notablemente grande.

Otro punto a tomarse en cuenta es la desconexión y posterior reconexión a la red principalmente por la sincronización; el punto de acoplamiento común (PAC) debe brindar las facilidades para que la MR pueda acoplarse a la red cuando sea necesario, la Tabla 1 muestra los límites de los parámetros de sincronización según la norma IEEE 1547.

Durante la operación aislada de la red se debe asegurar que las puestas a tierra del sistema cumplan los requerimientos de seguridad manteniendo las impedancias en niveles aceptables [26], estas consideraciones están establecidas en la norma IEEE Std. 1547 (sección 8.1.2).

3.2. Estabilidad de las microrredes

La estabilidad de los sistemas eléctricos es la capacidad para frente a una perturbación mantener el equilibrio entre generación y consumo, otra definición es: “la capacidad de restablecer al estado inicial o a otro muy cercano después de una perturbación, incluso si esta no ha desaparecido” [27].

En las microrredes se aplica el mismo concepto de la estabilidad tradicional, la llamada seguridad N-1, que en estas puede ser llamada (N-x) [28] donde x representa un conjunto de elementos de la MR que podrían no actuar en una contingencia ya sea porque han sido desconectados, se hallan no despachados o porque son los elementos en falla. La seguridad es un aspecto clave, en especial, cuando se analiza el funcionamiento de la MR desconectada o en modo aislado ya que el equilibrio generación demanda es mucho más complejo al no disponer de un nodo de compensación. Para cumplir los objetivos de funcionamiento la MR requiere disponer de reserva disponible para suplir desbalances instantáneos y una reserva de energía para mantener el equilibrio a largo plazo [29].

Esta reserva a corto plazo consiste en unidades de almacenamiento o unidades de generación que puedan entregar el faltante rápidamente; las unidades de generación no despachables no pueden formar parte de esta reserva de seguridad debido a que trabajan en el punto de máxima explotación del recurso primario; a su vez, los almacenadores permiten suplir este faltante de manera inmediata pero debido a la planificación requieren una orden de control que indique que su actuación se realizará para compensar contingencias o como reserva rodante.

A largo plazo se debe contar con unidades tanto despachables y no despachables para proveer la respectiva reserva de energía, entre estos generadores se puede contar a generadores de lento encendido⁴ (motores de combustión interna) y las unidades que tengan un costo de operación alto.

La estabilidad de MR aisladas sometidas a estrés depende en gran medida del tipo de control y la coordinación entre los agentes, cada GD y AD tiene sus restricciones y “ve” solo una parte de la red [30], es importante que se maneje un esquema de cooperación que dependerá del tipo de inversor y del control que se realice entre los agentes [31].

4. Conclusiones

Las microrredes son el siguiente paso en la evolución de los sistemas eléctricos de potencia, tanto por sus características de eficiencia como por la capacidad de vincular la generación distribuida. Las alternativas de generación renovable son una de las soluciones frente a los problemas ambientales, su gran inconveniente radica en su variabilidad y altos costos, por ello las MR son un modelo importante ya que permiten controlar y vincular distintos tipos de generadores explotándolos de manera conjunta.

En la perspectiva del cliente el desarrollo de MR permitirá un aumento en la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico, conjuntamente con una mayor conciencia sobre el uso eficiente de la energía.

⁴Al indicar lento encendido se hace referencia a los inversores electrónicos cuya respuesta es inmediata, este encendido lento puede prolongarse hasta el límite de los 10-15 minutos. que es el tiempo que dura el despacho.

Referencias

- [1] S. Hunt, "Making competition work in electricity," *New York: Wiley & Sons*, 2002.
- [2] L. I. L. Eguíluz, M. Mañana, and P. Sánchez, "Eficiencia energética y calidad de suministro eléctrico," *Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Santander*, 2006.
- [3] J. Driesen and F. Katiraei, "Design for distributed energy resources," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, pp. 30–40, 2008.
- [4] F. Katiraei, N. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, pp. 54,65, 2008.
- [5] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, S. Papatlianassiou, and N. Hatziargyriou, "Making microgrids work," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, pp. 40–53, 2008.
- [6] K. de Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, "Control of microgrids," *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–7, 2007.
- [7] G. Sheble, "Energy service providers the missing link to successful deregulation?" *IEEE power & energy magazine*, 2013.
- [8] —, "Smart grid millionaire do you want to be one?" *IEEE power & energy magazine*, p. 8, 2008.
- [9] G. B. Sheble, "Valuation of services. competitive industry modeling," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 1, pp. 14–19, 2003.
- [10] G. Venkataramanan and C. Marnay, "A larger role for microgrids," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, pp. 78–82, 2008.
- [11] H. Asano and S. Bando, "Economic evaluation of microgrids," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE*, pp. 1–6, 2008.
- [12] S. Galli, A. Scaglione, and W. Zhifang, "Power line communications and the smart grid," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pp. 303–308, 2010.
- [13] F. Maghsoodlou, R. Masiello, and T. Ray, "Energy management systems," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 49–57, 2004.
- [14] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, and L. Vandeveldel, "A control strategy for islanded microgrids with dc-link voltage control," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 703–713, 2011.
- [15] E. Haesen, J. Driesen, and R. Belmans, "Robust planning methodology for integration of stochastic generators in distribution grids," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 1, pp. 25–32, 2007.
- [16] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 5, pp. 78–94, 2007.
- [17] N. Hatziargyriou, "Microgrids, the key to unlock distributed energy resources," *IEEE power & energy magazine*, May-Jun 2008.
- [18] H. B. Puttgen, P. R. MacGregor, and F. C. Lambert, "Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era?" *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 1, pp. 22–29, 2003.
- [19] S. Liping, L. Guojie, and J. Zhijian, "Modeling, control and testing of a voltage-source-inverter-based microgrid," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, pp. 724–729, 2011.
- [20] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1398–1409, 2006.
- [21] F. Blaabjerg, C. Zhe, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1184–1194, 2004.
- [22] L. Yunwei, D. M. Vilathgamuwa, and L. Poh Chiang, "Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 1195–1204, 2004.
- [23] H.-M. Kim, T. Kinoshita, Y. Lim, and Kim, "Bankruptcy problem approach to load-shedding in agent-based microgrid operation," *Security-Enriched Urban Computing and Smart Grid.*, vol. 78, T.-h. Kim, A. Stoica, and R.-S. Chang, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg,, pp. 621–628, 2010.
- [24] IEEE, "Ieee application guide for ieee std 1547, ieee standard for interconnecting distributed resources with electric power system," *IEEE Std 1547.2-2008*, pp. 1–207, 2009.
- [25] P. L. Villeneuve, "Concerns generated by islanding [electric power generation]," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 49–53, 2004.

- [26] H. Mohamada, “Renewable and sustainable energy reviews: A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant,” *Power Energy Dedicated Advanced Centre*, 2011.
- [27] V. Vernokov, “Procesos transitorios electromecánicos en sistemas eléctricos de potencia,” *Moscú*, 1985.
- [28] K. Morison, W. Lei, and P. Kundur, “Power system security assessment,” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 30–39, 2004.
- [29] L. Yi, Z. Longjun, Z. Gelan, and W. Gang, “Network analysis and algorithm of microgrid reliability assessment,” *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 1–4, 2010.
- [30] L. Zhenjie, Y. Yue, and L. Furong, “Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode,” *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, pp. 1–5, 2010.
- [31] A. K. Basu, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, “Role of switching devices on microgrid reliability,” *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 45th International*, pp. 1–5, 2010.