

Estudio de Microgrids con interfases de convertidores de DC/AC

F. Andrade, K. Kampouropoulos, J. Cusidó and L. Romeral

Abstract—Este artículo presenta un estudio de Microgrids con interfases de convertidores DC/AC. El artículo muestra los modos de operación de las Microgrids, además implementa un modelo de pequeña señal para el modo de operación aislado que permite estudiar la estabilidad del sistema. Finalmente se muestra el funcionamiento de la Microgrid en ambos modos de operación.

Index Terms—Modelado de Microgrid, Estudio de Estabilidad, generadores distribuidos, curvas droop.

I. INTRODUCTION

LA interconexión al sistema de distribución eléctrica de bajo voltaje, nivel de 400V, de pequeños Generadores Distribuidos (DG), típicamente generadores de potencias menores a 10MVA en su mayoría de energía primaria renovable, por ejemplo fotovoltaica, eólica, hidroeléctrica, etc., en lugares cercanos a los consumidores, como pequeñas industrias y edificios del sector residencial, entre otros, ha llevado a una nueva concepción del sistema de potencia. El concepto de Microgrid [1] permite la interconexión de varios generadores distribuidos y cargas cercanas sobre el cual se puede ejercer un control inteligente [2], que permite optimizar indicadores de gran interés como eficiencia del sistema, calidad de la potencia, y otros. Una Microgrid puede trabajar en forma independiente de la red eléctrica pública, teniendo como opción la conexión o desconexión de forma controlada a la red principal [3].

Muchos de estos DG de fuentes renovables necesitan de una interface de potencia para conectarse a la red pública; esta interface es generalmente un convertidor CC/CA o CA/CA.

Las distancias entre los DGs y el elevado coste económico que implica tener una red de comunicaciones que informen del estado de cada DG, además de los problemas que puede

generar el depender de un sistema de comunicaciones para su funcionamiento, es ineficiente. Por ello, y aunque existe una supervisión global del estado de la instalación, es poco frecuente trabajar en configuraciones de control del tipo Maestro – esclavo.

II. ESTADO DEL ARTE DE LAS MICROGRIDS

En EE-UU, CERTS se crea para la investigación sobre el impacto de grandes cantidades de DG conectados al sistema de potencia con el fin de mejorar la fiabilidad del sistema y desarrolla el concepto de Microgrid [1]. Desde la aparición del concepto de Microgrid los países de la EU han desarrollado laboratorios de energías en universidades o centros tecnológicos para la investigación de éste [4]. Algunas instituciones que han trabajado este concepto son: The National Technical University of Athens (NTUA) en Grecia, the University of Manchester (UM) en Inglaterra, The Institute für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) en Alemania, y LABEIN en España, entre otros.

La figura 1 muestra una línea de tiempo de los últimos años y los proyectos Europeos que se han realizado. Algunos de los temas tratados en estos proyectos son el estudio, diseño y operación de Microgrid con una mayor penetración de las energías renovables y otras fuentes micro-generadoras, incluyendo pilas de combustible, micro-turbinas y cogeneración. El desarrollo y la demostración de estrategias de control que garanticen el funcionamiento y la gestión de la Microgrid, capaces de satisfacer las necesidades de los consumidores y las limitaciones técnicas (en relación con el voltaje y frecuencia), además de ser un sistema de alta eficiencia, fiable y de altas prestaciones económicas.

Los sistemas Microgrids, conformados con DGs renovables y conectados entre sí por interfaces de electrónica de potencia [5], deben de cumplir con requerimientos de calidad de energía, seguridad, fiabilidad y otros aspectos, que han sido enmarcados en el estándar IEEE1747 [6].

Por motivos de distancias entre los DGs y el coste económico que implica tener una red de comunicaciones que informen del estado de cada DG es filosofía de trabajo común en Microgrids el hacer que cada control local sea autónomo en el manejo y control del voltaje y el flujo de potencia en la Microgrid, [7], [8], [9].

Artículo recibido en febrero 15, 2011. Este trabajo fue apoyado en parte por CTM Centre Tecnològic y el grupo de investigación MCIA del departamento de ingeniería electrónica de la Universitat Politècnica de Catalunya.

F. Andrade, Universitat Politècnica de Catalunya (teléfono: 937398522; fax: 937398972; e-mail: fabio.andrade@mcia.upc.edu).

K. Kampouropoulos, Universitat Politècnica de Catalunya (e-mail: kostas.kampouropoulos@mcia.upc.edu)

J. Cusidó, CTM Centre Tecnològic (e-mail: jordi.cusido@ctm.com.es)

L. Romeral, Universitat Politècnica de Catalunya (e-mail: luis.romeral@mcia.upc.edu).

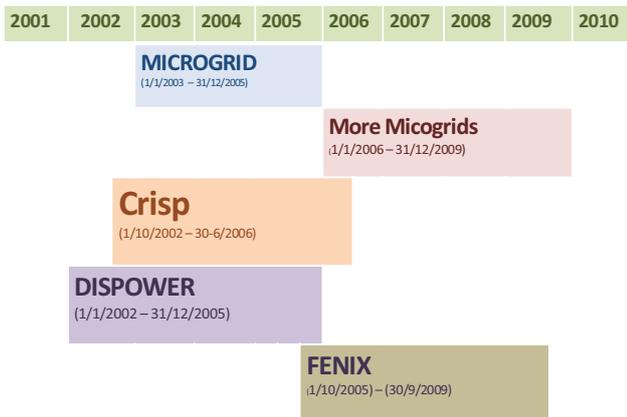


Fig. 1. línea de tiempo de los proyectos europeos trabajados en la última década.

En [10] Coelho realiza análisis de estabilidad para inversores conectado en paralelo en modo aislado, la técnica de control usada en los inversores son basadas en las curvas “droop” de frecuencia y voltaje. El modelado utilizado, según la teoría de control moderno, es un set de ecuaciones diferenciales representadas en el espacio de estado.

En este modelo tienen en cuenta el filtro utilizado para suavizar las señales de P y Q y desarrollan un modelo en pequeña señal que es llevado al eje de referencia d-q, para finalmente obtener un modelo de dos inversores conectados en paralelo en pequeña señal. El estudio de estabilidad toma los valores propios del sistema y observan cual es el comportamiento de los modos oscilatorios en el lugar geométrico de las raíces al variar parámetros tales como inductancia de conexión, ancho de banda del filtro pasa-bajo de P y Q, etc.

Guerrero en [11] utiliza un modelo similar al anterior, modelo de pequeña señal con linealización en el punto de operación y observa la estabilidad ante variaciones de las pendientes de las curvas “droop” y la impedancia de conexión a red, entre otros. En [12] se modifica el filtro de alisamiento de la potencia activa, se cambia el filtro pasa-bajo por un filtro pasa-banda y se adiciona el concepto de impedancia virtual para buscar optimizar el desempeño del controlador. En [13] realiza un análisis del sistema utilizando una resistencia de conexión a la Microgrid en vez de una impedancia.

Pogaku en [14] y Nikkhajoei en [15] generan modelos de una Microgrid trabajando en forma autónoma, dividiendo el modelo en tres partes, modulo de inversores, modulo de red eléctrica y modulo de carga. Así, cada inversor tiene su propio marco de referencia d-q, cuya frecuencia de rotación es determinada por el controlador de potencia compartida local. Además el modelo del inversor incluye la dinámica del controlador de flujo de potencia compartida, la dinámica del filtro de salida y el inductor de conexión a la Microgrid y las dinámicas de los lazos de control internos de voltaje y de corriente, estas dos últimas son dinámicas de altas frecuencias

ligadas a la frecuencia de conmutación del inversor.

III. ESTRUCTURA DE UNA MICROGRID

En una Microgrid intervienen dos tipos de controladores, un es el controlador central de la Microgrid (MGCC) y varios controladores locales (LC) [16]. Los LC son interfaces basados en convertidor CC/CA o CA/CA, figura 2, encargados de manejar y compartir los flujos de potencia con los demás generadores y las cargas controladas, [17], [18], [19]. Por motivos de distancias entre los DGs y el coste económico que implica tener una red de comunicaciones que informen del estado de cada DG, además de los problemas que puede generar el depender de un sistema de comunicaciones para su funcionamiento, es filosofía de trabajo común en

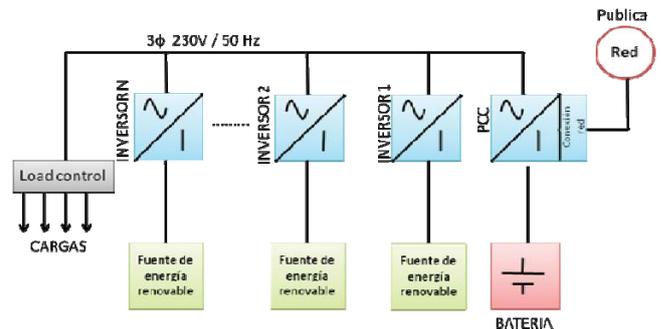


Fig. 2. Estructura de una Microgrid
Microgrids el hacer que cada LC sea autónomo en el manejo y control del voltaje y el flujo de potencia en la Microgrid.

A. Controlador local (LC)

Los controladores locales son sistemas que transforman la energía DC en energía AC y la entrega a la carga de forma controlada y estable, este proceso lo hace por medio de un ondulator y dos lazos de control, un primer lazo interno encargado de la regulación de las variables de voltaje y corriente de salida y un lazo externo que controla el flujo de potencia activa y reactiva. Este lazo externo de control de potencias utiliza las curvas “droop” para compartir la potencia exigida por las cargas con otros generadores. La figura 3 muestra un esquema de la estructura de cada generador basado

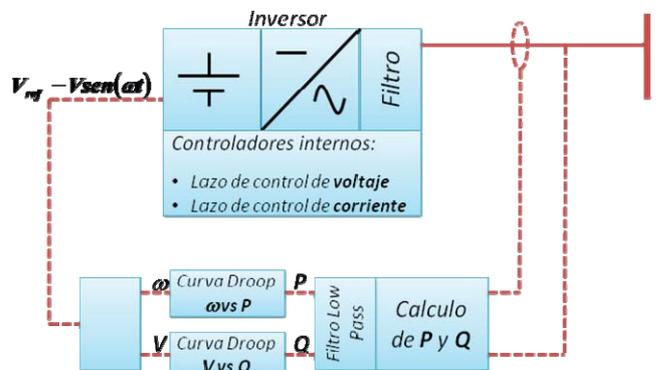


Fig. 3. Estructura de un generador con interfase de convertidor DC/AC en interfaz de convertidor de potencia y los lazos internos y

externos.

B. Microgrid conectada a la Red eléctrica publica

Cuando una Microgrid se encuentra conectada a la red eléctrica, el comportamiento de los LC es transformar toda la energía primaria disponible (solar, eólica, térmica, etc.) en energía eléctrica. Así, si se genera un exceso de energía, será entregada a la red eléctrica y si por el contrario la carga necesita más energía y los LC no satisfacen el total de ésta, la red eléctrica suministrará este déficit de energía. Este concepto podrá variar dependiendo de variables tales como precio de la energía, disponibilidad para vender energía a la red eléctrica, etc. La figura 4 muestra una Microgrid conectada a la red eléctrica, los generadores son basados en

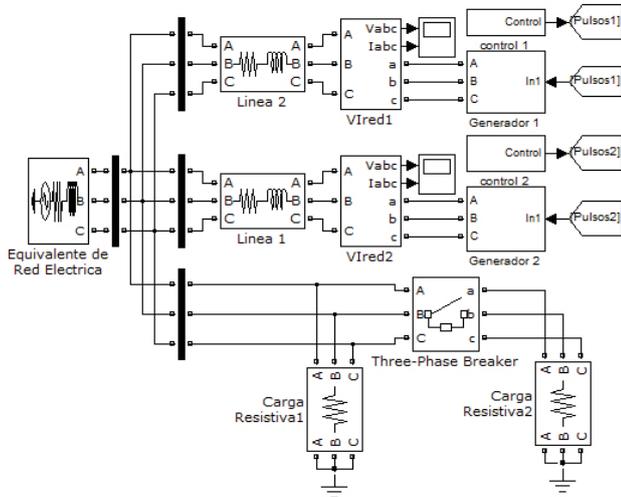


Fig. 4. Microgrid Conectada a la Red eléctrica publica

convertidores de electrónica de potencia principalmente del tipo CC-CA.

C. Microgrid en modo aislado

Cuando la Microgrid trabaja en modo aislado, el sistema es poco robusto y la posibilidad de volverse inestable es grande, sobre todo si los generadores utilizan energía primaria renovable intermitente, por ejemplo los paneles solares o los molinos de viento. En este modo de funcionamiento las interfaces de potencia deben compartir la potencia entregada a las cargas, para lo cual utilizan lazos de control con las curvas droop. La figura 5 muestra un sistema de dos generadores

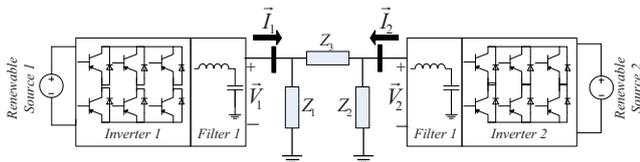


Fig. 5. Sistema aislado de dos generadores compartiendo potencia

aislados que comparten potencias PQ y será modelado y estudiado en los siguientes puntos.

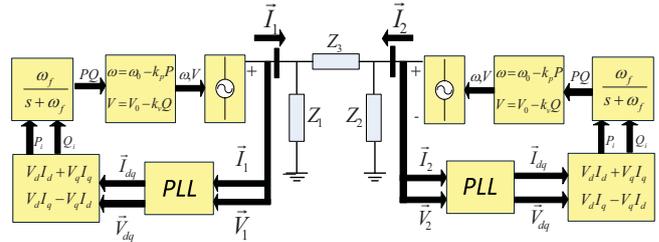


Fig. 6. Modelo para un sistema aislado de dos generadores compartiendo potencia

IV. ESTUDIO DE ESTABILIDAD

La estabilidad de una Microgrid es un punto crítico cuando el sistema funciona en modo aislado. A continuación se muestra un modelo de pequeña señal de una Microgrid con dos generadores y un estudio de estabilidad por medio del lugar geométrico de las raíces.

A. Modelo de pequeña señal de la Microgrid en modo aislado

El modelo se genera a partir de la figura 6 donde cada generador controla la potencia PQ con las curvas droop, así:

$$\omega = \omega_0 - k_p P \quad V = V_0 - k_v Q \quad (1)$$

Las potencias P y Q del set de ecuaciones en (1) son señales de potencia filtradas por medio de un filtro pasa-bajo de

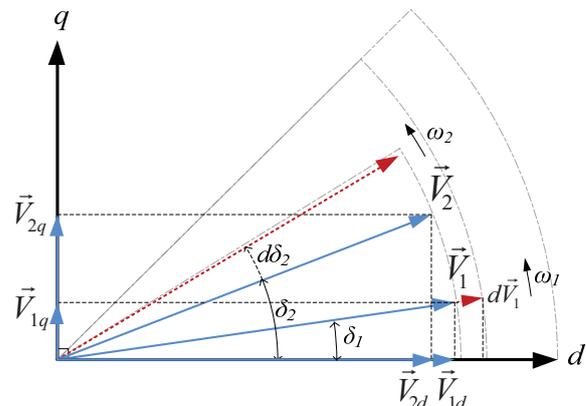


Fig. 7. Voltajes de los generadores representados en los ejes de referencia dq

primer orden con frecuencia de corte una década menor de la frecuencia de trabajo.

$$P(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} P_i(s) \quad Q(s) = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} Q_i(s) \quad (2)$$

$$P_i(s) = V_d I_d + V_q I_q \quad Q_i(s) = V_d I_q - V_q I_d \quad (3)$$

Utilizando las ecuaciones de las curvas droop, las ecuaciones del filtro pasa-bajo de primer orden (2), las ecuaciones de potencia instantánea en función de los voltajes dq y las corrientes dq (3) y tomando un eje común de referencia dq para representar los vectores de voltaje de cada generador, como se puede ver en la figura 6, se puede obtener

un modelo de los voltajes dq y la frecuencia de cada generador en función de las potencias instantáneas PQ que se está gestionando en la red eléctrica de la Microgrid. Así, el modelo de cada generador esta dado por:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = \omega_{f1}\omega_1 - k_{p1}\omega_{f1}P_1 \\ \dot{V}_{d1} = -\omega_{f1}V_{d1} - \omega_1V_{q1} - \frac{k_{p1}\omega_{f1}V_{d1}}{|V_1|}Q_1 \\ \dot{V}_{q1} = \omega_1V_{d1} - \omega_{f1}V_{q1} - \frac{k_{v1}\omega_{f1}V_{q1}}{|V_1|}Q_1 \\ \dot{\omega}_2 = \omega_{f2}\omega_2 - k_{p2}\omega_{f2}P_2 \\ \dot{V}_{d2} = -\omega_{f2}V_{d2} - \omega_2V_{q2} - \frac{k_{p2}\omega_{f2}V_{d2}}{|V_2|}Q_2 \\ \dot{V}_{q2} = \omega_2V_{d2} - \omega_{f2}V_{q2} - \frac{k_{v2}\omega_{f2}V_{q2}}{|V_2|}Q_2 \end{cases} \quad (4)$$

El set de ecuaciones diferenciales (4) presenta el modelo de los dos generadores en función de los voltajes dq la frecuencia y las potencias PQ que está despachando cada generador hacia la red. Este modelo es un modelo no-lineal. Si se incluye la configuración de la red y expresamos las potencias PQ en función de las admitancias tenemos:

$$\begin{bmatrix} I_{1d} \\ I_{1q} \\ I_{2d} \\ I_{2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & -G_{12} & B_{12} \\ B_{11} & G_{11} & -B_{12} & -G_{12} \\ G_{12} & B_{12} & G_{22} & -B_{22} \\ -B_{12} & -G_{12} & B_{22} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ V_{d2} \\ V_{q2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Y las potencias en la red

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \\ P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d1} & V_{q1} & 0 & 0 \\ -V_{q1} & V_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{d2} & V_{q2} \\ 0 & 0 & -V_{q2} & V_{d2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & -G_{12} & B_{12} \\ B_{11} & G_{11} & -B_{12} & -G_{12} \\ G_{12} & B_{12} & G_{22} & -B_{22} \\ -B_{12} & -G_{12} & B_{22} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ V_{d2} \\ V_{q2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Utilizando series de Taylor el modelo completo puede ser linealizado alrededor de un punto de trabajo en régimen estable. Así dado el punto de trabajo:

$$\omega_1 = \omega_{1ss}; V_{d1} = V_{d1ss}; V_{q1} = V_{q1ss}; I_{d1} = I_{d1ss}; I_{q1} = I_{q1ss}$$

$$\omega_2 = \omega_{2ss}; V_{d2} = V_{d2ss}; V_{q2} = V_{q2ss}; I_{d2} = I_{d2ss}; I_{q2} = I_{q2ss}$$

Se genera el modelo lineal de la forma

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{X}} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \tilde{X} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde la matriz A tiene solo valores constantes de relaciones de frecuencia voltaje y corriente del punto de

trabajo en régimen estable y valores de admitancias, frecuencias de corte, etc. Así:

$$A = \begin{bmatrix} -\omega_{f1} & f_{11} & f_{12} & 0 & f_{13} & f_{14} \\ 0 & f_{15} & f_{16} & 0 & f_{17} & f_{18} \\ f_{19} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{21} & f_{22} & -\omega_{f2} & f_{23} & f_{24} \\ 0 & f_{25} & f_{26} & f_{27} & f_{28} & f_{29} \\ 0 & f_{210} & f_{211} & f_{212} & f_{213} & f_{214} \end{bmatrix}$$

B. Modos oscilatorios de la Microgrid

La matriz A permite determinar los valores propios del sistema y se puede estudiar la estabilidad del sistema y cómo evoluciona esta ante pequeñas variaciones en parámetros tales como: variaciones de los coeficientes kp y kv de las curvas droop, variaciones en la inductancia de transmisión, variación en la frecuencia de corte del filtro pasabajo, etc.

Utilizando los valores de la tabla I podemos encontrar la matriz A:

$$A = \begin{bmatrix} -37.7 & -0.466 & -0.936 & 0 & 0.157 & 0.944 \\ 0 & -36.57 & -0.217 & 0 & -0.94 & 0.157 \\ 154.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.097 & -0.956 & -37.7 & -0.34 & -0.97 \\ 0 & -0.954 & 0.097 & -9.86 & -36.5 & -2.42 \\ 0 & -0.061 & 0.006 & 154.9 & -2.32 & -0.15 \end{bmatrix}$$

Que posee valores propios

$$\lambda_1 = 0; \lambda_2 = -10.8; \lambda_3 = -26.9; \lambda_4 = -35.7; \lambda_5 = -37.7; \lambda_6 = -37.5;$$

Para el estudio de estabilidad solo son importante los valores propios no sean igual a cero [10], el valor propio igual a cero nos indica una dependencia lineal al ángulo δ_i ($\omega = \dot{\delta}$). El sistema no tiene raíces en el lado inestable del lugar geométrico de las raíces.

A continuación en el apartado de resultados se estudia el comportamiento del sistema en ambos casos, un primer caso la Microgrid conectada a la red eléctrica y un segundo caso en modo aislado. Posteriormente se realiza un estudio de estabilidad de la Microgrid en modo aislado y se observa el comportamiento de esta ante cambios en diferentes parámetros de la Microgrid y la ubicación de las raíces del sistema en el

TABLA I
VALORES REALES DE MICROGRID

Símbolo	Variable	Valor
Z_3	Línea de transmisión	0.5+3i Ω
Z_1	Carga local 1	13+6i Ω
Z_2	Carga local 2	25+13i Ω
ω_{1f}	Frecuencia del filtro de medida 1	37.7 rd/s
ω_{2f}	Frecuencia del filtro de medida 2	37.7 rd/s
K_p	Coefficiente droop de frecuencia	0.0005 rd/s/W
K_v	Coefficiente droop de voltaje	0.0005 V/VAR
ω	Frecuencia nominal	377 rd/s

lugar geométrico de las raíces.

V. RESULTADOS

Un sistema Microgrid con dos inversores de 15KVA trabajando con la red eléctrica, figura 4, suministran potencia a una carga resistiva. Cuando el sistema está en régimen permanente se conecta una segunda carga al sistema. La figura 8 muestra el comportamiento de la Microgrid.

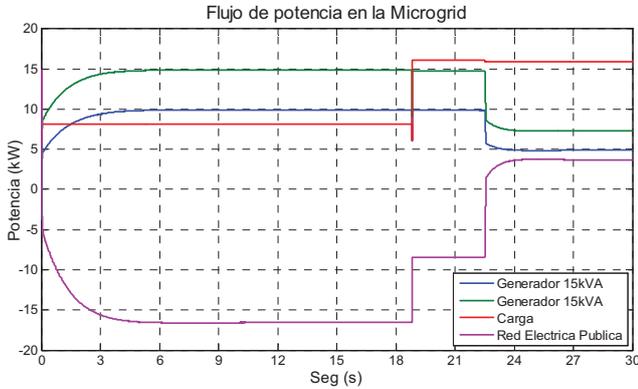


Fig. 8. Flujo de potencias entre la Microgrid y la red eléctrica ante variación de carga

Cuando la Microgrid está conectada a red, los generadores se configuran para entregar la máxima potencia posible, así durante el periodo (0-23seg) los generadores entregan 10kW y 15kW respectivamente. La potencia generada se suministra a la carga (8kW) y se vende el excedente a la red eléctrica pública (17kW). Ante una variación de la carga (16kW) los generadores mantienen su consigna de máxima potencia y solo varía la potencia entregada a la red eléctrica que pasa de 17kW a 9kW. A los 24seg la energía primaria renovable disminuye y los generadores pasan a generar 8kW y 5kW respectivamente. La potencia generada no satisface totalmente la potencia de la carga, así la red eléctrica pública debe suministrar los 4 kW faltantes necesarios para el correcto funcionamiento de la carga.

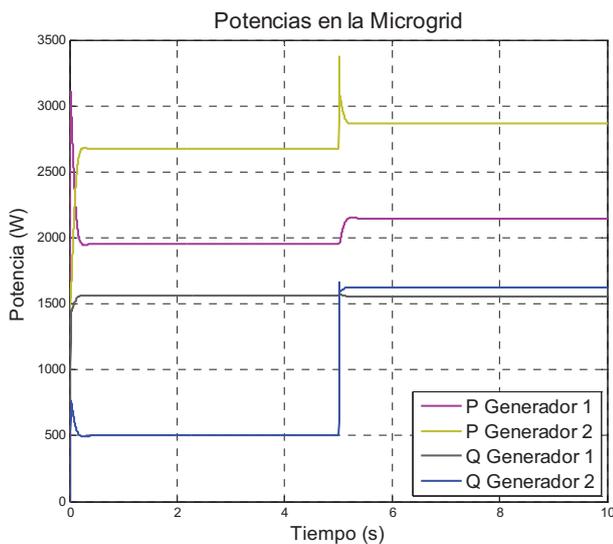


Fig. 9. Sistema aislado de dos generadores compartiendo potencia

La figura 9 muestra la simulación de la Microgrid funcionando en modo aislado con la configuración mostrada en la fig 5 y con valores de la tabla I. puede observarse como ante una variación de carga los generadores varían los puntos de operación de potencia P y Q ayudándose de las curvas droop. La figura 10 muestra como los generadores varían sus frecuencias para lograr encontrar un estado estable donde se comparta la potencia suministrada a las cargas de la Microgrid.

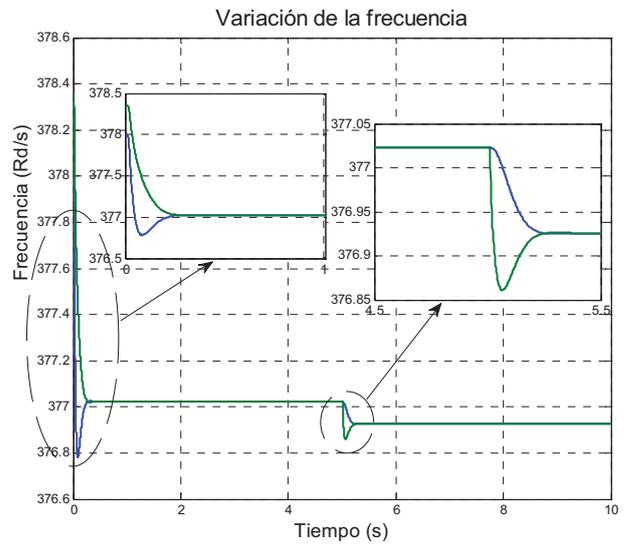


Fig. 10. Variación de la frecuencia ante cambios de potencia en la Microgrid

Un análisis de estabilidad por medio del lugar geométrico de las raíces es realizado a la Microgrid y ante variaciones de parámetros como la inductancia de transmisión o los coeficientes de las curvas droops.

La figura 11 muestra como las raíces del sistema se mueven ante variaciones de la inductancia de transmisión con tendencia de uno de los polos ir hacia zona de región

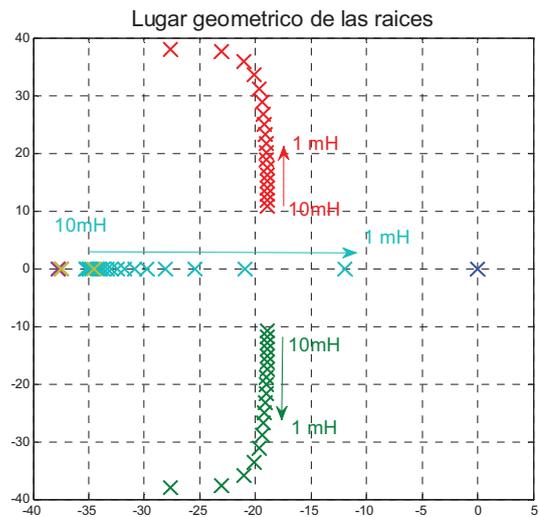


Fig. 11. Variación de la inductancia de transmisión en la Microgrid

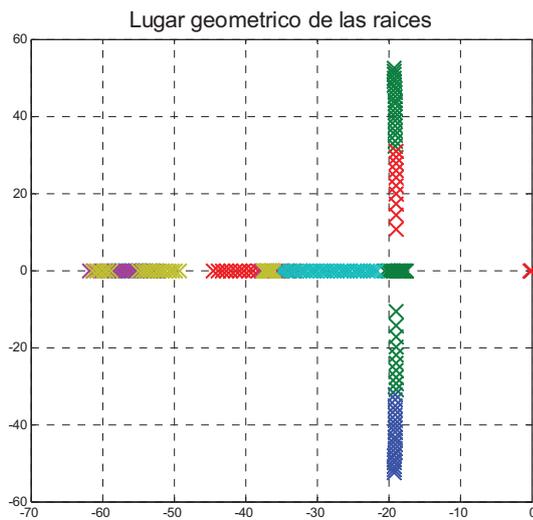


Fig. 12. Variación de los parámetros k_p y k_v de las curvas droop inestable.

En la figura 12 se puede ver como ante un aumento en los coeficientes k_p y k_v el sistema empieza a ser más oscilatorio aunque se mantiene estable.

VI. CONCLUSIONES

Se ha mostrados varias configuraciones de Microgrids basadas en convertidores DC/AC operando en dos modos diferentes, un primer modo conectada a la red eléctrica pública y un segundo modo aislada. En cada modo de operación se maneja consignas diferentes, de esta forma cuando la Microgrid está conectada a la red eléctrica pública los generadores dan la máxima potencia posible y cuando la Microgrid está aislada se comparte la potencia por medio de las curvas droop.

Se ha encontrado un modelo de pequeña señal de una Microgrid en modo aislado que permite estudiar la estabilidad del sistema. Este modelo no tiene en cuenta los lazos de control internos de corriente y voltaje de cada inversor ni la frecuencia de conmutación interna de los IGBT's. El omitir estos parámetros permite una mejor comprensión del funcionamiento del sistema.

REFERENCIAS

[1] R. H. Lasseter, and P. Paigi, "Microgrid: A conceptual solution," *Pesc 04: 2004 Ieee 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vols 1-6, Conference Proceedings, pp. 4285-4290, 2004.

[2] S. J. Chatzivasiliadis, N. D. Hatzigiorgiou, and A. L. Dimeas, "Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids," *2008 Ieee Power & Energy Society General Meeting*, Vols 1-11, pp. 878-883, 2008.

[3] D. O. Dike, and S. M. Mahajan, "Utilization of L-index in Microgrid Interconnected Power System Network," *2008 Ieee Power & Energy Society General Meeting*, Vols 1-11, pp. 916-921, 2008.

[4] M. Q. Mao, L. C. Chang, and D. Ming, "Integration and Intelligent Control of Micro-Grids with Multi-Energy Generations: A Review," *2008 Ieee International Conference on Sustainable Energy Technologies (Icset)*, Vols 1 and 2, pp. 777-780, 2008.

[5] D. Georgakis, S. Papathanassiou, N. Hatzigiorgiou et al., "Operation of a prototype Microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces," *Pesc 04: 2004 Ieee 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vols 1-6, Conference Proceedings, pp. 2521-2526, 2004.

[6] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547-2003, 2003.

[7] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas et al., "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems," *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1205-1213, 2004.

[8] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna et al., "Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters," *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1461-1470, 2006.

[9] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic et al., "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters," *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2346-2352, Sep, 2008.

[10] E. A. A. Coelho, P. C. Cortizo, and P. F. D. Garcia, "Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems," *Ieee Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 533-542, 2002.

[11] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas et al., "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems," *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1205-1213, 2004.

[12] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna et al., "Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters," *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1461-1470, 2006.

[13] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna et al., "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, 2007.

[14] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, Mar, 2007.

[15] H. Nikkhajoei, and R. Iravani, "Steady-state model and power flow analysis of electronically-coupled distributed resource units," *Ieee Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 721-728, Jan, 2007.

[16] A. L. Dimeas, and N. D. Hatzigiorgiou, "Operation of a multiagent system for Microgrid control," *Ieee Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1447-1455, Aug, 2005.

[17] A. Arulampalam, M. Barnes, A. Engler et al., "Control of power electronic interfaces in distributed generation Microgrids," *International Journal of Electronics*, vol. 91, no. 9, pp. 503-523, Sep, 2004.

[18] D. Georgakis, S. Papathanassiou, N. Hatzigiorgiou et al., "Operation of a prototype Microgrid system based on micro-sources equipped with fast-acting power electronics interfaces," *Pesc 04: 2004 Ieee 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vols 1-6, Conference Proceedings, pp. 2521-2526, 2004.

[19] J. Kim, J. Lee, and K. Nam, "Inverter-based local ac bus voltage control utilizing two DOF control," *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1288-1298, May, 2008.