

Control de inversores trifásicos mediante el método *droop* para microrredes eléctricas

L. Eloy Carrera Lumbarres

Resumen

El proyecto consiste en la simulación y control de una microrred eléctrica trifásica mediante el método de control *droop*. La microrred eléctrica, que contará con diversos inversores trifásicos, cargas locales e impedancias de línea, será construida en el entorno de simulación *Matlab-Simulink* utilizando la librería *SimPowerSystems*.

Mediante la técnica de control *droop* se pretende compartir la potencia entregada a las cargas sin la utilización de líneas de comunicación específicas entre los inversores. Además, implementando diversos lazos de control se pretenderá gestionar correctamente la energía intercambiada por los elementos de la microrred, ajustándola a los estándares europeos y permitiendo la conexión a la red eléctrica trifásica.

El diseño de los lazos aplicados a una microrred eléctrica realista será verificado mediante resultados de simulación obtenidos mediante el programa *Matlab-Simulink*.

1. Introducción

Hoy en día, la facilidad de adquirir generadores eléctricos por parte de particulares es cada vez más común. Las energías renovables y su accesibilidad a la producción en pequeña escala abren nuevos conceptos dentro del entramado eléctrico mundial.

La posibilidad de instalar pequeñas cantidades de paneles fotovoltaicos, pequeños aerogeneradores o generadores de combustión, convierten al pequeño y pasivo consumidor de energía eléctrica en un productor activo, con capacidad de autoabastecerse, de consumir energía procedente de la red, o incluso, de inyectar su energía sobrante a la red eléctrica. Con todo ello, el pequeño consumidor puede pasar a convertirse en el gestor de una microrred.

La proliferación de microrredes puede establecer a medio y largo plazo una red eléctrica cada vez más distribuida, en la que se difuminaría la separación entre zonas de producción y zonas de consumo eléctrico existentes hoy en día. Esto conlleva a la apertura de un nuevo campo de investigación y diseño en la ingeniería.

Sin embargo, el hecho de que el consumidor final se convierta en productor y almacenador de energía eléctrica atrae la necesidad de ejercer de gestor energético. La introducción de varias fuentes de energía conlleva un dominio en la microrred de los equipos de electrónica de potencia, que deben ser acoplados y sincronizados.

La interconexión entre los elementos productores de energía y la microrred, en el caso de una microrred AC trifásica, la mediarán inversores trifásicos (*Voltage-Source Inverters, VSI*). La conexión en paralelo de varios inversores sin el uso de complejas comunicaciones entre ellos se suele realizar mediante la utilización del método de control *droop*, objeto de estudio en este trabajo.

Por otro lado, el objetivo del trabajo será la simulación de una microrred eléctrica realista en el entorno *Matlab-Simulink*, que contendrá fuentes eléctricas, cargas locales y líneas, inspirada en una microrred real utilizada en [1] aplicándole el método de control *droop*. Posteriormente se aplicará el control *droop* secundario con el objetivo de amortiguar la caída de la tensión y la frecuencia producidas por el control *droop* primario al adecuar las potencias entregadas por cada inversor a las cargas conectadas en la microrred. Además se realizará un seguimiento de fase de la red eléctrica previo a su conexión con la microrred e intercambio de potencias entre ambas.

Finalmente, el objetivo global del proyecto será demostrar que una microrred es capaz de gestionar correctamente la energía ante cargas y fuentes distribuidas, que es capaz de integrarse en la red eléctrica o trabajar de modo aislado, y sobre todo, que es capaz de permitir un correcto balance de potencias activas y reactivas entre sus elementos conservando una calidad y estandarización de las señales superior a la exigida por la normativa europea. Definitivamente, se pretende demostrar que las microrredes son una apuesta viable y de futuro.

2. Microrred

En la figura 1 podemos observar el esquema de la microrred propuesta en este trabajo. Esta microrred, inspirada en una microrred real mostrada en [1], contiene una conexión a la red eléctrica trifásica (*Grid*). Esta microrred será la planta en torno a la que gire todo el trabajo de este proyecto.

La microrred de la figura 1 se compone, por un lado, de tres inversores trifásicos (G4, G5 y G6) que inyectan energía eléctrica procedente de tres generadores diferentes. Estos inversores serán implementados como un modelo promediado que permitirá simular tiempos muy largos, como los de este trabajo. Además, los lazos externos dominarán en el comportamiento del sistema en cuanto a señales de baja frecuencia por lo que el ruido producido por la conmutación no afectará a la gestión energética.

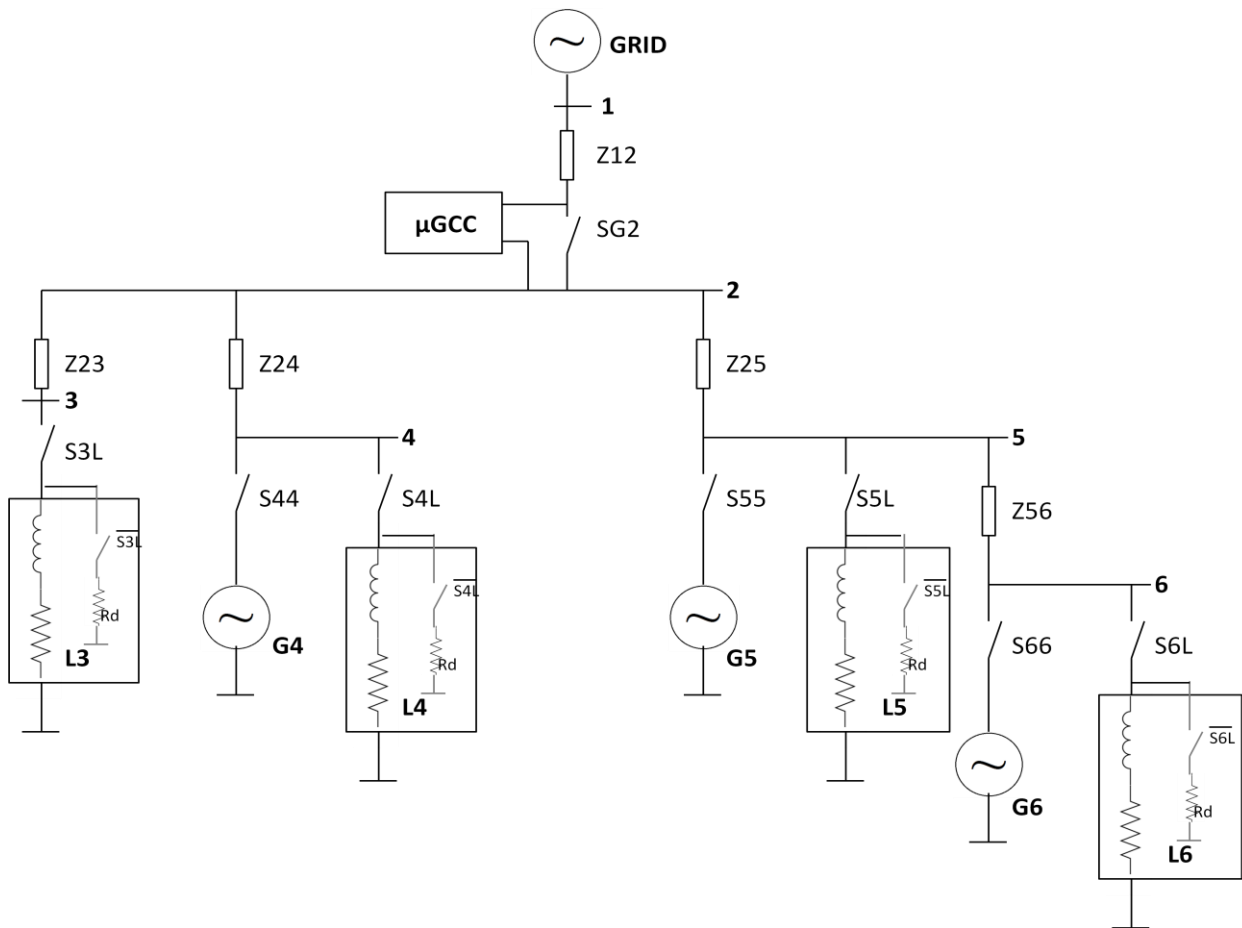


Fig. 1. Esquema de la microrred.

Por otro lado, se deben alimentar en la microrred cuatro cargas locales diferentes (L3, L4, L5, L6), cuyos valores se muestran en la tabla 1. Además, serán considerados los valores de línea (Z12, Z23, Z24, Z25, Z56) correspondientes a impedancias de línea y transformadores (tabla 2).

Asimismo, se introducirán unos interruptores (SG2, S3L, S44, S4L, S55, S5L, S66, S6L) para controlar los tiempos de conexión y desconexión de cada uno de los elementos principales desde el *μgrid central controller*.

	P[MW]	Q[MVAR]	Req[Ω]	Leq[mH]
L3	0.44	0	0.36	0
L4	0.5	0.34	0.21	0.47
L5	0.24	0.18	0.42	1
L6	0.414	0.28	0.26	0.566

Tabla 1. Valores de consumo de las cargas locales y sus equivalentes RL.

	R	L
Z12	2.973mΩ	14.69μH
Z23	2.9mΩ	46.7μH
Z24	7.83mΩ	50.1μH
Z25	1.3mΩ	28μH
Z56	8.82mΩ	13μH

Tabla 2. Valores RL de las impedancias de línea.

Por último, para evitar posibles roturas de componentes en un caso realista se ha introducido en paralelo a todas las cargas locales una resistencia con un valor típico de $R_d=1\Omega$ con un interruptor excitado por la señal de puerta negada del propio interruptor de su rama. Estos circuitos añaden una vía de escape para la energía contenida en la inductancia de la carga al abrirse el interruptor de su rama.

3. Control de la microrred

En una microrred como la implementada en este trabajo puede haber más de una fuente inyectando potencia en la microrred al mismo tiempo. En la figura 1 hemos podido observar que, en este caso, existen 3 fuentes de tensión.

Al realizar una conexión de inversores en paralelo pueden aparecer numerosas corrientes circulantes y es realmente sencillo que se produzca una desestabilización de todo el sistema muy rápidamente. Para controlar este aspecto, solamente utilizando mediciones locales y sin la utilización de comunicaciones entre los inversores se pretende utilizar el método de control *droop*. Este control pretende sincronizar la frecuencia entre inversores y equalizar su tensión.

El método *droop* ha sido ampliamente estudiado [3]-[5], y probada su robustez. El control *droop* es presentado comúnmente como un control jerárquico de tres niveles. En este apartado se pretende presentar el primero de ellos.

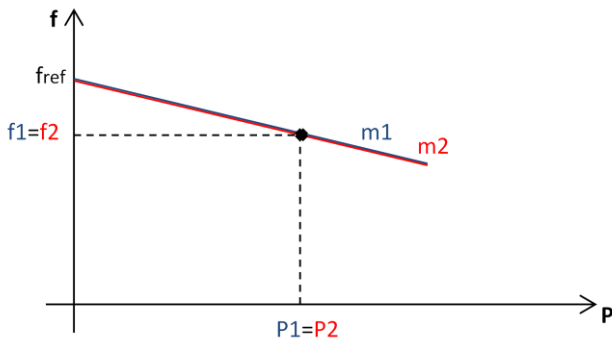


Fig. 2. Relación P-f del control droop ante constantes m iguales.

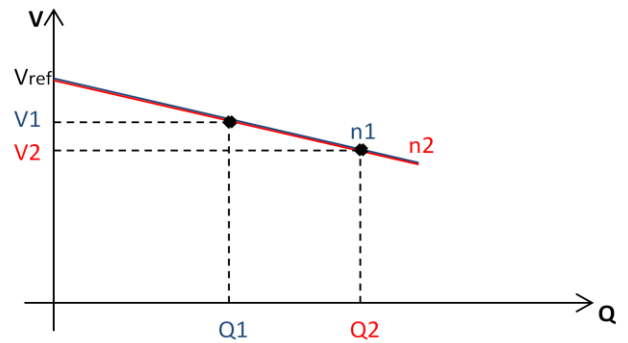


Fig. 4. Relación Q-V del control droop ante constantes n iguales.

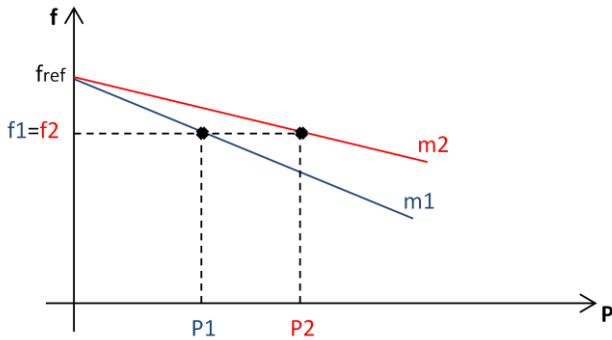


Fig. 3. Relación P-f del control droop ante constantes m diferentes.

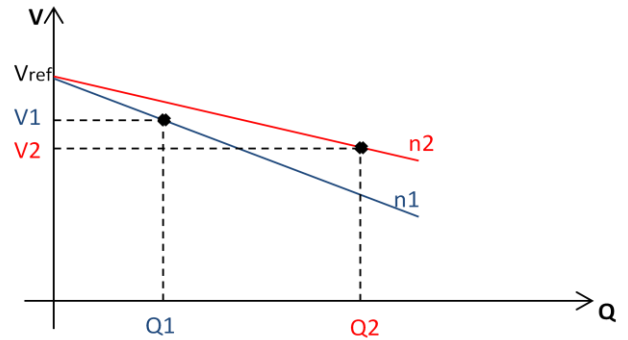


Fig. 5. Relación Q-V del control droop ante constantes n diferentes.

Mediante el método *droop* se pretenden obtener unas frecuencias y unas tensiones de referencia para que, posteriormente, actúen como referencias de control de los inversores. Las ecuaciones características del control *droop* se muestran en Ec. 1 y 2.

La ecuación 1 relaciona la potencia activa con la frecuencia, siendo que ambos parámetros tienen un comportamiento global en la microrred. De la misma manera, la ecuación 2 relaciona la tensión con la potencia reactiva, ambas variables de actuación más local en la microrred.

$$f = f_{ref} - m \cdot (P - P_0) \quad \text{Ec. 1}$$

$$V = V_{ref} - n \cdot (Q - Q_0) \quad \text{Ec. 2}$$

En ambas ecuaciones, f y V son el resultado del control que actuará como referencia para los inversores. V_{ref} y f_{ref} corresponden a la amplitud y frecuencia de la red eléctrica europea, 230V eficaces y 50Hz. Por otro lado, m y n son los parámetros proporcionales de control que deberán ser diseñados. Por último, P y Q corresponden a sus potencias medidas y P_0 y Q_0 en el caso de este primer nivel de control *droop* tendrán un valor de cero.

Una vez establecido el control *droop*, debe procederse a diseñar los parámetros m y n . Estos parámetros pueden ser diseñados iguales en todos los inversores o pueden ser diseñados con valores diferentes para cada inversor.

Si diseñamos un control *droop* en el que deseamos que dos inversores compartan esfuerzos a la hora de alimentar las

cargas tendríamos que diseñar los parámetros m iguales para los dos inversores. El comportamiento que tendría el control *droop* se muestra en la figura 2, por lo que se puede observar que las potencias activas entregadas por cada fuente serían iguales.

Por otro lado, en el caso en el que deseáramos un diseño del control *droop* en el que la entrega de potencia activa fuese diferente entre los dos inversores, deberíamos diseñar los parámetros $m_1 \neq m_2$. Este hecho provocaría el resultado mostrado en la figura 3. Obsérvese que en cualquiera de los dos casos la frecuencia del sistema es la misma para las dos fuentes, mientras que la potencia entregada depende de las constantes m_1 y m_2 .

Un caso similar ocurriría para la entrega de potencias reactivas, aunque en este aspecto nunca serán iguales ya que su control está ligado a la tensión. En un caso realista, el hecho de que existan impedancias de línea de diferentes longitudes y características provocará que las tensiones en los puntos de acoplamiento de las fuentes sean diferentes.

Por lo tanto, si deseamos diseñar un control *droop* en el que los inversores entreguen la misma potencia reactiva no conseguiremos tal efecto sin la implementación de otros lazos de control adicionales, pero podemos conseguir que la entrega de potencia reactiva sea similar entre las fuentes mediante parámetros n iguales, tal como se muestra en la figura 4. También, de la misma manera que con las potencias activas, se pueden diseñar valores diferentes para las constantes n (figura 5) ajustándolas a ciertas especificaciones de diseño, aunque siempre permanecerá una desviación de los valores deseados debidos a las diferentes tensiones en la microrred.

En este trabajo se tendrán en consideración ambas estrategias de diseño para las constantes m y n y se mostrarán ambos comportamientos en el siguiente apartado de resultados, primero realizando una estrategia de compartición de potencias activa y reactiva entre los inversores y, posteriormente, ajustando sus valores a la demanda de las cargas locales de cada inversor.

Por otro lado, diferentes autores pueden sugerir diferentes métodos de cálculo para la obtención de los parámetros m y n . En este trabajo se ha tenido en consideración la sugerencia del autor [4], expuesta en las ecuaciones 3 y 4, aunque ambos parámetros han sido finalmente ajustados mediante ensayos en las simulaciones en *Matlab-Simulink*.

$$m = \frac{\Delta f}{P_{max}} \quad \text{Ec. 3}$$

$$n = \frac{\Delta V}{2 \cdot Q_{max}} \quad \text{Ec. 4}$$

Además, en orden de simplificar la simulación y el control de la microrred trifásica se utilizará la transformada matemática de Clarke [6]. Esta transformada es altamente utilizada en sistemas trifásicos y realiza un cambio en las tres variables abc del sistema trifásico a dos variables $\alpha\beta$, tanto para la corriente como para tensión, utilizando solamente dos variables que incluyen toda la información de las tres.

Con el fin de conseguir una correcta operación de la microrred, no solamente será necesaria la aplicación del control *droop*. Ante el hecho de que varias fuentes estén entregando energía simultáneamente en la microrred surge una necesidad de sincronización de la fase entre cada una de las fuentes, por lo que será necesaria la implementación de un lazo de seguimiento de fase PLL. Este lazo, mostrado en la figura 6, será aplicado a las fuentes G4 y G6 para que sigan la fase de la fuente G5.

La aplicación del lazo de seguimiento de fase se realiza previamente al momento de conexión de cada generador. Para ello, se deben sensar las tensiones en ambos extremos del interruptor de acoplamiento del inversor a la microrred ($V_{\alpha\beta}$ y $V_{s\alpha\beta}$) y realizar su producto cruzado tal como en la ecuación 5.

Posteriormente, al resultado del producto cruzado se le aplicará un filtro pasobajos con frecuencia de corte inferior a la frecuencia de red para eliminar los armónicos que resultan de la ecuación 5 y se le aplicará un integrador para que el error del lazo tienda a cero. El producto de ambas funciones de transferencia es $G_c(s)$, mostrada en la ecuación 6. Finalmente, el error de fase compensado se sumará en las funciones de la tensión de referencia final de los inversores, tanto para la rama α como la β .

$$A_{ph} = V_{\alpha} \cdot V_{s\beta} - V_{\beta} \cdot V_{s\alpha} \quad \text{Ec. 5}$$

$$G_c(s) = \frac{0.025}{s^2 + 125.7 \cdot s} \quad \text{Ec. 6}$$

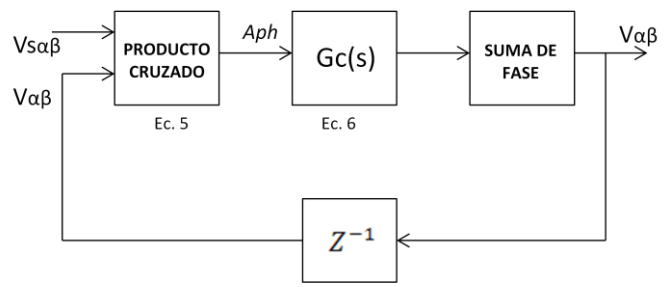


Fig. 6. Diagrama de bloques del lazo de seguimiento de fase.

Finalmente, en un caso realista, no solo deben considerarse las fuentes y la carga a alimentar, sino que existen cables de diferentes longitudes que suponen diferentes impedancias de línea en la microrred, como las mostradas en la tabla 2.

Al conectarse una de las fuentes de la microrred, aparece el problema en el que la impedancia que ve en su salida la fuente es tremendamente pequeña, por lo que tiende hacia una respuesta muy brusca. Para evitar la entrega de potencia brusca que tenderá a dar esta fuente al conectarse, se debe implementar un lazo de impedancia virtual en su control.

La tensión de referencia obtenida por el control primario para cada una de las fuentes vendrá, finalmente, expresada por la ecuación 7, donde Z_d es la función de transferencia de la impedancia virtual, que tendrá un comportamiento inductivo. La razón que lleva a la implementación de una impedancia virtual inductiva proviene de diversos análisis publicados cómo [8] que detectan un problema de controlabilidad en el control *droop* si el inversor tiene a su salida una impedancia equivalente puramente resistiva.

$$V_{ref}^* = V_{ref} - Z_d \cdot i_o \quad \text{Ec. 7}$$

4. Resultados del control primario

En este apartado se mostrarán los primeros resultados de simulación de la microrred con todas las especificaciones de control detalladas anteriormente. Con intención de probar el correcto funcionamiento del control *droop* primario se mostrarán dos estrategias diferentes para el diseño de los parámetros de control.

Con la primera estrategia (tabla 3), los resultados se encontrarán bajo la influencia de unos parámetros de control del lazo *droop* (m y n) iguales para los tres inversores, lo que llevará a que los inversores conectados a la microrred alimenten con la misma cantidad de potencia a las cargas conectadas.

Estrategia 1-Compartición de potencias		
G5,G6,G4	$m=10 \cdot 10^{-6}$	$n=100 \cdot 10^{-6}$
Estrategia 2-Potencias ajustadas a cargas locales		
G5	$m=10 \cdot 10^{-6}$	$n=100 \cdot 10^{-6}$
G6	$m=5.8 \cdot 10^{-6}$	$n=64.3 \cdot 10^{-6}$
G4	$m=4.8 \cdot 10^{-6}$	$n=53 \cdot 10^{-6}$

Tabla 3. Parámetros de control del lazo *droop* para los tres inversores.

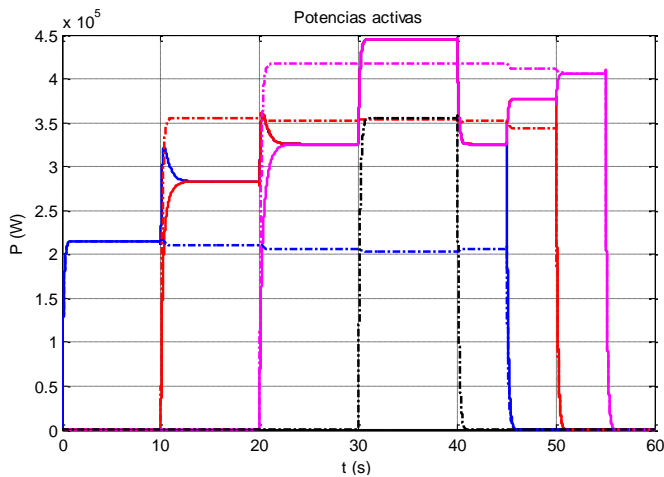


Fig. 7. Estrategia1: Potencias activas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

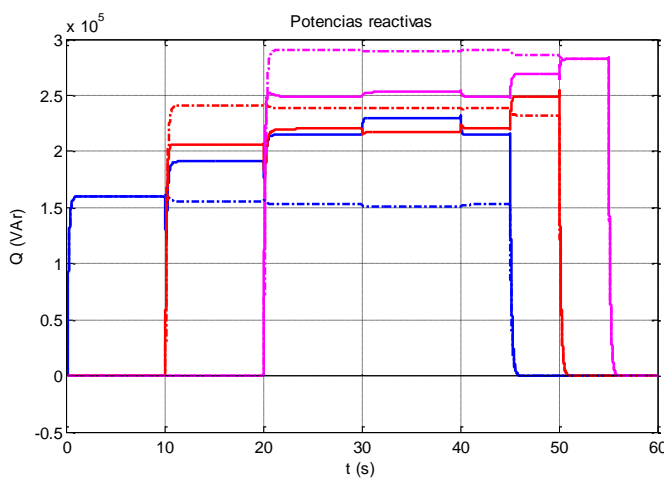


Fig. 8. Estrategia1: Potencias reactivas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

Por otro lado, con la segunda estrategia, los parámetros de control del lazo *droop* estarán ajustados individualmente para cada inversor para adecuar su entrega de potencia a los requerimientos de sus cargas locales.

Cabe recalcar que en este apartado de resultados la red se encontrará permanentemente desconectada, debido a que todavía no se han implementado los lazos de control suficientes como para que esta se encuentre entregando potencia a la microrred simultáneamente a los inversores.

Las figuras 7 y 8 muestran las potencias activas y reactivas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred bajo la estrategia de compartición de potencias (estrategia 1). Del mismo modo, las figuras 9 y 10 muestran los resultados para la estrategia 2. Ambas simulaciones han sido realizadas con la misma secuencia de valores lógicos de puerta para los interruptores de la microrred.

Al inicio de ambas simulaciones se conectan a la microrred la fuente G5 y su carga local L5, el generador alimenta su carga con algo más de 200kW (figuras 7 y 9) por lo que se produce una correcta alimentación de la carga local.

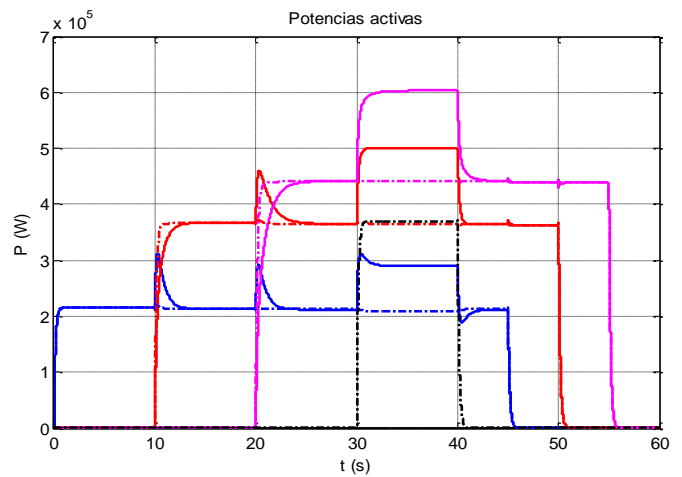


Fig. 9. Estrategia2: Potencias activas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

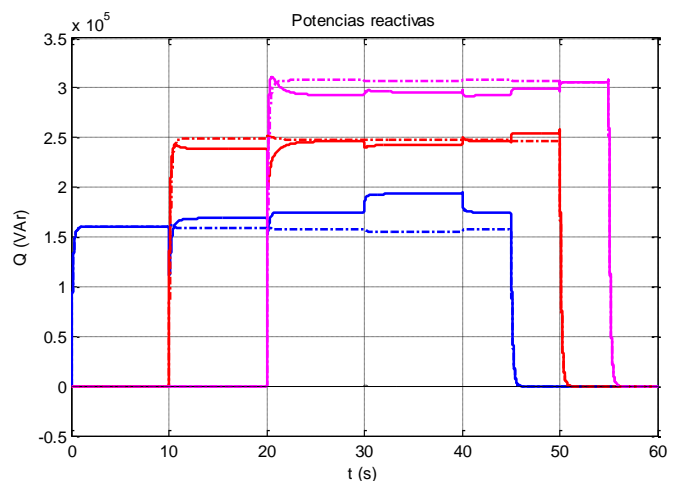


Fig. 10. Estrategia2: Potencias reactivas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

A los 10 segundos se conectan a la microrred el generador G6 y su carga local L6, también correctamente alimentada, y se puede observar como el diseño del control *droop* actúa según lo deseado, es decir, para la estrategia 1 las dos fuentes comparten la cantidad de potencia que entregan a las dos cargas conectadas y para la estrategia 2 la entrega de potencia tanto activa como reactiva se ajusta a la absorbida por su carga local.

Sin embargo, aunque para ambas estrategias se observa como las potencias activas se ajustan a los valores deseados en régimen estacionario, las potencias reactivas tienen un pequeño error respecto a lo deseado. Esto se debe a la relación entre la tensión y la potencia reactiva en el control *droop* y al hecho de que la tensión es una variable local en la microrred, es decir, no tiene el mismo valor en todos los puntos de la microrred debido a las impedancias de línea existentes.

Lo mismo sucede en el segundo 20, donde se conectan el generador G4 y su carga local L4. En la figura 7 se observa como las tres fuentes entregan la misma potencia activa, mientras que en la figura 9, la potencia entregada por cada inversor es la misma que la absorbida por su carga local.

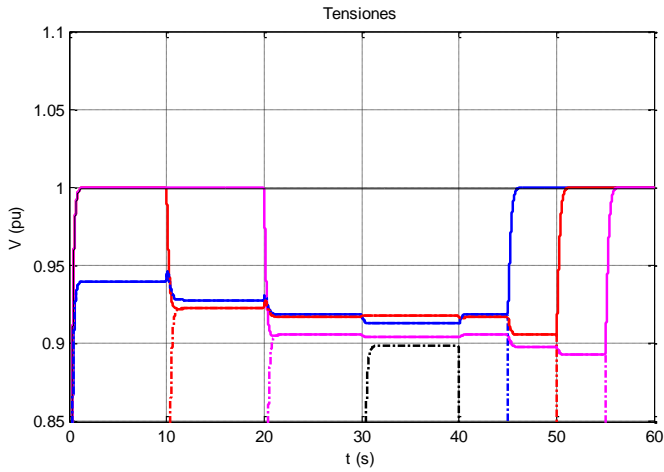


Fig. 11. Estrategia 1: Tensiones promediadas en valores pu en los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

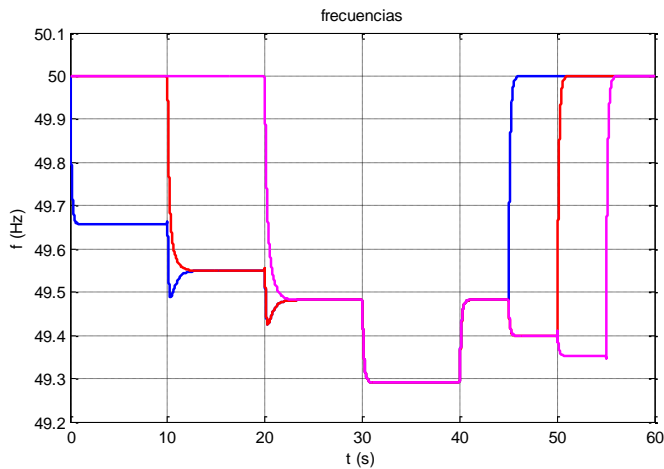


Fig. 12. Estrategia 1: Frecuencias de las tensiones de salida de los tres inversores. Azul-G5, Rojo-G6, Magenta-G4.

A los 30 segundos se conecta la carga L3 y, en ambas estrategias, los tres inversores aumentan proporcionalmente su entrega de potencia para alimentar esta carga. Al ser L3 una carga puramente resistiva no aumenta significativamente la potencia reactiva entregada por los inversores, aunque si se produce una pequeña variación debida a la impedancia de línea Z23. De la misma manera, a partir del segundo 40 podemos observar el correcto comportamiento del sistema ante continuas desconexiones.

En las figuras 11 y 12 se puede observar la acción del control droop en las tensiones de los elementos de la microrred (en valores por unidad sobre el valor nominal) y las frecuencias de las señales de salida de los tres inversores. Aunque ambas figuras corresponden a la simulación para la estrategia 1 sirven para explicar los efectos que suceden en ambos casos.

Tanto en la figura 11 como la 12, se puede observar como la acción del control droop produce una desviación en las tensiones y en las frecuencias de los inversores. Sin embargo, hasta el segundo 20 y a partir del segundo 45 se ven como algunos inversores permanecen sobre la tensión nominal (1pu) y la frecuencia nominal (50Hz) sin sufrir variaciones debido a que se encuentran desconectados y el control droop no actúa.

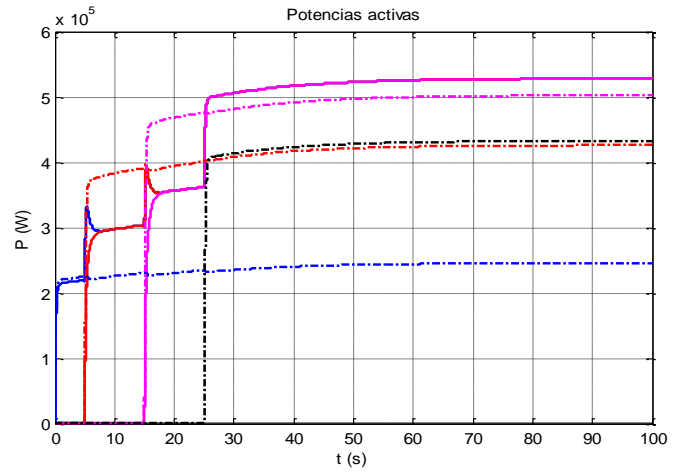


Fig. 13. Lazo secundario: Potencias activas entregadas o absorbidas en la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

5. Control droop secundario

En los resultados del apartado anterior se pudo observar como, por la acción del control droop primario, las tensiones y las frecuencias de las señales se desvían de sus valores normalizados (50 Hz y 230V) en función de las potencias activas y reactivas demandadas. Si se desea conectar la microrred a la red eléctrica se debe conseguir cumplir con la normativa europea (desviación máxima de $\pm 0.1\text{Hz}$, [7]), además de conseguir acercar la tensión, en el punto de acoplamiento entre la red y la microrred, a un valor nominal correcto.

Para ello se aplicará el lazo de control droop secundario en el punto de acoplamiento a la red (nodo 2), donde los errores de tensión y frecuencia serán compensados por un PI y sumados al control droop primario tal como muestran las ecuaciones 8 y 9.

Al ser este el lazo más externo se requiere que sea especialmente lento. Las acciones de control vendrán dadas por unos constantes proporcionales e integrales de los PI muy suaves, y la acción de control será dada a cada inversor mediante comunicaciones una vez por segundo.

$$f = f_{ref} - m \cdot P + PI(f_{2ref} - f_2) \quad \text{Ec. 8}$$

$$V = V_{ref} - n \cdot Q + PI(V_{2ref} - V_2) \quad \text{Ec. 9}$$

Las figuras 13, 14 y 15 muestran los resultados del control secundario. La estrategia del control primario para esta simulación será la de compartición de potencias (estrategia 1). De la misma manera que en el apartado anterior se realizará una conexión progresiva de los elementos de la microrred tal como se puede observar en la gráfica de potencias activas (figura 13). Posteriormente, a partir del segundo 25 se esperará el suficiente tiempo como para comprobar que la acción del control secundario lleva las tensiones y las frecuencias a estado estacionario.

En la figura 14 se muestra la gráfica de las frecuencias de las señales de salida para los tres inversores donde se

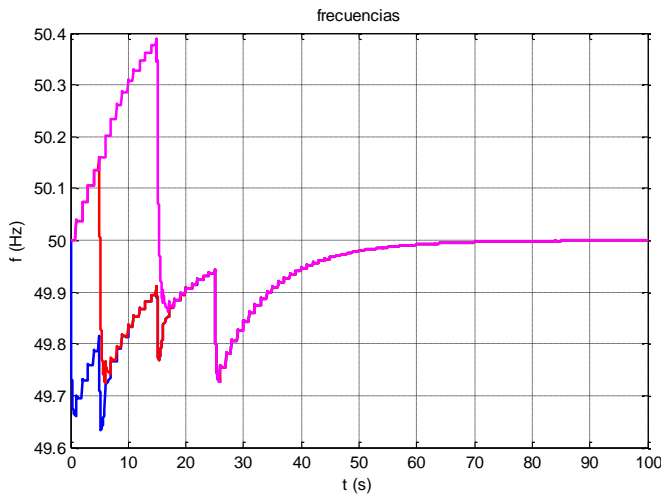


Fig. 14. Lazo secundario: Frecuencias de las tensiones de salida de los tres inversores. Azul-G5, Rojo-G6, Magenta-G4.

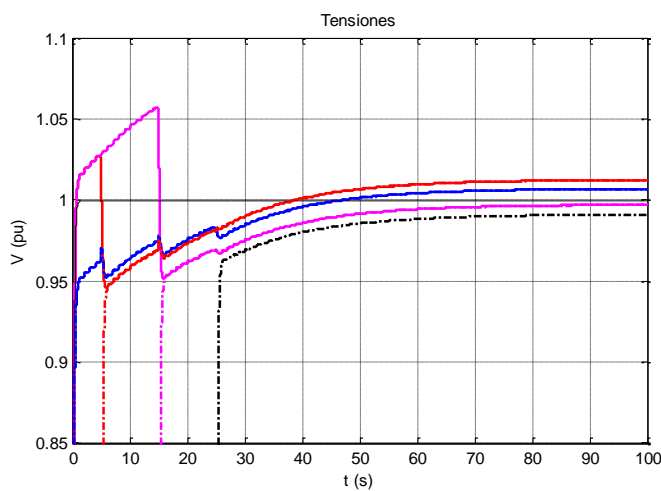


Fig. 15. Lazo secundario: Tensiones promediadas en valores pu en los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul-L5, Rojo-G6, Rojo-L6, Magenta-G4, Magenta-L4, Negro-Red, Negro-L3.

observan los pequeños escalones producidos por el retardo de un segundo introducido en la comunicación.

Inicialmente podemos observar que la frecuencia de la señal de la fuente G5 (azul) tiene una tendencia ascendente hacia los 50Hz. Una vez se conecta la fuente G6 (rojo) ambas frecuencias descienden ligeramente debido al aumento de carga a alimentar, pero rápidamente tienden conjuntamente a ascender hacia el valor nominal. A los 15 segundos se conectan la fuente G4 con su carga local y a los 25 segundos la carga resistiva, produciendo el mismo efecto. Una vez en el segundo 25 se muestra como las tres frecuencias conjunta y progresivamente llegan al estado estacionario alrededor del segundo 60, alcanzando los 50Hz. Sin embargo, en los primeros segundos de simulación, las fuentes no conectadas tienden hacia un valor superior al deseado. Esto es debido a que el control secundario actúa en proporción a las fuentes que están conectadas, pero su resultado se aplica a todas las fuentes. Indistintamente, al producirse este efecto en inversores que no están conectados, no altera en ningún momento la correcta gestión de la energía.

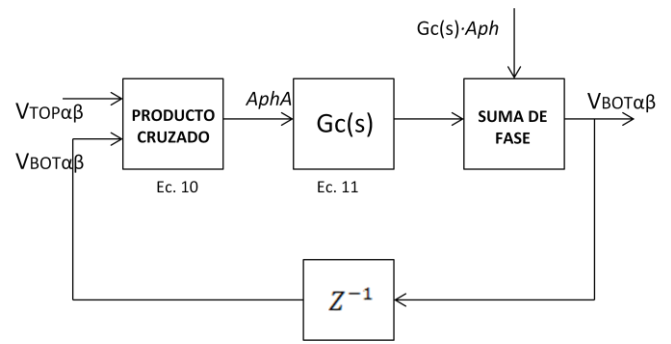


Fig. 16. Diagrama de bloques del lazo de seguimiento de fase de red.

Lo mismo sucede en la figura 15 con el control secundario aplicado a las tensiones, aunque en este caso se pueden observar diferentes errores en estado estacionario para cada tensión. Esto es debido a que la tensión es una variable local en el sistema, a que existe una caída de tensión en las impedancias de línea y a que el lazo secundario ha sido aplicado para que el error de la tensión tienda a cero en el nodo 2.

6. Conexión a la red

Si se desea conectar la red eléctrica con la microrred de este trabajo se deben sincronizar las fases de todas las fuentes y de la red antes de realizar la conexión. En este apartado se implementará un lazo de seguimiento de fase de red similar al introducido en el apartado 3, cuya acción será aplicada a los tres inversores en los momentos previos a la conexión a la red, ya que no es posible actuar sobre las señales de red. En el caso de los inversores G4 y G6 ambos lazos de seguimiento de fase se aplicarán simultáneamente.

Para la aplicación de este lazo, mostrado en la figura 16, se deben sensar las tensiones en ambos extremos del punto de acoplamiento de la red a la microrred (interruptor SG2) y realizar el producto cruzado de ambas tensiones ($V_{top\alpha\beta}$ y $V_{bottom\alpha\beta}$) tal como muestra la ecuación 10. De la misma manera que en el apartado 3, se le aplicará al resultado el LPF+I de la ecuación 11 y se sumará su fase a la tensión de referencia de los inversores.

$$Apha = V\alpha_T \cdot V\beta_B - V\beta_T \cdot V\alpha_B \quad \text{Ec. 10}$$

$$Gc(s) = \frac{0.025}{s^2 + 125.7 \cdot s} \quad \text{Ec. 11}$$

En las figuras 17 y 18 se muestran los resultados de este apartado. Inicialmente y hasta el segundo 100 la simulación será exactamente igual que en el apartado anterior, momento en el que se conectará la red eléctrica a la microrred. En el momento de la conexión a la red el control droop deja de actuar y los inversores siguen las consignas de P0 y Q0 mostradas en las ecuaciones 1 y 2, que hasta ahora habían sido desactivados.

En el momento en el que se conecta la red (segundo 100) el µgrid central controller entrega a los inversores consignas de P0 y Q0 por el valor de potencia que estaban entregando.

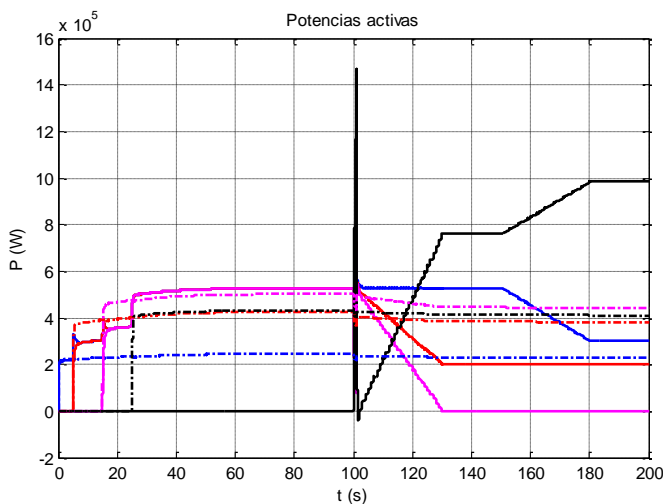


Fig. 17. Conexión a red: Potencias activas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul---L5, Rojo-G6, Rojo---L6, Magenta-G4, Magenta---L4, Negro-Red, Negro---L3.

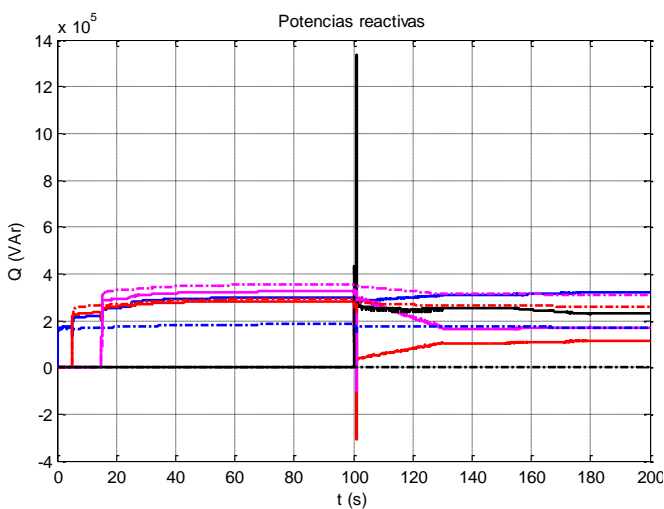


Fig. 18. Conexión a red: Potencias reactivas entregadas o absorbidas por los elementos de la microrred. Azul-G5, Azul---L5, Rojo-G6, Rojo---L6, Magenta-G4, Magenta---L4, Negro-Red, Negro---L3.

En la figura 17 se observa como en el segundo 100, al conectarse la red, se produce un pico en la entrega de potencia por parte de la red debido a la ausencia de un sistema *soft-start* que podría implementarse en futuros avances de este trabajo. Rápidamente la entrega de potencia de la red retorna a 0, ya que las consignas de P0 de los inversores son similares a la potencia que estaban entregando.

A partir de este punto, la entrega de potencia activa por parte de la red va aumentando en función a la disminución de la entrega por parte de las fuentes. Este aspecto es producido ya que se pretende demostrar el correcto funcionamiento del sistema ante variaciones continuas de consigna de potencia activa una vez conectada la red, ya que en un caso real, la energía suministrada por los inversores de una microrred podría provenir de fuentes de energía renovables, cuya producción puede estar sujeta a variaciones meteorológicas.

Finalmente, en la figura 18 se muestran las potencias reactivas en el sistema. Aunque las consignas de potencia

reactiva son constantes se pueden observar pequeñas variaciones debidas a las variaciones de la tensión en el mismo punto.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha experimentado con una microrred realista inspirada en datos procedentes de la bibliografía. El principal objetivo ha sido realizar una correcta gestión de la energía de la microrred utilizando el método de control *droop*, la cual ha sido logrado con éxito.

Los resultados de las simulaciones construidas en el entorno *Matlab-Simulink* han demostrado el correcto funcionamiento del sistema ante diferentes estrategias de diseño con el control *droop* primario, permitiendo múltiples situaciones de conexión y desconexión de los elementos de la microrred, demostrando una gran flexibilidad del sistema y una gran robustez.

Posteriormente se ha ampliado el estudio en diferentes aspectos. Se ha introducido un lazo secundario del control *droop* con el objetivo de corregir las desviaciones de tensión y frecuencia que produce la propia acción de control, demostrando una perfecta adaptación a los límites establecidos por la normativa europea.

Para concluir el trabajo, se ha añadido un lazo de seguimiento de fase para el punto de acoplo entre la red y la microrred, permitiendo la opción a la microrred de trabajar de forma aislada o conectada a la red. Los resultados de las simulaciones han demostrado una correcta gestión de la energía ante ambas opciones permitiendo una gran flexibilidad ante los niveles de producción de las fuentes de la microrred.

Mediante la realización de este trabajo se ha podido demostrar que un modelo de red distribuida mediante microrredes es un sistema viable, eficiente, y sobre todo, flexible. La aplicación de este tipo de microrredes en un futuro podría provocar un incremento notable en la producción mediante energías renovables a pequeña escala y podría cambiar el rol del pequeño consumidor en el sistema energético global, aportándole más protagonismo y autonomía.

Finalmente, cabe recalcar que la construcción de una microrred real no sólo necesitaría de un trabajo entorno al control electrónico de la misma, sino que necesitaría trabajos en campos como las telecomunicaciones, la informática o la electrotecnia, por lo que diferentes especialidades en la ingeniería podrían aportar valiosos trabajos en el campo de las microrredes.

Referencias

- [1] Robert Lasseter, P. Piagi. "Providing premium power through distributed resources". Universidad de Wisconsin-Madison, 33rd Hawaii International Conference, 2000.
- [2] Eloy Carrera, Jorge Jiménez. "Control de un inversor fotovoltaico conectado a la red eléctrica trifásica" PFC, Enero 2011.
- [3] Josep M. Guerrero, Juan C. Vásquez, José Matas, Miguel Castilla, and Luis García de Vicuña. "Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-

Interactive UPS Systems". IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, pp.726-736, March 2009.

[4] Josep M. Guerrero, Mukul Chandorkar, Tzung-Lin Lee, Poh Chiang Loh. "*Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control*". IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp.1254-1262, April 2013.

[5] Josep M. Guerrero, Mukul Chandorkar, Tzung-Lin Lee, Poh Chiang Loh. "*Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids*". IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp.1263-1270, April 2013.

[6] Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. "*Voltage-Sourced Converters in Power Systems*". New Jersey, John Wiley & Sons, 2010.

[7] "Technical paper – Definition of a set of requirements to generating units," UCTE 2008.

[8] Jinwei He, Yun Wei Li "*Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation*". IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 47, no. 6, pp.2525-2538, November/December 2011.