



Identificación del Trabajo	
Área:	Energía
Categoría:	Doctorando
Regional:	Santa Fe

Propuesta de micro-red eléctrica para estudios de operación y optimización. Topología, generación y demandas

Ariel LOYARTE

Grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Facultad Regional Santa Fe, UTN

E-mail de contacto: aloyarte@frsf.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Jorge Vega, en el marco del proyecto "Técnicas Numéricas de Estimación y Optimización: Aplicaciones en Problemas de Nanotecnología y de Energía Eléctrica" (PID 25/O147 FRFSF-UTN).

Resumen

Se exhibe una propuesta de topología y estructura de composición de una micro-red para transmisión de energía eléctrica. Se pretende sentar las bases para la implementación de un futuro algoritmo de optimización abocado a la gestión en línea de la misma. Para ello se conforman una serie de indicadores que definen su estado de operación, y se desarrolla en MATLAB un script que los computa previa ejecución de la metodología de cálculo de flujos de potencia. Para la caracterización de la red se definen el tendido de la terna de conductores, dimensiones, tipos y disposición de fuentes de generación (fomentando la participación de energías alternativas), y demandas residenciales e industriales.

Palabras Claves: Micro-red; Energías alternativas

1. Introducción y Objetivos

1.1. Micro-redes como paradigma de la transmisión de energía eléctrica

La transmisión de la energía eléctrica desde las plantas generadoras hasta los centros de consumo se realiza habitualmente a partir de redes malladas de gran extensión. De esta manera se logra incorporar a la red incluso a cargas muy alejadas de las grandes centrales generadoras del país. En Argentina, éste es el caso del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

La ventaja de una red de semejante envergadura está en la posibilidad de aprovechar instalaciones de generación de gran porte (muchas veces con objetivo de aprovechar recursos naturales importantes, como el hídrico), para alimentar consecuentemente a un número también importante de consumidores que pueden estar distribuidos en una región muy amplia.

Asimismo, el mallado de la red favorece la existencia de múltiples alternativas en cuanto a los flujos de la energía para proveer del servicio en forma permanente a cada consumidor. Sin embargo, la necesidad de disminución de las pérdidas a lo largo de las grandes distancias recorridas por las líneas de transmisión, hace necesario elevar los niveles de tensión con vistas a la disminución consecuente de las magnitudes de corriente (y por ende de las pérdidas). Posteriormente, la tensión debe ser reducida para la distribución en las zonas urbanas y

disminuidas a un valor aún menor para la prestación final del servicio. Esto implica una infraestructura costosa y exigente de mantenimiento, control y operación coordinada, para sostener una calidad de suministro adecuada.

Como contrapartida del sistema de transmisión y distribución descrito surge el paradigma de las micro-redes (Chowdhury et al., 2009). Se trata, en este caso, de un sustituto para un sistema interconectado por otro compuesto por redes más pequeñas que cubren regiones reducidas tales como una localidad o un parque industrial. En una micro-red participan fuentes de generación de baja potencia, puesto que se requiere suplir a demandas también menores que las contempladas en una red como el SIN. Aquí cada generador dispone de los correspondientes sistemas de control de frecuencia y tensión, pero a su vez existe un controlador global, cuya función radica en establecer las consignas de potencia y tensión para la totalidad de generadores de la micro-red, con vistas a la operación óptima de la misma (Mohamed, 2007). El punto óptimo de trabajo puede fijarse según diferentes criterios, siendo una primera proposición la operación en el punto de menor costo de generación global de la micro-red (Abido, 2003).

En lo hasta aquí descrito no se perciben diferencias sustanciales con una red interconectada tradicional de alcance nacional. No obstante, un número reducido de generadores que operan separados por distancias no muy grandes, favorecen el accionar del controlador global de la micro-red. En una red como el SIN la comunicación necesaria entre el controlador y la inmensa lista de agentes generadores que participan del Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) no es completa; no es posible que la totalidad de generadores reciba una señal de consigna, ; pues la infraestructura de comunicación es costosa dados los exigentes requerimientos técnicos del sistema. Mientras que en una micro-red, esta forma de operación puede lograrse sin inconvenientes sólo por el hecho de su pequeña extensión (Mohamed, 2008).

Por otra parte, dadas las reducidas potencias de generación requeridas para una micro-red, algunas formas de generación alternativa pueden resultar relevantes, ya que se precisa en este caso de menores inversiones para implementar una instalación que aporte al sistema con una cuota de energía significativa sobre el total. En otras palabras, las bajas potencias de generación necesarias pueden hacer competitivas a las energías alternativas. Entre ellas se destaca la generación *fotovoltaica* y *eólica*. Aunque también pueden considerarse las *celdas de combustible*, que convierten la energía potencial química de un combustible directamente en energía eléctrica, y que pese a no emplear un recurso renovable, evitan el uso de las conversiones electromecánicas que utilizan las centrales convencionales y que afectan al rendimiento de la instalación.

Como ventaja adicional, para cortas distancias de transmisión las pérdidas se reducen y es posible operar en baja o media tensión. Incluso es particularmente conveniente operar la red completa en un único nivel de tensión (eventualmente se emplean transformadores de distribución previo al consumidor final). Esto último evita la necesidad de Estaciones Transformadoras (ET); grandes instalaciones con mantenimiento asociado.

1.2. Objetivos

En el presente trabajo se propone la estructura de una micro-red aplicable a una región que dispone de consumos residenciales e industriales, con vistas a ser objeto de estudio en el diseño de un mecanismo de operación controlado en tiempo real. El algoritmo de optimización se diseñará en un futuro y tomará como punto de partida la micro-red aquí propuesta, y los

indicadores de operación que también se proponen como medición de la calidad del servicio de transmisión.

Conjuntamente se desarrolla en MATLAB, seleccionada como plataforma de trabajo, un programa que resume la estructura de la micro-red y ejecuta, a partir de una propuesta de generación y demandas, un cálculo de *flujo de potencia* mediante el método de Gauss-Seidel. Este script será utilizado como componente del futuro algoritmo de optimización, ya que permite definir los indicadores sobre los cuales se decidirá el punto óptimo de operación de la micro-red.

2. Metodología

2.1. Decisión sobre la topología de la micro-red

En general, las propuestas de micro-redes que pueden encontrarse en la bibliografía (Chowdhury et al., 2009; Mohamed, 2007 y 2008) utilizan un sistema de distribución *radial*, caracterizado por su simpleza. Sin embargo, en estos casos no se considera la posibilidad de hechos inesperados tales como una falla transversal (cortocircuito) y el consecuente accionar automático de interruptores para despejar la misma. Estos eventos discretos modifican la topología de la red en un instante, y en una red radial pueden eventualmente quedar cargas desconectadas, sin energía.

Con vistas a reducir la probabilidad de hechos como el mencionado, se considera una micro-red *mallada* como la propuesta en la Figura 1. En ella se disponen doce (12) barras para la conexión de cargas y generadores; y para estudiar el comportamiento de la misma ante la mayor diversidad de cargas y fuentes posible, se distinguen tres zonas particulares: una *zona rural*, poco habitada o con espacio disponible para la instalación de paneles fotovoltaicos y generadores eólicos, una *zona residencial* y una *zona industrial*. Se supone que los consumos residenciales e industriales presentan curvas de carga diferentes.

Las dimensiones propuestas se indican en el mismo esquema de la Figura 1.

2.2. Propuesta de generación y consumos

La Figura 1 muestra a su vez la propuesta de ubicación de cargas (L) y generación sobre los distintos nodos de la red. De la misma participan generadores a partir de motores diesel (DG), micro turbinas de gas operando mediante el ciclo de Joule-Bayton (MT), generadores fotovoltaicos (PV), aerogeneradores (WT), una celda de combustible (FC) y un banco de capacitores para inyección de potencia reactiva (C).

Se observa que algunos tipos de generación (PV y FC) operan en corriente continua, con lo que es necesario la conversión a corriente alterna. Algo similar ocurre con la generación eólica (WT), donde se obtiene una tensión alterna pero cuya frecuencia depende del viento.

Para definir el orden de magnitud de las potencias de trabajo se considera a cada centro de generación de la siguiente manera (capacidad instalada de la micro-red):

- DG: 3 grupos diesel de 850 kW (total: 2550 kW).
- MT: 4 microturbinas de gas de 75 kW (total: 300 kW).
- FC: Celda de combustible de 1400 kW.
- PV: 500 paneles de 100 W (total: 50 kW).
- WT: 40 aerogeneradores de 2 kW (total: 80 kW).

Para cada demanda se considerará un máximo factible de 200 kVA para cargas residenciales (con un factor de potencia del orden de 0,75), y 1000 kVA para cargas industriales (con un factor de potencia del orden de 0,85).

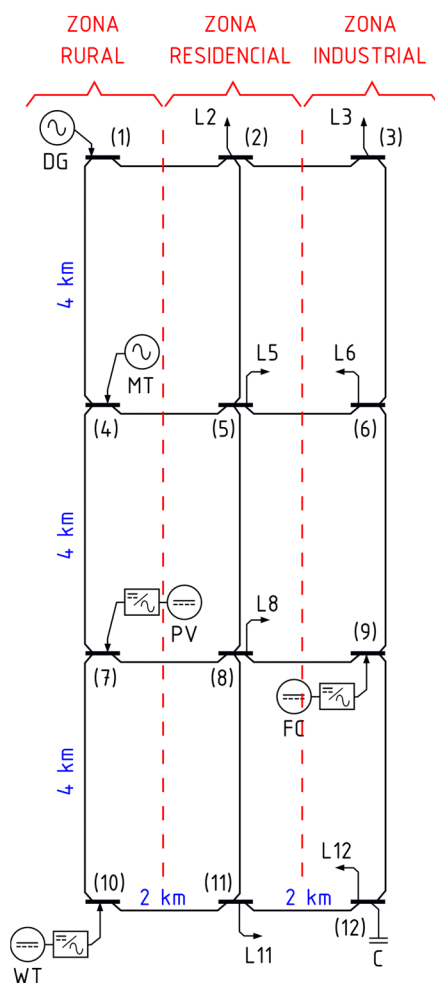


Figura 1. Esquema de la micro-red propuesta.

2.3. Modelado de las líneas y pérdidas de transmisión

Una simplificación surge de despreciar las pérdidas de transmisión, justificándose en la corta longitud de las líneas (Mohamed, 2008). Para que la aproximación sea efectiva, debieran también despreciarse las reactancias. Sin embargo, en este caso se imposibilita definir la calidad del servicio de transmisión puesto que no puede percibirse el efecto de las caídas de potencial.

Además, si la sección de conductores se reduce respecto de las utilizadas en alta tensión (por disponer de menores longitudes), es posible que las pérdidas sean más significativas.

Para evitar estos inconvenientes, tales simplificaciones no son consideradas y se propone modelar cada línea a partir del modelo π de parámetros concentrados, como se esquematiza en la Figura 2. En ésta, R y X_L representan la resistencia y reactancia inductiva serie, respectivamente; mientras que B_c es la susceptancia capacitiva transversal. Para líneas tan cortas como las aquí tratadas, B_c puede despreciarse.

Para determinar los parámetros de cada línea es preciso seleccionar el tipo de conductor y la disposición de la terna de fases, lo cual estará condicionado por la tensión de operación.

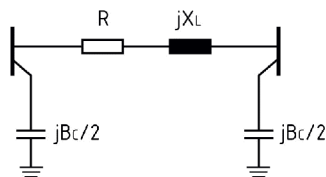


Figura 2. Modelo *Pi* de una línea de transmisión.

Para el caso se escoge un único nivel de tensión para toda la micro-red, con valor nominal de 13,2 kV (tensión compuesta); proponiéndose líneas trifásicas en disposición coplanar horizontal, con conductores contiguos separados 70 cm. Las líneas se constituyen a partir de conductores desnudos de aluminio reforzado en acero (ACSR).

Los cálculos realizados en las primeras pruebas se realizaron para un conductor ACSR 35/6, según la norma IRAM 2187-1. Los parámetros generales se obtienen de un catálogo de fabricante (CIMET S.A.) y se particularizan (adaptan) a la disposición adoptada para la tres fases.

2.4. Indicadores de operación de la micro-red

Con objeto de definir en forma cuantitativa el estado de operación de la red, necesario para establecer las bases de un futuro algoritmo de optimización, se han conformado una serie de indicadores que se describen a continuación.

- Promedio de los módulos de las tensiones en cada una de barras de la red. Indicador general de la calidad del servicio de transmisión.
- Promedio de los módulos de las tensiones de las barras de carga.
- Pérdidas, o potencia activa disipada en las líneas. Indicador de eficiencia de operación.
- Ídem anterior, pero relativas a la totalidad de la potencia activa generada.
- Proporción de potencia (activa) generada vía formas renovables sobre el total. Indicador de aprovechamiento energético renovable. Se destaca que tal aprovechamiento varía en el tiempo, según las condiciones climatológicas.
- Proporción de potencia (activa) generada mediante formas alternativas (PV, WT y FC) sobre el total. Similar al anterior, pero con el agregado de la potencia generada mediante la celda de combustible. Se considera, producto de su mejor rendimiento, que es menos contaminante con CO₂ y productos azufrados que la generación DG o MT.
- Costo horario total de generación. Contabilizado a partir de los caudales de combustible requeridos para cada caso (DG, MT y FC). Dichos caudales se relacionan con las potencias generadas a partir de correspondientes modelos matemáticos (Mohamed, 2008), seleccionados de acuerdo a la forma de generación.
- Costo horario para mitigar emisiones contaminantes. Se utilizan modelos simplificados a relaciones estimadas entre la potencia activa generada (por tipo de generación) y el costo horario necesario para mitigar cada tipo de contaminante atmosférico, y reducirlo a valores admisibles (Bernow y Marron, 1990; Morgantown, 2001; Pipattanasomporn et al., 2005).

2.5. Script MATLAB para cálculos de flujos de potencia

Para las líneas modeladas conforme la sección 2.3, puede determinarse cualquier variable del sistema a partir de un cálculo algebraico, si se conocen las tensiones en los nodos de la red.

Determinar las tensiones implica realizar un cálculo de *flujos de potencia*, a partir de un método numérico iterativo de resolución de un sistema de ecuaciones no lineales con variables complejas, al que puede reducirse el planteo del problema. Para el caso se ha desarrollado un script de MATLAB que ejecuta dichos cálculos a partir del procedimiento de Gauss-Seidel.

El script dispone del modelo de la micro-red a partir de de los parámetros de las líneas y la clasificación de cada barra según los puntos de vinculación de generadores y demandas.

Se ha establecido a la barra 1 (conexión de generadores diesel) como *barra de compensación*, es decir, como aquella encargada no sólo de aportar al sistema para satisfacer la demanda, sino también de generar una cantidad extra para cubrir la totalidad de las pérdidas.

La ejecución del programa exige que previamente se asignen las demandas a cubrir, la potencia activa que se pretende inyecten cada uno de los generadores y la tensión (módulo) en cada barra de generación. El resultado, luego de la ejecución, está dado por la tensión (valor complejo) de cada una de las barras y los flujos de potencia (activa y reactiva) a través de las líneas. A partir de éstos el programa realiza un post-procesamiento para determinar los indicadores definidos en la sección anterior.

3. Resultados y Discusión

La finalidad última de la propuesta de micro-red es servir de base para estudios de las formas de operación de la misma. En particular interesa un funcionamiento óptimo que determinará, a partir del correspondiente algoritmo de optimización, las consignas de potencia activa y módulo de tensión para cada generador.

El algoritmo de optimización no ha sido diseñado aún, pero se prevé una optimización multi-objetivo contemplando algunos de los indicadores especificados en la sección 2.4.

El procedimiento sistemático seguido para operar la red en todo instante en su punto óptimo debe ejecutarse en línea, dado que las condiciones climáticas que afectan a la generación fotovoltaica y eólica, junto con las demandas, pueden variar continuamente.

La Figura 3 grafica el esquema de funcionamiento propuesto, para un ciclo de cálculo que se repite a intervalos regulares de tiempo (cada hora, por ejemplo), para redefinir las consignas hacia los generadores y, por ende, el estado de operación de la micro-red.

Primeramente se determinan las condiciones climatológicas del momento: temperatura ambiente, radiación solar y viento. A partir de éstas y de los modelos estáticos de generación de las centrales fotovoltaicas y eólicas, se determina la potencia activa que se obtiene.

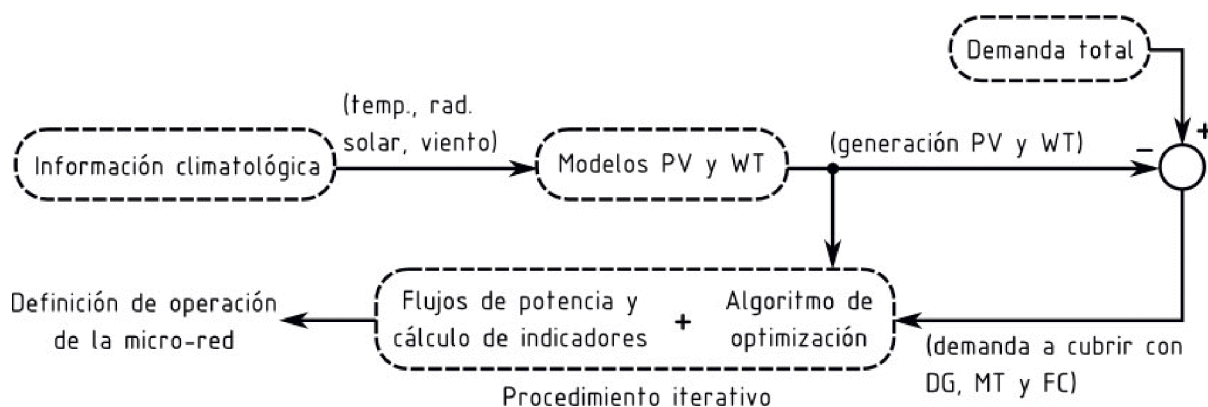


Figura 3. Gestión de la micro-red.

Puesto que se contempla aprovechar en todo momento la energía que pueda obtenerse vía fuentes renovables e inyectarla a la red, la diferencia entre la demanda total (potencia activa) y la obtenida mediante PV y WT, obtiene la carga que debe ser cubierta por los restantes tipos de generación. Este último dato se utiliza en el procedimiento iterativo que combina el script diseñado de cálculo de flujos de potencia e indicadores con el algoritmo de optimización, y cuyo resultado terminará por definir el estado de operación de la red.

La metodología de optimización a implementar determinará el criterio a partir del cual el controlador global de la red decide cuáles serán las consignas emitidas hacia cada generador.

Para la realización de pruebas se trabaja con información provista por el Centro de Información Meteorológica (CIM), de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina.

Para ejemplificar el uso de la información meteorológica y modelos de generación, se exhiben en la Figura 4 los resultados de una simulación en la que se compara la participación de la energía renovable (PV y WT) de dos días con condiciones climáticas diferentes, 1 de Enero y 15 de Julio de 2013, para la ciudad de Santa Fe.

Las curvas de carga son escaladas de las propuestas por Jardini et al. (2002), para obtener un pico de demanda industrial de 600 kW, y un máximo de 400 kW de carga residencial.

Se emplean los modelos de generación fotovoltaica y eólica desarrollados por Mohamed (2008), aplicados en este caso a un panel fotovoltaico SOLARTECH SPM100P-TS-F de 100 W pico y a un generador eólico ANHUI HAMMER DYNAMO H3.8 de 2 kW nominales. De acuerdo a la sección 2.2, se considera un parque de 500 paneles fotovoltaicos y 40 aerogeneradores.

De las simulaciones se observa que en un día de verano (1 de enero) el pico de generación solar alcanza un 14% del pico de la demanda total de la red, y que se corresponde con un 80% de la demanda total en ese instante (hora 6 del día). Mientras que el aporte de la generación eólica es menor, con un máximo que representa el 8% de la demanda máxima.

En invierno (15 de julio), la generación solar es aún relevante alrededor del mediodía (aunque en menor medida); mientras que la generación eólica es prácticamente nula, ya que sólo al final del día logra superarse el viento mínimo para arranque de la turbina (10,8 km/h).

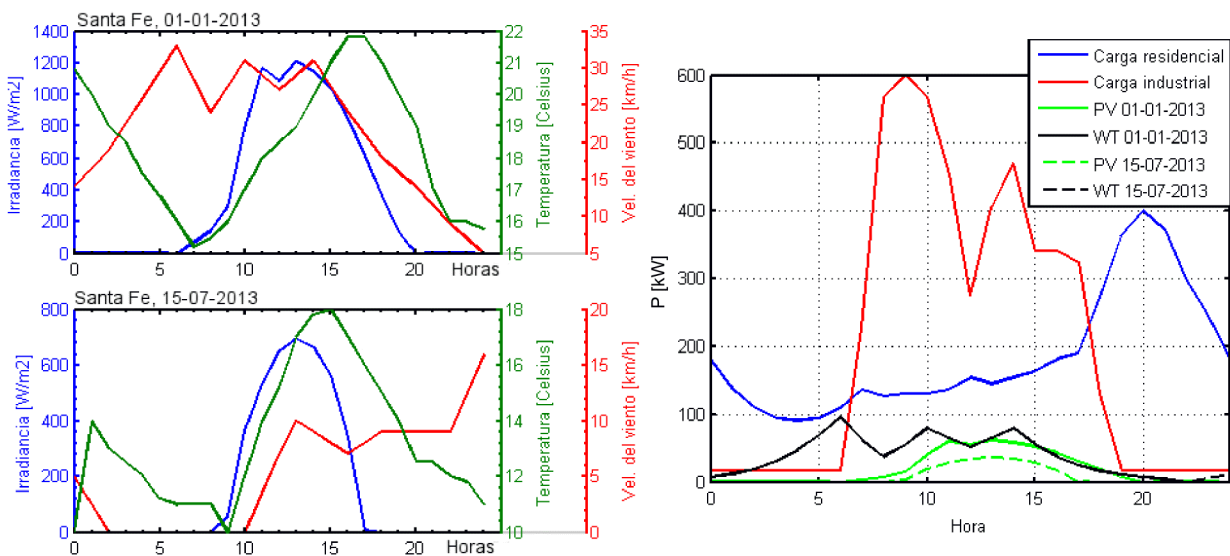


Figura 4. Condiciones climáticas, generación renovable y carga horaria para los días ejemplificados.

Las simulaciones ejemplifican las primeras etapas del procedimiento esquematizado en la Figura 3. La demanda que no es cubierta por la generación PV y WT debe ser satisfecha con otros medios de generación. La metodología de optimización a implementar deberá determinar cómo se distribuye esta diferencia considerando también las pérdidas de transmisión, entre las restantes fuentes de energía.

4. Conclusiones

La micro-red presentada constituye una primera etapa de trabajo que continuará con la implementación de la lógica de gestión en línea, en base a una futura proposición de una metodología de optimización.

La estructura de red propuesta pretende ser aplicable a regiones del Litoral argentino, y añade, respecto de otros formatos disponibles en la bibliografía, un diseño mallado que además considera las pérdidas de transmisión y el efecto de caídas de potencial, contemplados a partir del modelado de las líneas.

A continuación se trabajará en el proceso de optimización, donde se evaluará la conveniencia de cada propuesta de función de objetivo y los métodos numéricos para llevar a cabo su resolución.

A futuro podrán incorporarse los cambios de topología de la red ante eventos particulares como fallas de cortocircuito, o producto de la búsqueda de menores pérdidas de transmisión y/o reducción de caídas de tensión, por orden de controlador global.

Agradecimientos

A la UTN y al CySE (UTN-FRSF) por el financiamiento percibido a modo de beca doctoral.

Bibliografía

- Abido, M.A. (2003). Environmental/Economic Power Dispatch Using Multiobjective Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4), 1529 – 1537.
- Bernow, S., Marron, D. (1990). Valuation of environmental externalities for energy planning and operations. In *Tellus Institute Report 90-SB01 Boston, MA, May 1990*.
- Chowdhury, S., Chowdhury, S., Crossley, P. (2009). *Microgrids and Active Distribution Networks*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Jardini, J.A., Tahan, C., Gouvea, M.R., Se Un Ahn, Figueiredo, F.M. (2002). Daily Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 375 – 380.
- Mohamed, F. (2008). *Microgrid Modelling and Online Management*. Ph.D. Thesis, Helsinki Univ. of Technol. (Finland), ISBN 978-951-22-9235-6.
- Mohamed, F. (2007). *Microgrid Online Management and Balancing Using Multiobjective Optimization*. *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 639 – 644.
- Morgantown, W. (2001). *Emission Rates for New DG Technologies*. The Regulatory Assistance Project, May 2001. Web: <http://www.raponline.org/document/download/id/66>.
- Pipattanasomporn, M., Willingham, M., Rahman, S. (2005). Implications of On-Site Distributed Generation for Commercial/Industrial Facilities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 206 – 212.