

ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE POTENCIAS DE GENERACIÓN EN UNA MICRO-RED ELÉCTRICA CON DEMANDA DISTRIBUIDA VARIABLE

Ariel S. Loyarte[†], Luis A. Clementi^{†‡} y Jorge R. Vega^{†‡}

[†]Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional, Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina, ariel.loyarte@gmail.com, jrvega@frsf.utn.edu.ar, www.frsf.utn.edu.ar

[‡]Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina, laclementi@santafe-conicet.gov.ar, www.intec.santafe-conicet.gov.ar

Resumen: Se presenta un método para determinar las potencias óptimas que deben ser aportadas en los diferentes nodos de una micro-red eléctrica (MRE) con el objeto de satisfacer una dada demanda distribuida variable en el tiempo, minimizando un funcional que incluye costos de generación, pérdidas eléctricas por transmisión, emisión de gases contaminantes, y calidad de energía en todos los puntos de suministro. El problema inverso asociado es complejo debido a las diversas restricciones inherentes a los recursos distribuidos de la MRE, como por ejemplo las capacidades limitadas de los centros de generación. La resolución del problema de optimización se implementa a través de un algoritmo por enjambre de partículas. Un ejemplo de simulación basado en una MRE de mediana complejidad, aislada del sistema interconectado, con generadores diesel, fotovoltaicos, eólicos y una celda de combustible, permite visualizar las potencialidades del método e identificar la complejidad del problema analizado.

Palabras claves: *Micro-red eléctrica, Generación distribuida, Optimización, PSO, Problema inverso*
2000 AMS Subjects Classification: 21A54 - 55P5T4

1. INTRODUCCIÓN

Una micro-red eléctrica (MRE) es una red de baja potencia (por ej., < 10 MW), diseñada para suministrar electricidad (y eventualmente también cargas térmicas) a pequeñas comunidades, localidades suburbanas, instituciones, áreas comerciales, parques industriales, etc. [1]. Una MRE integra diferentes tipos de recursos distribuidos, tales como pequeños sistemas de generación de energía eléctrica (renovables y no renovables), dispositivos de almacenamiento de energía, equipos electrónicos de control y gestión de la red, cargas distribuidas, y sistemas de protección y configuración remotos [1,2].

En los últimos años se está observando un esfuerzo creciente por desarrollar MRE que puedan satisfacer las demandas de los usuarios con prestaciones más económicas y seguras que las brindadas por las redes tradicionales. En particular, se ha avanzado en el desarrollo de modelos representativos de la red y de sus diferentes recursos distribuidos, así como en políticas de tarifas variables para compra y venta de energía [1-3]. Una MRE vincula sus nodos a través de líneas eléctricas de interconexión; y a su vez, puede estar conectada a la gran red de potencia o bien operar en modo aislado de ella. Cada nodo de la MRE puede tener roles de generación, de demanda, y/o de almacenamiento. Los recursos de generación pueden ser variados; como por ejemplo motores diesel, aerogeneradores, microturbinas, paneles fotovoltaicos y celdas de combustible. Afortunadamente existen algunos modelos disponibles en la literatura [1].

La optimización global de una MRE es difícil por la gran cantidad y diversidad de las variables y restricciones involucradas (continuas, discretas, aleatorias, etc.). Además, una MRE puede con frecuencia verse sometida a modificaciones en su configuración, por ej. por salida de servicio de líneas y/o por reconexiones. Además de las dificultades asociadas a la física inherente, un problema de optimización global de una MRE también involucra componentes económicos relacionados con costos de combustible y tarifas diferenciales. Varios problemas de diseño óptimo y planificación de MRE se tratan en [2].

Este trabajo propone un método para determinar la asignación óptima de las potencias eléctricas instantáneas que deben ser aportadas en los distintos nodos de generación en una MRE disponible, para satisfacer una dada demanda distribuida variable en el tiempo. Por simplicidad, se considera una MRE de configuración fija y operando sólo en modo aislado de la red.

2. MODELO MATEMÁTICO DE LA RED ELÉCTRICA

Se considera una red eléctrica constituida por N nodos ($j=1, \dots, N$). En cada nodo j , se inyecta una potencia generada, $S_{g,j}$, y se consume una potencia demandada, $S_{d,j}$, resultando una tensión V_j . El j -ésimo

nodo se encuentra conectado al k -ésimo nodo mediante una línea de transmisión de admitancia $Y_{j,k}$. De acuerdo a la estructura mallada de la red y a las correspondientes admitancias de cada línea de transmisión, puede conformarse el siguiente modelo matemático de la red eléctrica [4]:

$$(\mathbf{p} + \mathbf{q} i)^* \times [\text{diag}(\mathbf{v}^*)]^{-1} = \mathbf{Y} \times \mathbf{v} \quad (1)$$

donde el primer miembro de la Ec. (1) es un vector $N \times 1$ cuya j -ésima componente es el cociente $S_j^* / V_j^* = (P_j + Q_j i)^* / V_j^*$, siendo P_j y Q_j las potencias activas y reactivas netas en el nodo (es decir, la diferencia entre las potencias generada y demandada en el nodo), $i^2 = -1$, y el símbolo “*” indica complejo conjugado. Además, \mathbf{v} es el vector de N componentes de las tensiones V_j en los nodos; e \mathbf{Y} es la matriz compleja de $N \times N$ de admitancias nodales (que depende de la estructura de la red y de las admitancias de las líneas de transmisión). Los nodos que presentan generación exhiben restricciones en sus potencias activa y reactiva:

$$P_{g,\min,j} \leq P_{g,j} \leq P_{g,\max,j}; \quad j = 1, \dots, N_g \quad (2a)$$

$$Q_{g,\min,j} \leq Q_{g,j} \leq Q_{g,\max,j}; \quad j = 1, \dots, N_g. \quad (2b)$$

Adicionalmente, las potencias de los nodos deben cumplir la siguiente relación:

$$\sum_{j=1}^N (S_{g,j} - S_{d,j}) - S_L = 0 \quad (3)$$

donde S_L es la potencia total de las pérdidas eléctricas disipadas en las líneas de la red.

El problema inverso conocido como *cálculo de flujos de potencia* consiste en hallar \mathbf{v} de la Ec. (1), a partir de \mathbf{Y} y de las potencias generadas ($S_{g,j} = P_{g,j} + Q_{g,j} i$) y demandadas ($S_{d,j} = P_{d,j} + Q_{d,j} i$) en cada nodo j .

3. OPTIMIZACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA

Consideramos ahora un caso más general, donde se conoce tanto la estructura de la red (N , N_g e \mathbf{Y}), como la distribución de potencias demandadas en los nodos ($S_{d,j} = P_{d,j} + Q_{d,j} i$); mientras que se desea determinar la distribución de tensiones ($V_{g,j}$) y potencias activas ($P_{g,j}$) a inyectar en cada nodo de generación, de manera de satisfacer alguna condición de operación óptima. Una función objetivo (f) a minimizar podría incluir la emisión de contaminantes por parte de los generadores, la desviación de las tensiones con respecto a límites de calidad estipulados, el costo de los combustibles fósiles consumidos y las pérdidas eléctricas por transmisión, entre otros posibles factores.

Llamando \mathbf{p}_g y \mathbf{v}_g a los vectores de potencias activas y tensiones en los nodos de generación, el problema de optimización puede plantearse de la siguiente manera:

$$\min_{\mathbf{p}_g, \mathbf{v}_g} f(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{v}) \quad (4)$$

sujeto a:

$$P_{g,\min,j} \leq p_{g,j} \leq P_{g,\max,j}; \quad j = 1, \dots, N_g \quad (5a)$$

$$q_{g,\min,j} \leq q_{g,j} \leq q_{g,\max,j}; \quad j = 1, \dots, N_g \quad (5b)$$

$$V_{\min,j} \leq V_j \leq V_{\max,j}; \quad j = 1, \dots, N \quad (5c)$$

$$\sum_{j=1}^N (p_{g,j} - p_{d,j}) - p_L = 0 \quad (5d)$$

$$\sum_{j=1}^N (q_{g,j} - q_{d,j}) - q_L = 0. \quad (5e)$$

Los algoritmos de descenso de tipo gradiente son ineficaces para resolver el problema de optimización, porque: i) el funcional f normalmente no puede expresarse en forma diferenciable (debido a la inclusión de \mathbf{v}); y ii) la superficie de soluciones exhibe múltiples mínimos locales. En cambio, suelen ser más aptos los algoritmos de búsqueda estocástica, como los algoritmos genéticos o la optimización por enjambres de partículas (PSO), entre otros; si bien no puede asegurarse convergencia a la solución global.

En un algoritmo PSO, la búsqueda del óptimo de las Ecs. (4, 5) se implementa mediante un conjunto de partículas. Cada partícula representa una posible solución; y el enjambre se mueve por el espacio de solución hasta alcanzar un estado estable. La p -ésima partícula en el enjambre representa un punto en un espacio de $(N_g+N_d)\times 1$, es decir, $\mathbf{X}^p = [\mathbf{p}_g^p \ \mathbf{v}_g^p]$. La mejor posición obtenida por la p -ésima partícula (la que minimiza f) es \mathbf{P}^p , y la mejor posición histórica es \mathbf{G} . Además, la p -ésima partícula se mueve sobre el espacio de solución con una velocidad \mathbf{V}^p $[(N_g+N_d)\times 1]$. El enjambre se inicializa en la primera iteración; y luego, en la iteración n , la posición y velocidad de cada partícula se actualizan según [5]:

$$\mathbf{V}^p[n+1] = w[n] \mathbf{V}^p[n] + c_1 R_1[n] \{\mathbf{P}^p - \mathbf{X}^p[n]\} + c_2 R_2[n] \{\mathbf{G} - \mathbf{X}^p[n]\} \quad (6a)$$

$$\mathbf{X}^p[n+1] = \mathbf{X}^p[n] + \mathbf{V}^p[n+1] \quad (6b)$$

donde $w[n]$ es la función de inercia; c_1 y c_2 son las aceleraciones cognitiva y social, respectivamente; y $R_1[n]$ y $R_2[n]$ son dos valores aleatorios escogidos en cada iteración a partir de una distribución uniformemente distribuida en el intervalo (0,1). El número total de iteraciones en el PSO se elige de modo de asegurar la convergencia del algoritmo, y se adopta a \mathbf{G} como la solución obtenida por la PSO.

Los algoritmos PSO se han utilizado con éxito en una gran diversidad de problemas. Aplicaciones en sistemas eléctricos de potencia han sido descriptas en un trabajo de revisión reciente [6].

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se considera una red eléctrica con $N = 12$ nodos (Fig. 1a). La geometría de la red y las características de los cables permitieron calcular la matriz \mathbf{Y} (12x12), aunque no se la detalla por razones de espacio. Los $N_g = 5$ nodos con generación incluyen: 2 generadores diesel (DG 1: 850 kW, DG 2: 800 kW); 1 parque de 500 paneles fotovoltaicos (PV: 100 W por panel); 1 parque de 40 aerogeneradores (WT: 2 kW cada uno); y 1 celda de combustible (FC: 300 kW). Los $N_d = 7$ nodos de carga consideran: 4 curvas de carga residenciales (RL: máximos $P_d = 100$ kW, $Q_d = 90$ kVAr, cada una); y 3 curvas de carga industriales (IL: máximos $P_d = 300$ kW, $Q_d = 190$ kVAr, cada una). Las generaciones PV y WT se calcularon a partir de las condiciones climáticas del 01 de enero de 2013, en la ciudad de Santa Fe. Las potencias activas se muestran en la Fig. 1b), disponiéndose de datos a intervalos de 1 hora.

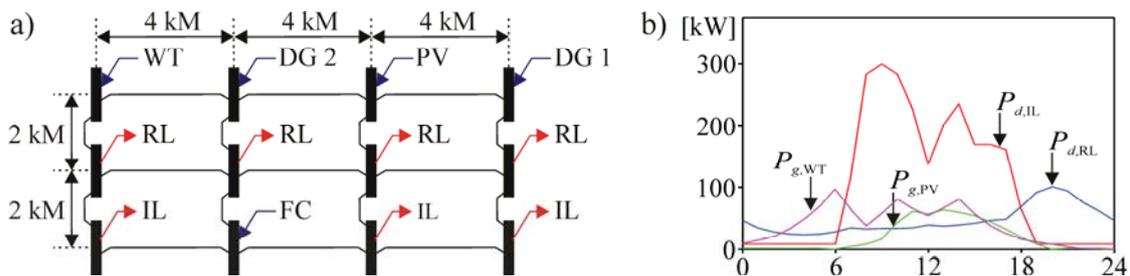


Figura 1: a) Esquema de la micro-red. b) Potencias activas demandadas y de generación renovable.

La asignación óptima de las potencias que deben aportarse en cada nodo de generación se obtiene resolviendo las Ecs. (4, 5). En esta aplicación, el funcional f se define mediante la siguiente expresión:

$$f(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{v}) = k_1 C(\mathbf{p}_g) + k_2 E(\mathbf{p}_g) + k_3 D(\mathbf{v}, \mathbf{p}_g) \quad (7)$$

donde $C(\mathbf{p}_g)$ es el costo total de generación (básicamente, costos de combustible en los 2 DG y en la FC); $E(\mathbf{p}_g)$ depende del caudal másico de los contaminantes liberados (NO_x , CO_2 , SO_2); y $D(\mathbf{v}, \mathbf{p}_g)$ es la desviación media de las tensiones en los nodos de demanda con respecto al valor nominal. $C(\mathbf{p}_g)$, $E(\mathbf{p}_g)$ y $D(\mathbf{v}, \mathbf{p}_g)$ son funciones normalizadas, cuyos valores ideales serían nulos. Los factores de peso $\{k_1, k_2, k_3\}$ se escogen para priorizar el consumo de combustible, la emisión de contaminantes, o la calidad del servicio. Los costos $C(\mathbf{p}_g)$, $E(\mathbf{p}_g)$ se calcularon como en [7]. En el caso de fuentes renovables, los costos de operación y la contaminación ambiental son nulos.

La optimización de las Ecs. (4, 5) se realizó a intervalos de 1 hora, utilizando una PSO con 50 partículas, $w = c_1 = c_2 = 0.5$. En general, la estabilización de f se alcanzó en menos de 50 iteraciones. La Fig. 2. muestra los resultados para las horas 12, 17 y 21. Comparando las 3 figuras en $n=1$, se observa que las inicializaciones de PSO fueron arbitrarias. Las tensiones (no mostradas por razones de espacio) resultaron adecuadas en todos los puntos de suministro.

En todos los casos, se observa que el algoritmo PSO fue efectivo para reducir f ; y que las potencias óptimas a suministrar a la MRE están ordenadas según: $P_{g,DG2} > P_{g,FC} > P_{g,DG1}$. Sin embargo, las relaciones entre esas potencias son diferentes en los 3 casos, no siendo entonces obvia la solución.

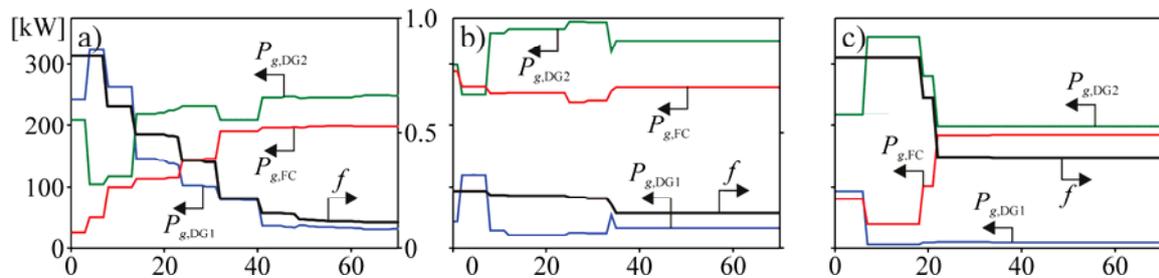


Figura 2: Evolución de la función objetivo, f ($k_1=0.7$, $k_2=0.2$, $k_3=0.1$), y las potencias activas generadas a lo largo de las iteraciones en el algoritmo PSO. a) 12 hs, b) 17 hs, c) 21 hs.

5. CONCLUSIONES

El algoritmo de optimización resulta útil para poder establecer una política óptima de despacho de cargas asignables a cada centro de generación. Evidentemente, el resultado dependerá del funcional f seleccionado, y de los factores de ponderación asignados a cada uno de los términos componentes.

El algoritmo se evaluó en base a diversas simulaciones, estados de carga y condiciones iniciales; y probó ser eficiente para encontrar soluciones repetitivas. Sin embargo, en una PC estándar, los tiempos de cómputo se extienden a algunos minutos, y por lo tanto no puede ser aún pensado en estas condiciones para utilizarlo como estimador óptimo en tiempo real, sino como orientador de políticas de despacho.

La dimensión / complejidad de la MRE afecta directamente a la matriz \mathbf{Y} , y consecuentemente al condicionamiento numérico del problema. El estudio de cambios en la estructura de la MRE, y de su interconexión con una red de otra potencia, serán algunos de los objetos de investigaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad Regional Santa Fe (UTN) y al CONICET, por el apoyo financiero recibido. Al Centro de Información Meteorológica (UNL), por la provisión de temperaturas, irradiancias y vientos de la ciudad de Santa Fe.

REFERENCIAS

- [1] S. CHOWDHURY, S.P. CHOWDHURY, AND P. CROSSLEY, *Microgrids and active distribution networks*, The Institution of Engineering and Technology, Herts, United Kingdom, 2009.
- [2] D. ZHANG, *Optimal design and planning of energy microgrids*, Ph.D. Thesis, University College London, 2013.
- [3] E. KREMERS, P. VIEJO, O. BARAMBONES, AND J. GONZÁLEZ DE DURANA, *A complex systems modelling approach for decentralised simulation of electrical microgrids*, 15th IEEE Int. Conf. on Eng. of Complex Comp. Syst., (2010), pp. 302-311.
- [4] J. GRAINGER AND W. STEVENSON, *Análisis de sistemas de potencia*, McGraw-Hill, USA, 1996.
- [5] Y. SHI, AND R. EBERHART, *A modified particle swarm optimizer*, in Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, Singapore, (1998), 69-73.
- [6] M.R. ALRASHIDI, AND M.E. EL-HAWARY, *A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems*, IEEE Trans. on Evol. Comp., Vol. 13 (2009), pp. 913-918.
- [7] F. MOHAMED, *Microgrid modelling and online management*, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology (Finland), 2008.