

SOLUCIÓN DEL DESPACHO ÓPTIMO DE GENERACIÓN CONSIDERANDO MODELOS DE CARGAS EXPONENCIALES DEPENDIENTES DE VOLTAJE

Ortíz Martínez, Julio (1), García Guzmán, José Miguel (2), González Ponce, María del Refugio (3)

1 [Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | Dirección de correo electrónico:
[juliortmtz@gmail.com@itesi.edu.mx]

2 [Ingeniería Electromecánica, Campus Irapuato, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | Dirección de correo electrónico:
[migarcia@itesi.edu.mx]

3 [Ingeniería Bioquímica, Campus Irapuato, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato] | Dirección de correo electrónico:
[refugio.gonzalez@itesi.edu.mx]

Resumen

En este trabajo se presenta la solución del Despacho Óptimo de Generación (DOG) considerando modelos de cargas exponenciales dependientes de voltaje mediante un Algoritmo Genético (AG's) con parámetro de selección elitista. Estos modelos de cargas exponenciales se integran en el análisis de Flujos de Potencia (FP) para determinar un punto de operación de estado estacionario mediante el método de Newton-Raphson. Los resultados obtenidos en este punto de operación son utilizados para calcular la matriz de coeficientes de pérdidas B con el fin de calcular las pérdidas de potencia activa para ser utilizadas en la solución del problema de DOG. Una vez que se obtienen las potencias de cada generador, estas se asignan a los nodos PV para ejecutar nuevamente el análisis de FP y continuar el mismo proceso iterativamente hasta que la diferencia de potencia activa en el nodo slack, obtenida mediante FP y DOG sea menor a una tolerancia de precisión. Un caso de estudio es presentado con el sistema de potencia de prueba del IEEE. Los resultados muestran que al integrar los modelos de las cargas exponenciales el costo de generación disminuye, ya que las pérdidas y la generación de potencia se reducen.

Abstract

This paper presents the solution of Optimal Dispatch (OD) considering exponential models of voltage dependent loads by using a genetic algorithm with elitist selection. These load models are integrated into analysis Flow Power (PF) to determine a steady state operation point using the Newton-Raphson method. The results obtained in this operating point are used to calculate the matrix of B coefficients, in order to calculate the active power losses to be used in the solution of the OD problem. Once the active power of each generator are obtained, these are assigned to the PV nodes to perform the analysis PF again and continue the same process iteratively until the difference of active power in the slack node, obtained by FP and OD is less to a precision tolerance. A case study is presented with the test power system of the IEEE. The results show that by integrating load exponential models the cost of generation decreases, as losses and power generation are reduced.

Palabras Clave

Sistemas eléctricos de potencia; algoritmos genéticos; costo de generación; pérdidas de transmisión; Flujos de Potencia

INTRODUCCIÓN

El propósito del DOG es encontrar la generación de potencia activa de las unidades existentes de un sistema de potencia, de modo que el costo total de generación se reduzca al mínimo al tiempo que se satisfacen simultáneamente las ecuaciones de balance de energía y los límites de generación de las unidades. Las funciones de costo de los generadores han sido representadas con funciones cuadráticas, bajo la consideración de que el costo incremental de cada generador se incrementa linealmente para encontrar una solución óptima. El DOG con estas funciones de costo cuadráticas normalmente se resuelve por medio de métodos basados en gradiente, sin embargo, las funciones de costo reales de los generadores consideran las zonas de operación prohibidas, puntos de válvula, múltiples combustibles, entre otros, lo que hace que dichas funciones sean altamente no lineales y en ocasiones discontinuas [1]. El DOG con estas funciones no puede resolverse con los métodos tradicionales, de manera que en los últimos años se han desarrollado diversos métodos que permiten resolver el DOG considerando tales funciones, entre los cuales se encuentran los algoritmos genéticos [2], las redes neuronales [3], enjambre de partículas [4], colonia de hormigas [5], entre otros. Los algoritmos genéticos son una técnica heurística-estocástica de optimización global que se ha utilizado para resolver problemas de optimización de sistemas de potencia (SEP), tales como el DOG o las diversas variantes de Flujos de Potencia Óptimos.

Por otro lado, el problema de FP consiste en determinar el punto de operación de estado estacionario de un SEP. Tal punto de operación consiste en obtener los voltajes y ángulos de bus, además de la potencia activa y reactiva que fluye a través de los distintos elementos de transmisión del sistema eléctrico. Junto con el DOG, los estudios de flujos de potencia constituyen una herramienta indispensable en la planeación, operación, control e intercambio de potencia entre distintos sistemas eléctricos [6]. En los estudios de FP convencionales las demandas de potencia activa y reactiva son consideradas comúnmente como valores constantes, sin embargo, las cargas que normalmente dependen de las variaciones de

la magnitud del voltaje nodal y de la frecuencia [7]. Los modelos de carga tradicionalmente son clasificados en dos principales categorías: modelos de carga estática y modelos de carga dinámica [8]. Generalmente, las cargas estáticas son representadas mediante modelos exponenciales [9] y modelos compuestos o modelos ZIP [8, 10]. Ambos tipos de modelos se expresan en función del voltaje y de ciertos parámetros que hacen más exacto el modelado de las cargas en condiciones reales. Con la proliferación de la electrónica de potencia en las cargas se ha modificado el comportamiento de estas en función del voltaje [11].

En el contexto antes mencionado, resulta de gran importancia conjuntar ambas formulaciones, FP y DOG, para determinar un punto sub-óptimo de operación de estado estacionario de sistemas de potencia con cargas dependientes de voltaje y analizar los efectos que tiene el modelado de estas cargas en el costo de generación y en la operación general de los SEP. Por tal motivo, en éste trabajo se integran los modelos de carga exponencial en el análisis de FP para determinar un punto de operación de estado estacionario, esto con el fin de obtener los coeficientes B que permitan determinar las pérdidas de transmisión, las cuales son utilizadas en la solución del problema de DOG. Es importante mencionar que la solución de despacho óptimo se lleva a cabo mediante un algoritmo genético codificado en forma binaria considerando un parámetro de selección elitista con operadores de cruce de un punto y de mutación booleana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Formulación general del análisis de FP

El análisis de FP establece que en cualquier nodo k de un SEP la suma de la potencia generada P_{Gk} , la potencia demandada P_{Dk} y la potencia intercambiada con los distintos nodos del sistema $\sum P_k^{iny\ i}$ es cero. De manera que el balance de carga en el nodo k se puede modelar como,

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Dk} - \sum_{i=1}^{N_b} P_k^{iny\ i} = 0 \quad (1)$$

La expresión anterior aplica de manera idéntica para el balance de potencia reactiva. En su

conjunto, el balance de ambas potencias representa un sistema de ecuaciones no lineales, el cual es resuelto aquí mediante el método de Newton-Raphson.

Incorporación de los modelos de cargas exponenciales dependientes de voltaje en el análisis de FP

El modelo de carga exponencial es dado como sigue [9],

$$P = P_0 (V/V_0)^\alpha \quad Q = Q_0 (V/V_0)^\beta \quad (2)$$

donde α y β son los parámetros de la carga exponencial y el subíndice 0 indica valor nominal. En este trabajo se consideran los siguientes valores de coeficientes $\alpha=1.38$ y $\beta=3.22$ [13]. La incorporación de los modelos de cargas dependientes de voltaje en la solución de FP modifica el jacobiano en los siguientes elementos de la diagonal principal.

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} (P_0 (V/V_0)^\alpha) \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} (Q_0 (V/V_0)^\beta) \quad (3)$$

Es importante mencionar que la Ecuación (2) se sustituye en (1) y se utilizan los elementos del jacobiano anteriores en el análisis de FP por medio del método de Newton-Raphson.

Formulación general del DOG

El problema de Despacho Óptimo de Generación es un problema de optimización no lineal restringido que puede expresarse como sigue,

$$\text{Min } F(P_i) = \sum_{i=1}^{ng} (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2) \quad (4)$$

$$\text{Sujeta a } \sum_{i=1}^{ng} P_i = P_D + P_L \quad (5)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

donde a_i , b_i y c_i son los coeficientes de la función cuadrática de costo del generador i del conjunto de ng de generadores. La función $F(P_i)$ corresponde a la función objetivo o costo total de generación medida en (\$/hr), los términos P_i , P_D y P_L representan la potencia activa de salida del generador i , la potencia activa demandada y las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión, respectivamente, mientras que los

límites inferior y superior de generación de potencia activa del generador i son denotados por P_i^{\min} y P_i^{\max} , en forma respectiva. Las Ecuaciones (4)-(6) corresponden a la función cuadrática de costo de generación, las restricciones de igualdad y las restricciones de desigualdad del problema de optimización.

Las pérdidas de transmisión P_L , en la Ecuación (5), son representadas mediante una expresión cuadrática y es función de la potencia activa inyectada a los buses. La forma general de esta expresión es dada en [14],

$$P_L = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{ng} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (7)$$

Donde P_i y P_j son la potencia activa inyectada en el bus i y j , respectivamente, y los coeficientes B son representados por los términos B_{ij} , B_{0i} y B_{00} .

El problema de optimización no lineal restringido se convierte en un uno sin restricciones mediante el método de los multiplicadores de Lagrange, con el cual se obtiene la siguiente función objetivo aumentada llamada también función lagrangiana,

$$L(P_i, \lambda^j) = F(P_i) + \lambda^j \left(P_D + P_L - \sum_{i=1}^{ng} P_i \right) \quad (8)$$

Las condiciones de optimalidad asociadas con (8) permiten obtener el siguiente sistema de ecuaciones,

$$2(a_i + \lambda^j B_{ii}) P_i + \lambda^j \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{ng} 2B_{ij} P_j = \lambda^j - \lambda^j B_{0i} - b_i \quad (9)$$

Este sistema de ecuaciones se resuelve para obtener el valor de P_i y λ . En este trabajo el multiplicador de Lagrange o costo incremental λ es manejado como un individuo y codificado en forma binaria dentro de la población.

Implementación del AG para la solución del DOG

La metodología de solución del algoritmo genético se basa en la técnica de codificación y decodificación del costo incremental λ , el cálculo de la potencia generada y la evaluación de la misma utilizando la función fitness. Los multiplicadores λ son codificados en una cadena binaria cuyo valor decimal equivalente de cada

cadena binaria λ en la generación j se obtiene como [15],

$$y^j = \sum_{i=1}^l 2^{i-1} b_i^j \quad (10)$$

La variable λ es obtenida para representar un punto en el espacio de búsqueda o región factible de acuerdo con la regla de asignación fija como sigue,

$$\lambda^j = \lambda^{\min} + \frac{\lambda^{\max} - \lambda^{\min}}{2^l - 1} y^j \quad (11)$$

Al conocer el λ , la potencia generada puede ser calculada utilizando la Ecuación (9) y las pérdidas de transmisión para cada población con la Ecuación (7). El enfoque propuesto utiliza el criterio de costo incremental como su base, por lo que, la restricción de balance de potencia dada por la Ecuación (5) es integra en el algoritmo genético como sigue,

$$\varepsilon^j = \left| P_D + P_L^j - \sum_{i=1}^{NG} P_i^j \right| \quad (12)$$

Entonces, la regla convergente es cuando ε disminuye hasta una tolerancia específica. La función de aptitud o función fitness considerada en este trabajo es,

$$f^j = \frac{1}{\left(1 + \alpha \frac{\varepsilon^j}{P_D}\right)} \quad (13)$$

donde α es una constante de escalamiento que permite variar la velocidad del proceso de optimización al modificar el valor de la función fitness correspondiente a cada individuo. La aptitud se normaliza en un rango entre 0 y 1 con el fin de seleccionar de manera elitista los mejores cromosomas para ser padres y acelerar la convergencia del procedimiento de iteración. El cruzamiento entre los padres se lleva a cabo en este trabajo con un cruce entre el más apto con el menos apto de los individuos seleccionados (W_1-W_{ni} , W_2-W_{ni-1} , W_3-W_{ni-2} , ..., $W_{ni/2}-W_{ni-ni/2}$; W =aptitud, ni =número de individuos seleccionados) y es basado en un solo punto de cruce para generar la nueva población. El operador de mutación seleccionado en este trabajo es multibit, ya que en este tipo de parámetro cada bit tiene una probabilidad de mutarse o no, que es calculada en cada pasada del operador de mutación. Una vez que se ha efectuado la mutación, la aptitud de

cada miembro de la nueva población generada es evaluada y comparada con cada uno de los padres previamente seleccionados. Si un miembro de la nueva población es determinado para ser más apto que un padre, se intercambia por ese individuo en la nueva población. Con esto se permite asegurar que los individuos más aptos son elegidos como los padres y que un individuo más apto no fue reemplazado prematuramente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un caso de estudio con el sistema de potencia de prueba de 5 nodos del IEEE es presentado en este trabajo. En los casos de estudio se considera un tamaño de población de 20 individuos con una longitud de cromosoma de 16 bits y probabilidades de cruce y mutación de 0.8 y 0.01, respetivamente. El valor del factor de escalamiento considerado es de 1 y el número de generaciones es de 10. El punto de operación sub-óptimo con carga real y exponencial es presentado en la Tabla 1.

Tabla 1: Punto de operación sub-óptimo obtenido con el DOG.

NODO	Carga fija		Modelo exponencial	
	V	θ (°)	V	θ (°)
Nodo 1	1.060	0.000	1.060	0.000
Nodo 2	1.000	-0.029	1.000	-0.072
Nodo 3	0.972	-3.757	0.973	-3.916
Nodo 4	0.984	-3.289	0.985	-3.391
Nodo 5	0.987	-3.086	0.989	-3.177

Los resultados mostrados en la Tabla 1 muestran que los voltajes nodales se incrementan con los modelos de las cargas dependientes de voltaje. Este incremento del voltaje nodal provoca una redistribución de los flujos de potencia en los elementos de transmisión modificando el valor de las pérdidas y la generación de potencia activa, cambiando con ello el costo de generación, tal como lo muestra la Tabla 2, donde se muestran los resultados obtenidos del DOG con carga fija y carga exponencial. Se debe notar que para este sistema de potencia el costo de generación, la generación y pérdidas totales de potencia activa son menor cuando se integran los modelos de cargas exponenciales, sin embargo, estos resultados pueden cambiar con otros sistemas de

potencia de gran escala, lo cual es sujeto de estudio para trabajos posteriores.

Tabla 2: Resultados del DOG con carga fija y exponencial.

Parámetro	P_i (MW) (Fija)	P_i (MW) (Exp.)
Generador 1	65.376	63.406
Generador 2	104.933	103.032
Costo total (F , \$/hr)	760.189	744.422
Demanda total (MW)	165.000	161.306
Pérdidas totales (MW)	5.31	5.129
Generación total (MW)	170.309	166.435
Demanda total (MVAR)	40.000	38.396
Pérdidas totales (MVAR)	-13.222	-13.799
Generación total (MVAR)	26.778	24.597

CONCLUSIONES

Un algoritmo genético con parámetro de selección elitista se ha implementado para resolver el problema de DOG con modelos de cargas exponenciales dependientes de voltaje. La integración de las cargas en el análisis de FP modifica los resultados de las pérdidas y de la potencia generada y demandada, lo cual es debido a una redistribución de los flujos de potencia, que a su vez es ocasionada por un aumento en el nivel del voltaje nodal. Se debe notar que en el caso de estudio presentado y desde una perspectiva de operación óptima, el punto de operación con el modelo de carga exponencial es mejor que con cargas fijas, por lo que, en general los modelos de cargas dependientes de voltaje en los estudios de FP permiten llevar a cabo un análisis más real del estado de la operación de un SEP.

REFERENCIAS

- [1] Lee, K. Y. & Park, J. B. (2006). Application of particle swarm optimization to Economic Dispatch Problem: Advantages and Disadvantages. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 6(1), pp. 1-5.
- [2] Walters, D.C. & Sheble, G. B. (1993). Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with the Valve Point Loading. IEEE Transactions on Power Systems, 8(3), pp. 1325-1332.
- [3] Lee, K. Y., Yome, S. & Park, J. H. (1998). Adaptive Hopfield Neural Network for

- Economic load Dispatch. IEEE Transactions on Power Systems, 13(2), May, pp. 519-526.
- [4] Park, J. B, Lee, S., Shin, J. R. & Lee, K. Y. (2005). A Particle Swarm optimization for Economic Dispatch with Nonsmooth Cost Functions. IEEE Transactions on Power Systems, 20(1), pp. 34-42.
- [5] Gopalakrishnan, R. & Krishnan, A. (2013). An Efficient Technique to Solve Combined Economic and Emission Dispatch Problem Using Modified Ant Colony optimization. Sadhana, 38(4), pp. 545-556.
- [6] Saadat, H. (2004). Power system analysis. Boston: WCB/McGraw-Hill.
- [7] El-Hawary, M. E., & Dias, L. G. (Enero, 1987). Incorporation of load models in load-flow studies: form of model effects. In IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 134(1).
- [8] Kundur, P., Balu, N.J. & Lauby, M.G. (1994). Power system stability and control. New York: McGraw-Hill.
- [9] Murty, P. S. R. (1977). Load modelling for power flow solution. J. Inst. Eng. (India), 58(3).
- [10] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. (1993). Load Representation for Dynamic Performance Analysis, IEEE Transactions of Power Systems, 8(2).
- [11] Bokhari, A., Alkan, A., Dogan, R., & Diaz, M. (2014). Experimental Determination of ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial and Industrial Loads. IEEE Transactions on Power Delivery, 29(3).
- [12] Nam, S., Kang, S., Lee, J., Choi, E., Ahn, S. & Choi, J. (2013). EMS Data-Based Load Modeling to Evaluate the Effect of Conservation Voltage Reduction at National Level, Energies, 6.
- [13] Kron, G. (1952). Tensorial Analysis of Integrated Transmission System, Part II: Off-Nominal Turns Ratios" en AIEE Transactions, 71(1), pp. 505-512.
- [14] KOTHARI, D. P. & DHILLON J. S. (2015). Power System Optimization, Nueva Delhi: PHI Learning.