

Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje

GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel†, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Recibido Agosto 10, 2016; Aceptado Septiembre 29, 2016

Resumen

En este trabajo se presenta una comparación de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas eléctricos de potencia (SEPs) con los modelos de carga estática dependiente de voltaje. Estos modelos de carga estática son integrados en el análisis de Flujos de Potencia (FP) para comparar los puntos de operación de SEPs de prueba y reales con el fin de estudiar cómo afecta este modelado a los resultados asociados con el punto de operación o equilibrio de los sistemas de potencia. Los modelos de carga estática considerados son el exponencial y el compuesto. Diversos casos de estudio son llevados cabo con el SEP de prueba de 5 nodos y con SEP de Nueva Inglaterra de 39 nodos. Los resultados muestran que al integrar los modelos de las cargas dependientes de voltaje en el análisis de FP el punto de equilibrio cambia, ya que el voltaje nodal aumenta modificando la distribución de los flujos de potencia, las pérdidas y la generación de potencia, tanto activa como reactiva.

Puntos de equilibrio, operación de estado estacionario, flujos de potencia, cargas estáticas

Abstract

This paper presents a comparison of steady-state equilibrium points of electric power systems (EPS) with voltage dependent static models. These static load models are integrated into Power Flow (PF) analysis to compare the steady-state operation of real and test power systems in order to study the effects of the load modelling in results associated with the equilibrium points of power systems. The static load models considered here are the exponential and composed. Several study cases are carried out with the IEEE test power system of 5 nodes and realistic New England Power System. The results show that when the voltage dependent loads models are integrated into power flow formulation, the equilibrium point is different due to an increase of nodal voltage, which modifies the power flow distribution, the power losses and the power generation, both active and reactive power.

Equilibrium points, steady-state operation, power flow, static loads

Citación: GARCÍA-GUZMÁN, José Miguel, OLIVARES-NEGRETE, Leonardo, ORTEGA-HERRERA, Francisco Javier y FIGUEROA-GODOY, Fernando. Comparación de puntos de equilibrio de sistemas de potencia con modelos de carga estática dependiente de voltaje. Revista de Energía Química y Física 2016, 3-8: 25-33.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: migarcia@itesi.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

El problema de FP consiste en determinar el punto de operación de estado estacionario de un Sistema Eléctrico de Potencia. 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. Los estudios de flujos de potencia constituyen una herramienta indispensable en la planeación, operación, control e intercambio de potencia entre distintos sistemas eléctricos (Saadat, 1999), además, esta información es esencial para el continuo monitoreo del estado actual del sistema y para analizar la efectividad de planes alternos para futuras expansiones del sistema para satisfacer el incremento de la carga demandada (Kothari & Nagrath, 2003).

Las cargas eléctricas se pueden definir como elementos o dispositivos conectados al SEP que elementos pueden consumir, generar o controlar potencia activa o reactiva y además son afectadas por variaciones del voltaje nodal (Rifaat, 2004). En estudios de FP convencionales las demandas de potencia activa y reactiva son consideradas como valores constantes, sin embargo, las cargas que normalmente se encuentran en los SEPs, son del tipo residencial, industrial y comercial, y son dependientes de las variaciones de la magnitud del voltaje nodal y de la frecuencia (El-Hawary & Dias, 1987).

Algunos investigadores han mostrado que los modelos de cargas tienen efectos muy significativos en los puntos de equilibrio de estado estacionario obtenidos mediante el análisis de FP, por lo que, el uso de un modelo de carga real es muy importante para mejorar la calidad de los estudios llevados a cabo en los SEP's (Haque, 1996).

Los modelos de carga tradicionalmente son clasificados en dos principales categorías: modelos de carga estática y modelos de carga dinámica (Kundur *et al*, 1994). Los modelos de carga estática consideran solo características de dependencia del voltaje nodal y su principal aportación es hacia los análisis de estado estacionario de sistemas de potencia, los cuales pueden ser por ejemplo, análisis de flujos de potencia convencional, flujos de potencia óptimos, mercados eléctricos, entre otros. Generalmente, las cargas estáticas son representadas mediante modelos exponenciales (Murty, 1977) y modelos compuestos, los cuales son conocidos también como modelos Impedancia-Corriente-Potencia constante o modelos ZIP (Kundur, 1994).

Mientras que los modelos de carga dinámica consideran, además de características de dependencia del voltaje nodal, las variaciones de la frecuencia del SEP, por lo que, estos modelos son ampliamente utilizados en el análisis de estabilidad de voltaje y contingencias del sistema (Kepka *et al*, 2005).

Es muy importante conocer la composición exacta de las cargas en el momento de interés para poder implementar los modelos de cargas eléctricas, lo cual es muy difícil de estimar, ya que el cambio continuo de muchos dispositivos y aparatos del cliente se ve reflejado en la composición de la carga.

Incluso conociendo exactamente esta composición, es impráctico representar cada componente de forma individual debido a que son miles de ellos (Concordia & Ihara, 1982). Por este motivo, los modelos de las cargas se expresan en función del voltaje y de ciertos parámetros que hacen más exacto el modelado de las cargas en condiciones reales.

Esto ha llamado la atención de muchos investigadores alrededor del mundo, quienes se han dedicado a estimar los parámetros de los modelos de cargas eléctricas para poder representarlas de una forma más apegada a la realidad, basándose principalmente en dos enfoques establecidos: enfoque basado en mediciones y enfoque basado en componentes (Armas, 1995; Ranade & Mechenbier, 2001; García *et al*, 2013; Nam *et al*, 2013; Chang & Huang, 2014; Patel *et al*, 2014; Rodríguez *et al*, 2015). Desde la década de 1980 se han reportado muchos estudios donde se han implementado los modelos carga estática para llevar a cabo análisis de estado estacionario de SEPs (El-Hawary & Dias, 1987; Price *et al*, 1988, El Hawary, 1982; Dias, 1985), sin embargo, no se han evaluado explícitamente los modelos estáticos en forma separada ni se ha reportado una comparativa de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas de potencia con dichos modelos de cargas.

En el contexto antes mencionado, en éste trabajo se integran los modelos de carga estática en el análisis de FP utilizando el método de Newton-Raphson con el fin de obtener los puntos de equilibrio de estado estacionario y realizar una comparativa entre ellos que permita determinar explícitamente la influencia de cada modelo de cargas dependientes de voltaje en tales puntos.

Formulación del análisis de Flujos de Potencia

El análisis de FP establece que en cualquier nodo i de un SEP la suma de la potencia generada (P_{Gi} , Q_{Gi}) la potencia demandada (P_{Di} , Q_{Di}) y la potencia inyectada por los j elementos de transmisión del sistema de potencia ($\sum P_i^{iny j}$, $\sum Q_i^{iny j}$) es cero. De manera que el balance de potencia activa y reactiva en el nodo k se puede modelar como sigue:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} P_i^{iny j} = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} Q_i^{iny j} = 0 \quad (2)$$

En las expresiones anteriores los términos de las sumatorias de potencia activa y reactiva son dados por (3) y (4), respectivamente.

$$P_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

Donde Y_{ij} y θ_{ij} representan, en forma respectiva, la magnitud y ángulo del elemento (i, j) de la matriz de admitancia de bus; V_m es la magnitud y δ_m el ángulo del voltaje en el nodo m ($m=i, j$). Las ecuaciones anteriores son no lineales, de manera que el sistema de ecuaciones (1)-(2) es no lineal y es resuelto aquí mediante el método de Newton-Raphson como sigue:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (5)$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta^k; \quad V^{k+1} = V^k + \Delta V^k \quad (6)$$

Los jacobianos de la matriz jacobiana principal de la Ecuación (5) están dados por las expresiones siguientes:

$$J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}; \quad J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial V_i}; \quad J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i}; \quad J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i}; \quad (7)$$

Mientras que los términos de la derecha, ΔP y ΔQ , son calculados en cada nodo i mediante (1) y (2) considerando que en los nodos donde se conectan los generadores se conoce la potencia P_{Gi} y en los nodos de carga se conoce tanto P_{Di} como Q_{Di} . Se debe mencionar que en el método de Newton-Raphson la potencia P_i y Q_i se calculan en cada iteración k hasta que el balance de potencia activa en el nodo i sea menor a una tolerancia de convergencia especificada.

Modelos estáticos de carga dependientes de voltaje

Como se mencionó, las cargas eléctricas estáticas dependen del voltaje en que se consume potencia, de modo que este tipo de cargas son representadas mediante modelos exponenciales y compuestos que intentan reproducir el comportamiento de dichas cargas lo más cercano posible a la realidad. En el presente trabajo solo se consideran los modelos de carga estática debido a que el principal interés es la evaluación del comportamiento de estado estacionario del sistema de potencia.

Modelo exponencial

El modelo exponencial para la potencia activa y reactiva demandada en el nodo i en función del voltaje es dado por (8) y (9), en forma respectiva, como sigue (Kundur, 1994):

$$P_{Di} = P_{Di,0} \left(V_i/V_{i,0} \right)^\alpha \quad (8)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di,0} \left(V_i/V_{i,0} \right)^\beta \quad (9)$$

Donde α y β son los parámetros de la carga exponencial y el subíndice 0 indica valor nominal. Estos parámetros de tipo potencia constante, corriente constante e impedancia constante, respectivamente.

Los exponentes α y β pueden tener un amplio rango de valores, pero para este estudio se considera el valor de 1.38 y 3.22, respectivamente, con la única finalidad de comparar los puntos de equilibrio que se obtienen con ambos modelos (Nam *et al*, 2013).

Modelo compuesto

El modelo compuesto representa la carga dependiente voltaje como una combinación de una carga de impedancia constante (Z), una carga de corriente constante (I) y una carga de potencia constante (P), por lo que, también es conocido de manera común como modelo ZIP. Este modelo expresa la potencia activa y reactiva demandada en el nodo i en función del voltaje nodal como se muestra enseguida (Kundur, 1994):

$$P_{Di} = P_{Di,0} \left(p_1 \left(V_i/V_{i,0} \right)^2 + p_2 \left(V_i/V_{i,0} \right) + p_3 \right) \quad (10)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di,0} \left(q_1 \left(V_i/V_{i,0} \right)^2 + q_2 \left(V_i/V_{i,0} \right) + q_3 \right) \quad (11)$$

Al igual que en el modelo anterior, en este caso 0 indica valor nominal, mientras que p_n y q_n ($n=1, 2, 3$) representan los coeficientes de impedancia, corriente y potencia constante para la potencia activa y reactiva, respectivamente. La selección del valor de los coeficientes de este modelo depende del porcentaje de elementos conectados a cada sistema en particular. Con el fin de comparar los puntos de equilibrio de estado estacionario se toman los siguientes valores para los coeficientes asociados con las cargas activas: $p_1=0.35$, $p_2=0.13$, $p_3=0.52$; mientras que para los coeficientes de las cargas reactivas se consideran los siguientes valores: $q_1=0.56$, $q_2=0.08$, $q_3=0.36$ (Nam *et al*, 2013). Se debe notar que la suma de los coeficientes p_n y q_n es igual a 1.

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

La incorporación de los modelos de cargas exponenciales dependientes de voltaje en la solución de FP modifica los elementos de la diagonal principal de los jacobianos J_2 y J_4 de acuerdo a (12) y (13), ya que dichos jacobianos son expresados mediante derivadas parciales respecto a la magnitud del voltaje V_i .

$$\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left(P_{Di,0} \left(V_i/V_{i,0} \right)^\alpha \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left(Q_{Di,0} \left(V_i/V_{i,0} \right)^\beta \right) \quad (13)$$

De manera similar, la integración de los modelos compuestos de carga en la formulación de flujos de potencia modifica la diagonal de los jacobianos mencionados de acuerdo a las derivadas parciales siguientes.

$$\frac{\partial P_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left(P_{D0} \left(p_1 (V/V_0)^2 + p_2 (V/V_0) + p_3 \right) \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_{Di}}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left(Q_{D0} \left(q_1 (V/V_0)^2 + q_2 (V/V_0) + q_3 \right) \right) \quad (15)$$

Además de la modificación de la matriz jacobiana, la incorporación de los modelos de las cargas hace necesario que las Ecuaciones (8)-(9) y (10)-(11) se sustituyan en las expresiones de balance de potencia (1)-(2), dependiendo del modelo de carga a utilizar, es decir, para el caso del modelo exponencial se sustituye (8) en (1) y (9) en (2), mientras que para el modelo compuesto se sustituye (10) y (11) en (1) y (2), respectivamente.

Resultados

El sistema eléctrico de potencia de prueba de 5 nodos (Stagg & El-Abiad.1968) y el sistema de Nueva Inglaterra de 39 nodos (Pai, 1989) son utilizados para llevar a cabo diversos casos de estudio donde se determina la operación de estado estacionario de estos sistemas de potencia, a partir de lo cual es posible comparar los puntos de equilibrio de dichos sistemas con los dos modelos de carga dependiente de voltaje considerados en este trabajo. La tolerancia de convergencia considerada en los casos de estudio es de 1×10^{-9} .

Una comparación del punto de equilibrio de estado estacionario del sistema de 5 nodos con los dos modelos de carga dependiente de voltaje y con carga constante se presenta en la Tabla 1.

Bus	Modelo exp.		Modelo ZIP		Carga constante	
	V	θ (°)	V	θ (°)	V	θ (°)
1	1.060	0.000	1.060	0.000	1.060	0.000
2	1.000	-1.958	1.000	-1.997	1.000	-2.061
3	0.974	-5.551	0.973	-5.629	0.972	-5.765
4	0.985	-4.807	0.985	-4.862	0.984	-4.957
5	0.988	-4.501	0.988	-4.550	0.987	-4.637

Tabla 1 Punto de equilibrio de estado estacionario del sistema de potencia 5 nodos

La Tabla 1 muestra que para este sistema los voltajes nodales se incrementan con los modelos de las cargas dependientes de voltaje, sin embargo, es importante notar que en el caso del modelo exponencial los voltajes son mayores que con los otros dos casos, tal como se muestra en el perfil de magnitud de los voltajes nodales del Gráfico 1. En esta figura solo se grafican los voltajes de los nodos de carga, ya que la magnitud de voltaje en el nodo slack y los nodos de generación permanece constante

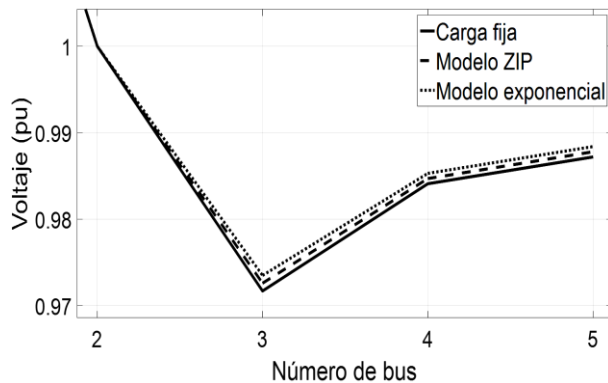


Gráfico 1 Perfil de voltaje en los nodos de carga del sistema de 5 nodos

La Tabla 2 muestra un resumen comparativo de resultados del punto de equilibrio del sistema de potencia de 5 nodos con los modelos de carga dependiente de voltaje. Los datos de la tabla muestran que para este sistema de potencia en particular el incremento del voltaje nodal provoca una disminución de las pérdidas y la potencia demandada, por lo que, la generación de potencia también se ve disminuida. Este comportamiento se presenta tanto para la potencia activa como para la reactiva. En este caso, el punto de equilibrio con el modelo exponencial se puede considerar mejor, ya que al tener voltajes mayores tiene menos pérdidas, menos demanda de potencia y menor generación.

Resultados (en totales)	Sistema de 5 nodos		
	Modelo exp.	Modelo ZIP	Carga cte.
Generación (MW)	167.154	168.458	171.122
Generación (MVAR)	26.792	27.946	29.223
Demanda (MW)	161.291	162.696	165.000
Demanda (MVAR)	38.386	39.367	40.000
Pérdidas (MW)	5.863	5.963	6.122
Pérdidas (MVAR)	-11.594	-11.275	-10.777

Tabla 2 Resumen de resultados en el punto de equilibrio del sistema de potencia 5 nodos

Los casos de estudio muestran que la anterior operación de estado estacionario se presenta solo en los SEPs pequeños. En los casos de estudio con el sistema de potencia de Nueva Inglaterra, el cual es un sistema real de gran escala, la operación varía con cada uno de los modelos de carga, tal como lo muestra el resumen de resultados de la Tabla 3.

Resultados (en totales)	Sistema de Nueva Inglaterra		
	Modelo exp.	Modelo ZIP	Carga cte.
Generación (MW)	6140.787	6151.251	6146.848
Generación (MVAR)	162.037	227.876	241.635
Demanda (MW)	6097.071	6102.149	6097.100
Demanda (MVAR)	1375.371	1397.277	1408.900
Pérdidas (MW)	51.234	51.686	52.387
Pérdidas (MVAR) (-)	1102.384	1104.827	1101.912

Tabla 3 Resumen de resultados en el punto de equilibrio del sistema de potencia de Nueva Inglaterra

La tabla anterior muestra que con el modelo exponencial se tiene un punto de equilibrio con menores pérdidas, menos generación y menor demanda de potencia activa con respecto al modelo compuesto y carga constante, lo cual representa un comportamiento aparentemente lógico.

Sin embargo, en el caso del punto de equilibrio con el modelo compuesto o ZIP las pérdidas de potencia activa son menores que con carga constante, pero la generación y la potencia demandada son mayores, lo que no corresponde a una operación lógica, ya que se espera que con el aumento de las pérdidas se incremente la generación de potencia.

De esta manera, es posible inferir que en los puntos de equilibrio de los SEPs la generación de potencia obedece a la demanda de MW, es decir, con el incremento de la potencia demandada se incrementa la potencia generada y viceversa sin importar las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.

Además, con el aumento del voltaje nodal disminuyen las pérdidas de potencia activa, pero la potencia demandada puede aumentar o disminuir dependiendo del nivel de voltaje en el nodo donde se conecte y de la no linealidad del modelo de carga que se haya incorporado en la formulación de FP. Este comportamiento de la operación en el punto de equilibrio se puede generalizar para el caso de la potencia reactiva y para cualquier sistema de prueba o real de gran escala. En los gráficos 2 y 3 se muestran, respectivamente, los perfiles de voltaje de los buses 10-15 y 25-30 del sistema de Nueva Inglaterra con el fin de apreciar el comportamiento del voltaje nodal en cada punto de equilibrio con los distintos modelos de carga.

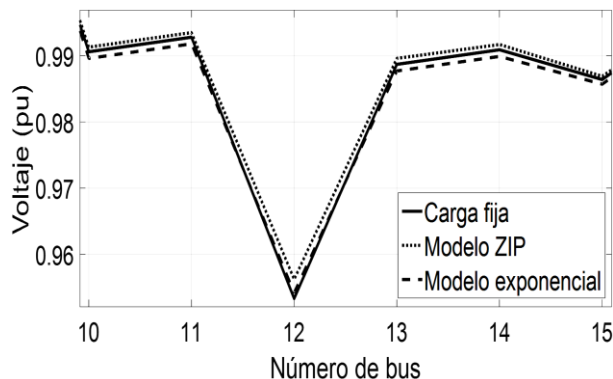


Gráfico 2 Perfil de voltaje en los nodos de carga 10-15 del sistema de Nueva Inglaterra.

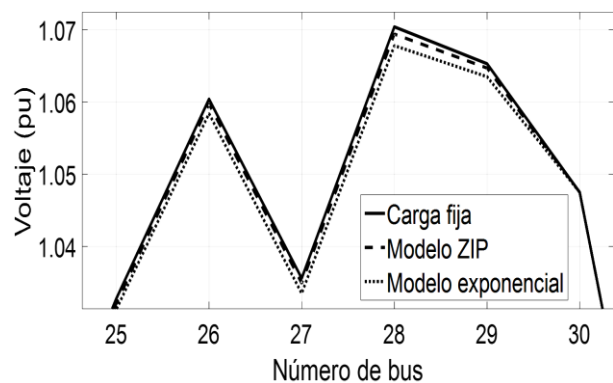


Gráfico 3 Perfil de voltaje en los nodos de carga 25-30 del sistema de Nueva Inglaterra

En el Gráfico 2 se puede observar que en los nodos 10-15 el voltaje del modelo compuesto es mayor a los otros dos voltajes. Sin embargo, en los nodos 10-11 y 13-15 el voltaje del modelo exponencial es menor al voltaje con carga constante, mientras que en el nodo 12 se presenta lo contrario. Se debe notar que en estos nodos el voltaje del modelo exponencial siempre es menor al modelo compuesto, situación que cambia en los nodos 25-30 del Gráfico 3, donde los voltajes en orden decreciente son siempre carga fija, modelo compuesto y exponencial. Lo anterior muestra que la variación del voltaje con cada modelo de carga es diferente entre sí, lo cual se debe a la zona del sistema donde se encuentre el nodo y a la forma no lineal del modelo de carga dependiente de voltaje en sí.

Conclusiones

Una comparación de los puntos de equilibrio de estado estacionario de sistemas eléctricos de potencia con los modelos de carga estática dependiente de voltaje se ha presentado. Los modelos de carga exponencial y compuesto se implementaron en la solución de FP para obtener los puntos de equilibrio de un sistema de potencia de prueba y real de gran escala. Los casos de estudio mostraron que con los modelos de carga dependiente de voltaje los puntos de equilibrio se modifican por el cambio en la magnitud de los voltajes nodales. La variación del voltaje con cada modelo de carga es diferente entre sí, lo cual se debe a la zona del sistema donde se encuentre el nodo y a la forma no lineal del modelo de carga dependiente de voltaje en sí. Este cambio en el voltaje nodal provoca una redistribución de flujos de potencia cambiando las pérdidas en los elementos de transmisión, la generación y la demanda de potencia activa y reactiva.

Además, en los puntos de equilibrio de los SEPs la generación de potencia obedece a la demanda de potencia, ya sea activa o reactiva, sin importar las pérdidas de potencia en los elementos de transmisión. Este comportamiento de la operación en el punto de equilibrio se puede generalizar para cualquier sistema de prueba o real de gran escala.

Referencias

- Armas Brito, G. E. (1995). Características de frecuencia y voltaje de la carga para estudios de sistemas eléctricos de potencia. (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/1995).
- Chang, C. L., & Huang, P. H. (2014). Load Modeling Study Using Measurement Data for Taiwan Power System, *Journal of Marine Science and Technology*, 22(5), 643-649.
- Concordia, C., & Ihara, S. (1982). Load representation in power system stability studies, *IEEE transactions on power apparatus and systems*, 969-977.
- Dias, L. G. (1985). Load Modelling and Incorporation in Load Flow Studies. (Doctoral dissertation, Technical University of Nova Scotia).
- El-Hawary, M. E. (Enero, 1982). Power system load modeling and incorporation in load flow solutions, *Proceedings of the Third Large Systems Symposium, University of Calgary*.
- El-Hawary, M. E., & Dias, L. G. (1987). Incorporation of load models in load-flow studies: form of model effects, *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution* 134(1), 27-30.
- El-Hawary, M. E., & Dias, L. G. (Julio, 1987). Bus sensitivity to load-model parameters in load-flow studies, *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*, 134(4), 302-305).
- García, L. F. R., Londoño, S. M. P., & Flórez, J. J. M. (2013). Estimación de parámetros de un modelo de carga de recuperación exponencial empleando técnicas metaheurísticas, *Scientia Et Technica*, 18(3), 453-462.
- Haque, M. H. (1996). Load flow solution of distribution systems with voltage dependent load models, *Electric Power Systems Research*, 36(3), 151-156.
- Kepka, J. (2005). Load Modeling for Power System Analysis, *Proceedings of International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 1(1), 1-4.
- Kothari, D.P. & Nagrath, I.J. (2003). *Modern power system analysis*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Kundur, P., Balu, N.J. & Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.
- Murty, P. S. R. (1977). Load modelling for power flow solution, *J. Inst. Eng. (India)*, 58(3), 162-165.
- Nam, S. R., Kang, S. H., Lee, J. H., Choi, E. J., Ahn, S. J., & Choi, J. H. (2013). EMS-data-based load modeling to evaluate the effect of conservation voltage reduction at a national level, *Energies*, 6(8), 3692-3705.
- Pai, M. A. (1989). *Energy Function Analysis for Power System Stability*. Norwell: Kluwer Academic Publishers.

Patel, A., Wedeward, K., & Smith, M. (2014). Parameter estimation for inventory of load models in electric power systems. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science.

Price, W. W., Wirgau, K. A., Murdoch, A., Mitsche, J. V., Vaahedi, E., & El-Kady, M. (1988). Load modeling for power flow and transient stability computer studies, IEEE Transactions on Power Systems, 3(1), 180-187.

Ranade, S. J., Ellis, A., & Mechenbier, J. (2001). The development of power system load models from measurements, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1(1), 201-206.

Rifaat, R. M. (2004). On composite load modeling for voltage stability and under voltage load shedding, Power Engineering Society General Meeting, 1603-1610.

Rodríguez-García, L., Pérez-Londoño, S., & Mora-Flórez, J. (2015). Measurement-based exponential recovery load model: Development and validation, Dyna, 82(192), 131-140.

Saadat, H. (1999). Power system analysis. Boston: WCB/McGraw-Hill.

Stagg, G.W. & El-Abiad A. H. (1968). Computer Methods in Power System Analysis. USA: McGraw-Hill.

Wedeward, K., Adkins, C., Schaffer, S., Smith, M., & Patel, A. (2015). Inventory of load models in electric power systems via parameter estimation. Engineering Letters, 23(1), 20-28.