

Efectos de la agregación y del nodo de medición en el modelado dinámico de carga

Effects of aggregation and the measurement node on dynamic load modeling

J. Gil-Aguirre¹, J. Mora-Flórez², S. Pérez-Londono³

¹ Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: juanfer26@utp.edu.co

² Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: jjmora@utp.edu.co

³ Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: saperez@utp.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En este artículo se analiza el desempeño del modelado dinámico de carga empleando la estrategia de modelado basado en mediciones, al considerar los efectos de la agregación de carga, cuando no las mediciones no se toman directamente del barraje donde se conecta la carga sino en barrajes de nivel de tensión superior. La estimación de los parámetros del modelo de carga se plantea como un problema de optimización de programación no lineal, el cual se resuelve con una técnica meta-heurística llamada búsqueda tabú. La validación del problema propuesto se realiza al comparar dos escenarios topológicos bajo diferentes condiciones de agregación de carga en un sistema de prueba de 19 barras. Los resultados muestran que la estimación del modelo de carga en sistemas de topología enmallada reduce su precisión, comparado con el caso de topología radial, debido a que los nuevos flujos de potencia que se presentan hacen insuficientes las mediciones con las que se pretende estimar el modelo de carga.

PALABRAS CLAVE: Modelado de carga, Agregación de carga, Meta-heurística, Estimación de parámetros.

ABSTRACT

This article analyzes the performance of dynamic load modeling using the measurement-based approach, considering the effects of load aggregation, where the measurements are not taken directly from the load bus, but from higher voltage level buses. The estimation of the parameters of the load model is considered as a problem of optimization of nonlinear programming, which is solved with a meta-heuristic technique called taboo search. The validation of the proposed problem is done by comparing two topological scenarios under different conditions of load aggregation in a 19-bus test system. The results show that the estimation of the load model in a meshed topology systems reduces its accuracy, compared to the case of radial topology, due to the fact that the new power flows presented make insufficient the measurements with which the model is intended to be estimated.

KEYWORDS: Load modelling, Load aggregation, Meta-heuristic, Parameter estimation.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de los sistemas eléctricos de potencia requiere modelos aproximados de los diferentes elementos que lo componen, con el propósito de estudiar y predecir adecuadamente su comportamiento. Entre los elementos de mayor complejidad para modelar, se encuentran las cargas, debido a la alta variabilidad de su composición en el tiempo. Algunos estudios han demostrado la importancia de disponer con modelos de carga pertinentes, que permitan realizar

análisis de estabilidad de tensión de manera práctica y confiable [1]. Por otro lado, son numerosas las investigaciones que abordan el modelado de las cargas actuales, relacionadas principalmente con las Smart-Grid, la generación distribuida, los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de la energía [2], [3], [4]. De otra parte, aunque se logre aproximar el comportamiento de todas las cargas a un modelo matemático determinado, resulta impráctico determinar un modelo para cada una de las cargas conectadas a un

sistema y es necesario emplear la agregación de carga a diferentes niveles de tensión y en diferentes nodos del sistema. La agregación de carga en una barra puede incluir adicionalmente a las cargas, los efectos de transformadores, alimentadores de distribución, dispositivos de compensación, entre otros [5]

La agregación de carga ha sido objeto de varios estudios en los que se observa la complejidad que existe en la formulación de modelos de carga generales formados por la composición de elementos de distinta naturaleza, en [6] se propone una metodología basada en el teorema de Thevenin para estimar los parámetros de la máquina resultante de la agregación de varias cargas tipo motor de inducción y se encontró que la respuesta dinámica de la máquina resultante es diferente a la suma de las respuestas dinámicas individuales de las máquinas. De la misma manera en [7] se conectan en un mismo barraje un motor de inducción y una carga estática y se compara el desempeño del sistema original frente a un modelo dinámico de carga reducido producto de la agregación de dichas cargas, y con un modelo de carga de impedancia constante, al considerar perturbaciones de pequeña y gran magnitud como cambios súbitos en la carga, fallas trifásicas y salida de líneas. Los resultados demuestran la superioridad del modelo de carga agregado para ambos tipos de perturbaciones.

Así mismo, en [8] se propone una metodología para estimar el modelo equivalente de un motor de inducción, a partir de la agregación de un grupo de motores conectados al mismo barraje. Sin embargo, al incluir un motor síncrono dentro del grupo, los resultados de la agregación no fueron satisfactorios.

Por su parte, en [9] se muestra que al utilizar el enfoque basado en componentes, en niveles de baja tensión, se obtienen modelos de carga agregados, los cuales son conectados a redes típicas de baja y media tensión, con el propósito de obtener modelos de carga agregados en niveles de tensión superiores.

La agregación de carga se debe tener en cuenta para la estimación de los parámetros de un modelo de carga, ya sea al emplear la metodología basada en mediciones, en la que se obtienen las medidas de tensión y potencia directamente de la red o por medio de la agregación de características individuales de cargas (denominado enfoque basado en componentes). En la actualidad, las unidades de medición fasorial facilitan la obtención de medidas de tensión y corriente, para analizar el comportamiento transitorio del sistema. Por esta razón, la aproximación basada en mediciones es empleada ampliamente en el modelado dinámico de carga y se utiliza en el presente estudio.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos, al estimar los parámetros del modelo de carga general empleado en *Digsilent* [10]. Se consideran escenarios donde se presenta el fenómeno de la agregación de

carga y a partir de las mediciones tomadas en barrajes diferentes a los de la carga.

2. MODELOS DE CARGA

El modelado de carga consiste en la representación matemática de la relación existente entre la tensión y la potencia, en el barraje de la carga [5]. Los modelos de carga pueden ser clasificados en dos categorías: modelos estáticos y modelos dinámicos.

2.1. Modelos estáticos

Los modelos estáticos expresan la potencia activa y reactiva para cualquier instante de tiempo, en función de la tensión y de la frecuencia. Algunas estructuras son la tipo ZIP, la exponencial, entre los más importantes.

2.2. Modelos dinámicos

Los modelos dinámicos expresan la potencia activa y reactiva como funciones de la tensión y del tiempo. Entre sus estructuras más representativas se tienen:

2.2.1. Modelo de recuperación exponencial

Este modelo se fundamenta en el hecho de que para algunas cargas ante una variación en la tensión de tipo escalón unitario, las potencias activa y reactiva consumidas por la carga tienen una respuesta de tipo exponencial [11].

2.2.2. Modelo compuesto de carga

Los modelos compuestos surgen de combinar los modelos dinámicos y estáticos. Entre los modelos compuestos más empleados, se tiene el modelo compuesto ZIP más un motor de inducción, para analizar varios niveles de composición en la carga [12].

2.2.3. Modelo complejo

Este modelo es adoptado por el programa de estabilidad PTI PSS/E de Siemens [13]. El modelo complejo representa una agregación de motores, cargas no lineales de iluminación, efectos de la saturación de transformadores, capacitores en paralelo y el efecto de la impedancia serie de la línea.

2.2.4. Modelo general

Este modelo es propuesto en [14] y se utiliza en este artículo debido a que generalmente puede usarse para representar un alimentador completo, así como una combinación de cargas dinámicas y estáticas. La formulación del modelo general se presenta en (1) y (2).

$$P_t = P_e \left(1 + \frac{K_{pf} + sT_{pf}}{1 + sT_1} \Delta f + \frac{K_{pu} + sT_{pu}}{1 + sT_1} \Delta u \right) \quad (1)$$

$$Q_t = Q_e \left(1 + \frac{K_{qf} + sT_{qf}}{1 + sT_1} \Delta f + \frac{K_{qu} + sT_{qu}}{1 + sT_1} \Delta u \right) \quad (2)$$

Donde P_e y Q_e son los valores de entrada de potencia activa y reactiva requeridos por *Digsilent* para la simulación, T_1 es la constante de tiempo de la carga

dinámica, las constantes K_{pf} y K_{qf} son los coeficientes de potencia activa y reactiva que dependen de la frecuencia; T_{pf} y T_{qf} son las constantes de tiempo para la potencia activa reactiva que son dependientes de la frecuencia; T_{pu} y T_{qu} corresponden a las constantes de tiempo para la potencia activa y reactiva dependientes de la tensión; finalmente, K_{pu} y K_{qu} son variables internas del modelo y se calculan según (3) y (4).

$$K_{pu} = \alpha P e^{\alpha P} + \beta P e^{\beta P} + c P e^{c P} \quad (3)$$

Donde: $\alpha P + \beta P + c P = 1$

$$K_{qu} = \alpha Q e^{\alpha Q} + \beta Q e^{\beta Q} + c Q e^{c Q} \quad (4)$$

Donde: $\alpha Q + \beta Q + c Q = 1$

Los exponentes ($\alpha P, \beta P, c P, \alpha Q, \beta Q, c Q$) representan el comportamiento de la carga. Un caso particular es cuando se requiere representar la carga mediante modelos de potencia, corriente e impedancia constante, en este caso los exponentes toman los valores de (0,1,2) respectivamente tanto para la potencia activa (índices P), como para la potencia reactiva (índices Q).

3. MODELADO DE CARGA BASADO EN MEDICIONES

Este esquema de modelado utiliza las medidas en los sistemas eléctricos, para ajustar la respuesta de un modelo matemático al comportamiento real de la carga.

En la figura 1 se muestra el esquema del proceso de obtención de un modelo de carga a partir de mediciones [15]. La variable V es la tensión de la carga, P_{km} y Q_{km} son las mediciones de potencia activa y reactiva respectivamente, P_{ks} y Q_{ks} son las potencias activa y reactiva simuladas y finalmente θ es el vector de parámetros del modelo de carga estimados.

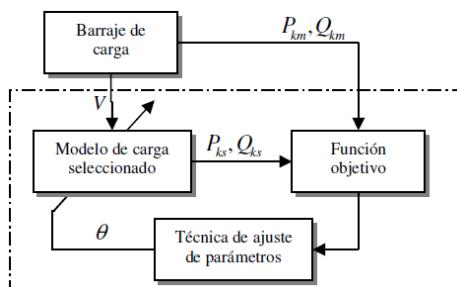


Figura 1. Esquema del proceso Fuente. [15].

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología empleada para la estimación del modelo de carga, se describe a continuación:

4.1. Selección de la estructura del modelo

La estructura del modelo hace referencia a las relaciones matemáticas entre las variables de entrada del modelo de carga (magnitud de tensiones o ángulos en los

barrajes), con las variables de salida (potencia activa y reactiva consumida por la carga).

4.2. Estimación de parámetros

Es el proceso que permite encontrar los parámetros que mejor ajustan la respuesta de un modelo a un conjunto de mediciones. La estimación de parámetros se plantea como un problema de optimización, para minimizar la diferencia entre los valores medidos desde el sistema de potencia con los valores simulados por el modelo de carga. La función objetivo muestra en (5).

$$\min \sum_k [(P_{km} - P_{ks}(\theta))^2 + (Q_{km} - Q_{ks}(\theta))^2]/N \quad (5)$$

La variable N es el número total de muestras.

4.3. Optimización por medio de la búsqueda tabú

Búsqueda Tabú, es un algoritmo meta-heurístico basado en trayectorias, es decir que debe partir de una solución o configuración inicial que se puede construir mediante algún procedimiento heurístico o seleccionada de forma aleatoria. Iterativamente se intenta mejorar cuando se mueve al vecindario de mejor calidad, lo cual se logra bloqueando soluciones de mala calidad durante cierto número de iteraciones (lista tabú). En caso de atascarse en óptimos locales, puede degradar la solución actual para encontrar un nuevo vecindario de exploración [16]. El algoritmo consta de los siguientes pasos:

Inicializar: Definir el número de vecinos y el periodo de bloqueo de la lista tabú.

Paso 1: Generar un vector de configuración inicial de tantas posiciones como variables existan para iniciar el proceso iterativo (aleatorio).

Paso 2: Evaluar la función de adaptación en su configuración actual y almacenarla como mejor solución.

Paso 3: Generar el vecindario de la configuración actual y evaluar configuraciones vecinas que no se encuentren en lista Tabú o que de encontrarse en ésta, generen una mejor solución que la configuración actual. Esta última estrategia se conoce como criterio de aspiración. Si se encuentra una mejor solución, se almacena como solución actual.

Paso 5: Actualizar la lista Tabú.

Paso 6: Verificar el criterio de parada. De ser satisfecho, parar. De lo contrario se vuelve al paso 3.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de prueba empleado se muestra en la figura 2. Consta de dos generadores, conectados mediante transformadores a una red de 230 kV. Se emplean transformadores reductores para cambiar el nivel de tensión de 230 kV a 115 kV. El nivel de tensión es nuevamente reducido para representar un sistema de distribución a 34 kV, al cual se conectan cargas a través

de transformadores reductores. Las cargas se representan mediante elementos estáticos y motores de inducción. Este sistema se emplea para analizar el efecto que presenta la agregación de la carga sobre la estimación del modelo, cuando se considera tanto una topología radial aguas abajo del punto de medición, como una topología enmallada. Las mediciones se toman en la barra C (al inicio del alimentador), aunque la carga representada por un modelo general y un motor de 225 kW, 440 V se encuentran directamente conectados en la barra H. Esto implica que la estimación del modelo, debe considerar los otros elementos conectados a lo largo del alimentador como transformadores y líneas.

Para cada una de las topologías consideradas, se realizaron tres tipos de perturbaciones o eventos, con el fin de adquirir los registros de las variaciones de potencia activa y reactiva para alimentar el algoritmo de estimación de parámetros. El evento 1 corresponde a una falla trifásica a tierra en la línea que conecta los barrajes C y C2, el evento 2 consiste en la desconexión total de la línea que conecta los barrajes B y C y en el evento 3 se realiza deslastre de carga en el barraje C3.

En la tabla 1, se presentan los escenarios de prueba realizados y los respectivos resultados graficados en una figura.

Tabla 1. Escenarios de prueba analizados

Topología	Evento 1: Falla 3φ en línea C-C2	Evento 2: Desconexión de línea B-C	Evento 3: Deslastre de carga barra C3
Radial	Figura 3	Figura 4	Figura 5
Enmallada	Figura 6	Figura 7	Figura 8

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas sobre el sistema.

A. Topología radial

Para este escenario, se estima el modelo agregado de carga que comprende la carga directamente conectada a la barra H (cuyo nivel de tensión es de 440V) y los elementos conectados a lo largo del alimentador (C-H). Las mediciones no se realizan en el barraje H, sino en la barra C, cuyo nivel de tensión es de 230 kV. Para analizar la topología radial aguas abajo del punto de medición, se consideran desactivadas las líneas que conectan las barras E y G con la barra E2.

En las figuras 3 a 5, se presentan los registros obtenidos de las variaciones de potencia activa y reactiva en el sistema (P_{real} y Q_{real}) así como los registros obtenidos con el modelo estimado (P_{sim} y Q_{sim}), ante los tres eventos descritos en la tabla 1. De las figuras se observa que la respuesta del modelo de carga ante los eventos, presenta una tendencia similar a la señal medida. Esto se explica debido a que, aunque las mediciones no son tomadas directamente del barraje de carga, y dado que se está analizando una topología radial, el modelo dispone de la información necesaria sobre la respuesta dinámica de la carga para reproducir adecuadamente dicho comportamiento.

B. Topología enmallada

Al igual que en el escenario anterior, se estima el modelo agregado de la carga desde el punto de medición C, pero en esta ocasión se han activado las dos líneas que conectan las barras E y G con la barra E2. La toma de las mediciones se realiza en el barraje C, a un nivel de tensión de 230 kV.

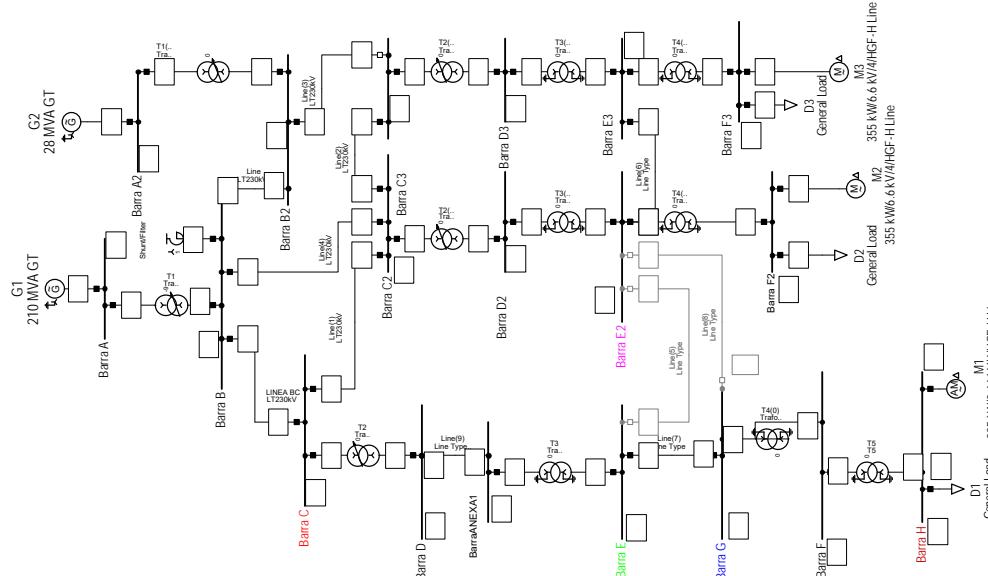


Figura 2. Sistema de potencia utilizado en las pruebas. Fuente. Elaboración propia.

En las figuras 6, 7 y 8, se observa que la respuesta del modelo empieza a perder precisión. Esto se debe a que aunque se realizaron las mismas perturbaciones, el escenario 2 no es radial. En este caso se registran flujos de potencia aguas abajo del punto de medición y la información con la que dispone el modelo no es la suficiente para reproducir satisfactoriamente la señal medida.

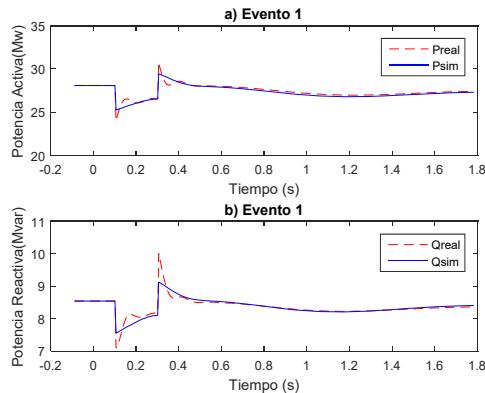


Figura 3. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 1 y el evento 1. **Fuente.** Elaboración propia.

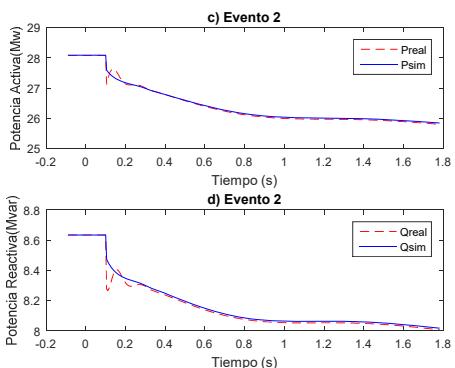


Figura 4. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 1 y el evento 2. **Fuente.** Elaboración propia.

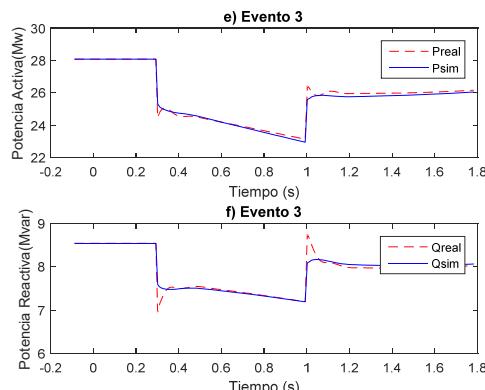


Figura 5. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 1 y el evento 3. **Fuente.** Elaboración propia.

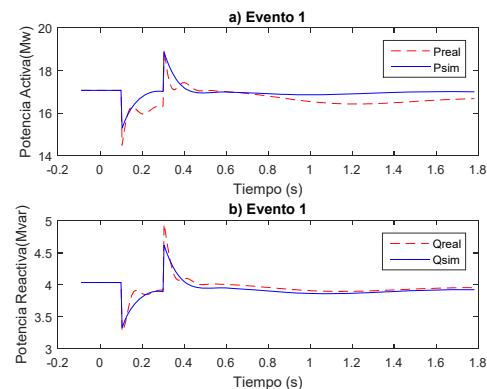


Figura 6. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 2 y el evento 1. **Fuente.** Elaboración propia.

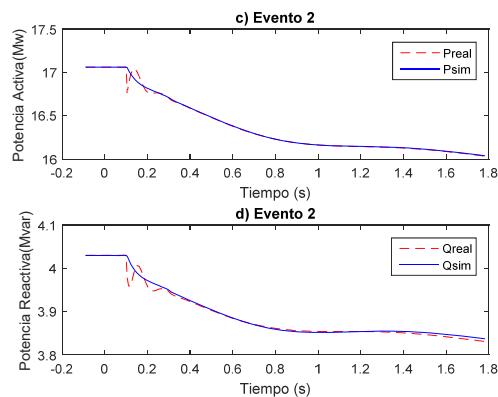


Figura 7. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 2 y el evento 2. **Fuente.** Elaboración propia.

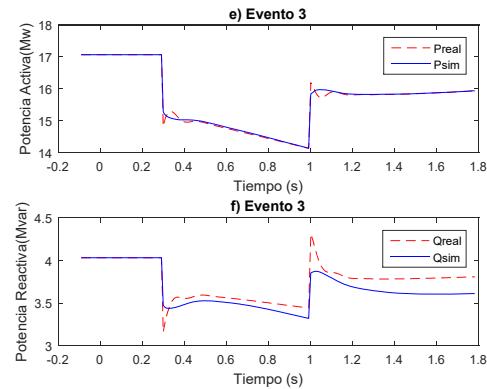


Figura 8. Respuesta de la potencia activa y reactiva para el escenario 2 y el evento 3. **Fuente.** Elaboración propia.

En la Tabla 2, se presentan los errores obtenidos en la estimación, donde se aprecia que el error de estimación es menor para el caso radial que para el enmallado.

Tabla 2. Resultado de la función objetivo por evento para el escenario1 (Error_1) y el escenario2 (Error_2).



Evento	Error_1	Error_2
1	$3.3077e^{-4}$	$5.8681e^{-4}$
2	$8.9193e^{-6}$	$3.3840e^{-4}$
3	$2.2848e^{-4}$	$4.3669e^{-4}$

Fuente. Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una metodología de estimación de los parámetros del modelo de carga general, mediante una estrategia de optimización que utiliza la técnica de la búsqueda tabú. Se analizan diferentes escenarios de agregación de carga, en los que se considera el efecto del cambio de topología aguas abajo del punto de medición.

De los resultados obtenidos, se demuestra que el modelo propuesto reproduce adecuadamente los datos empleados para la estimación, cuando la parte del sistema de potencia a representar es radial y el modelo dispone de toda la información del comportamiento dinámico de la carga conectada. Sin embargo, el modelo reduce la exactitud, cuando se presenta una topología enmallada y hay intercambios de potencia con otras partes del sistema de potencia que no tienen medidas. Para este caso, es necesario aplicar metodologías de identificación de áreas basadas en métricas como distancias eléctricas entre barras, que permitan desacoplar áreas densamente enmalladas entre sí, para posteriormente identificar modelos de carga por zonas. Este análisis hará parte de investigaciones posteriores desarrolladas por los autores.

7. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación contó con el apoyo del programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión bajo el proyecto “Modelado de carga dinámica a partir de Mediciones en sistemas de potencia modernos” contrato número 6175-2017.

8. REFERENCIAS

- [1] C. Taylor, N. Balu and D. Maratukulam, Power system voltage stability. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] Xie, L., Thatte, A. A., & Gu, Y. "Multi-time-scale modeling and analysis of energy storage in power system operations", IEEE EnergyTech pp.1–6, Cleveland, OH, USA, May 2011.
- [3] Tremblay, O., Dessaint, L. -a., & Dekkiche, A.-I. "A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicle Power and

Propulsion Conference pp.284–289 , Arlington, TX, USA, Sep 2007.

[4] Ortega, A., Milano, F. "Generalized model of vsc-based energy storage systems for transient stability analysis", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31 no. 5, pp. 1–12, 2016.

[5] P. Kundur, N. Balu and M. Lauby, Power system stability and control. New York: McGraw-Hill, 2009.

[6] M. Taleb, M. Akbaba, & E. Abdullah. "Aggregation of induction machines for power system dynamic studies", IEEE Transactions on Power Systems, vol.9 no. 4, pp. 2042–2048, Nov, 1994.

[7] O. H. Abdalla, M. E. Bahgat, A. M. Serag, and M. A. El-Sharkawi, "Dynamic load modelling and aggregation in power system simulation studies," 12th International Middle East Power System Conference, MEPCON, Aswan, Egypt, 2008.

[8] X. Liang and C. Chung, "Bus-Split Algorithm for Aggregation of Induction Motors and Synchronous Motors in Dynamic Load Modeling", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 2115-2126, May, 2014.

[9] A Collin, I. Hernando-Gil, J. Acosta, and S. Djokic, "An 11 kV steady state residential aggregate load model. Part 1: Aggregation methodology," IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society, Trondheim, Norway, 2011.

[10] Integrate Power System Analysis Software DIgSILENT, "User Manual PowerFactory Version 15.1", Gomaringen, Germany, November 2013.

[11] D. Karlsson and D. J. J. Hill, "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," IEEE Trans. Power Syst., vol.9, no.1, pp.157-166, Feb. 1994.

[12] EPRI, "Measurement-Based Load Modeling," Epri, 2006.

[13] W. Price et al., "Load representation for dynamic performance analysis (of power systems)", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 472-482, May, 1993.

[14] C. Lin, A. Chen, C. Chiou, C. Huang, H. Chiang, J. Wang and L. Fekih-Ahmed, "Dynamic load models in power systems using the measurement approach", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 309-315, Feb, 1993.

[15] L. Rodríguez-García, S. Pérez-Londoño and J. Mora-Flórez, "Measurement-based exponential recovery load model: development and validation", DYNA, vol. 82, no. 192, pp. 131-140, 2015.

[16] F. Glover, Tabu search. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.