



Conference Paper

Estimación de parámetros para cargas contaminantes conectadas a las redes de distribución

Pedro Raúl De León Guerra

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Abstract

In this paper we propose a new algorithm for the estimation of the parameters of the harmonic loads connected to the electric distribution system. The new parameter estimation algorithm is based on the weighted least-squares technique. The estimation algorithm solves an optimization problem and minimizes a set of variables which must comply with a series of specifications or characteristics of the harmonic loads. The estimation algorithm is able to obtain a load model with good accuracy comparatively to current -model of the system, due to a good engineering estimation of the initial conditions. Finally the new estimation algorithm could be used for power quality studies and to measure the contribution of the harmonic contamination of the clients connected to the electrical distribution system.

Keywords: Harmonics, parameter estimation, weighted least squares, models.

Resumen

En este artículo se propone un nuevo algoritmo para la estimación de los parámetros de las cargas armónicas conectadas al sistema de distribución eléctrica. El nuevo algoritmo de estimación de parámetros esta basado en la técnica de los mínimos cuadrados ponderados. El algoritmo de estimación resuelve un problema de optimización y minimiza un conjunto de variables las cuales deben cumplir con una serie de especificaciones o características de las cargas armónicas. El algoritmo de estimación es capaz de obtener un modelo de las cargas con una buena exactitud respecto al modelo real del sistema, debido a una buena estimación ingenieril de las condiciones iniciales. Finalmente el nuevo algoritmo de estimación podría ser utilizado para estudios de calidad de la energía y medir la contribución de la contaminación armónica de los clientes conectados al sistema de distribución eléctrica.

Corresponding Author:

Pedro Raúl De León Guerra
pedro.deleon@utp.ac.pa

Received: 15 November 2017

Accepted: 5 January 2018

Published: 4 February 2018

Publishing services provided
by Knowledge E

© Pedro Raúl De León Guerra. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Selection and Peer-review under the responsibility of the ESTEC Conference Committee.



Palabras claves: Armónicos, estimación de parámetros, mínimos cuadrados ponderados, modelos.

1. Introducción

La presencia de equipos basados en la electrónica de potencia en las redes de distribución eléctrica es cada vez mayor. Estos equipos basados en la electrónica de potencia habitualmente son cargas que no sólo se encuentran en la industria, sino también en los sistemas de energía eléctrica comercial y residencial. Los dispositivos electrónicos son cargas no lineales que consumen corrientes armónicas distorsionada, incluso en presencia de un suministro de tensión sinusoidal perfecta. Estas corrientes armónicas llegan a distorsionar la forma de la onda de tensión debido a la impedancia del sistema. Por lo tanto, el aumento de los niveles de contaminación armónica en las redes de distribución producen una serie de problemas bien conocidos descritos en la literatura (flujo de potencia con armónicas, interferencias electromagnéticas, mal funcionamiento de las protecciones, fallas de aislamiento, resonancia armónica (R. C. Dugan et al., 1996). De hecho, sabemos que hoy los índices de contaminación armónica en las redes de distribución se encuentran cerca e incluso superiores a los límites obligatorios recomendados por las directrices o normas internacionales (IEEE Standard 519; 1992) (EN-50 160, 2000). Con el fin de poder simular la propagación de los armónicos en una red, se debe contar con los modelos adecuados para las cargas ya sean lineales o no lineales. En general, los dispositivos de electrónica de potencia que generan corrientes armónicas se pueden modelar utilizando modelos de fuente de corriente simples o modelos de corriente complejos. La simulación normalmente se realiza en el dominio de la frecuencia, o en el dominio del tiempo, o en ambos dominios. Sin embargo, para describir una instalación industrial compleja en términos de sus componentes individuales resultaría totalmente ineficiente. Los modelos aproximados para cada cliente contaminante serían preferiblemente los mejores para realizar un estudio completo de los armónicos en los sistemas de distribución.

El objetivo de este artículo es proponer un nuevo algoritmo de estimación que nos ayude a obtener un modelo aproximado para la identificación de los parámetros de las cargas contaminantes lineales y no lineales instaladas en el lado del consumidor.

Para la obtención de estos parámetros el nuevo algoritmo de estimación se utiliza una serie de medidas armónicas en magnitud de corriente y tensión obtenidas en el punto común de acoplamiento. El desarrollo de nuestro algoritmo de estimación se

basa en el uso de la metodología de los mínimos cuadrados ponderados (J. M. M. Ortega et al., 2005).

2. Metodología

El método propuesto en este artículo realiza una estimación de los parámetros que caracterizan el punto de operación de una carga en estado estacionario. Típicamente, las instalaciones industriales se componen de una serie de cargas lineales y no lineales conectadas a la red de distribución eléctrica a través de los transformadores de potencia adecuados. El diagrama simplificado de una instalación genérica, que comprende una carga lineal, una carga no lineal y un compensador de potencia reactiva, se muestra en la Figura 1.

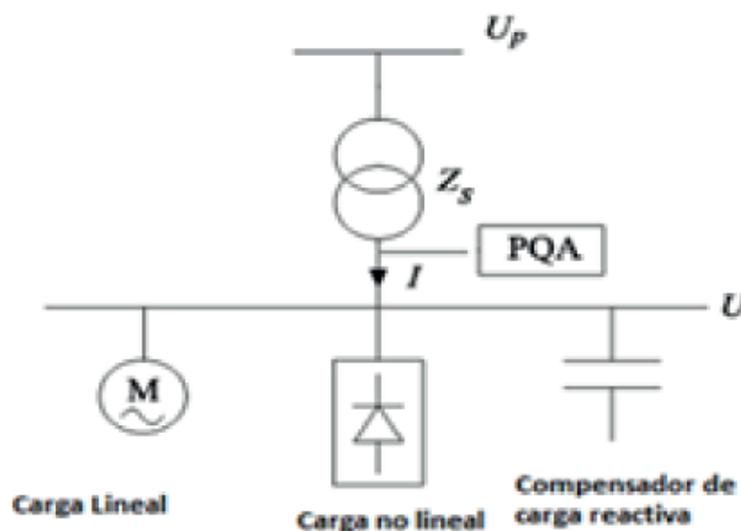


Figura 1: Esquema Unifilar de una instalación industrial.

Para el planteamiento de nuestro trabajo suponemos que los parámetros del transformador son conocidos, y que la tensión armónica en su lado secundario se puede obtener de la siguiente ecuación (1),

$$U_k^m = U_{pk}^m - Z_{sk} I_k^m \tag{1}$$

en donde k denota el orden armónico, U_{pk}^m es la medida tensión en el primario, Z_{sk} es la impedancia serie del transformador y I_k^m es la corriente medida de la carga.

Cada corriente armónica total y la suma de todas las corrientes armónicas individuales utilizadas en este artículo representan cada componente de la carga y son una

función no lineal de las tensiones armónicas y de los parámetros x , la definición del punto de funcionamiento correspondiente, se puede ser expresada como (2),

$$I_k = f_k(x, U_1, \dots, U_k, \dots, U_n) \quad (2)$$

Algunos de estos parámetros son cantidades constantes, mientras que otros varían en función del punto de funcionamiento y el voltaje aplicado. Para la obtención de los parámetros x y las tensiones armónicas, U , se resuelve (3) mediante la resolución del método mínimo de cuadrados ponderados (A. Abur and A. Gómez-Expósito, 2004).

$$\min_{x,U} J(x) = \sum_{i=1}^m r^T W r \quad (3)$$

Donde, W es una matriz de ponderación que debe tener en cuenta la relativa exactitud de las mediciones.

El vector residuo, r estará dado por (4),

$$r = \begin{bmatrix} I_{1r}^{med} - I_{1r}^{est} \\ I_{1i}^{med} - I_{1i}^{est} \\ U_1^{med} - U_1^{est} \\ I_k^{2 med} - I_k^{2 est} \\ U_k^{2 med} - U_k^{2 est} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Cada valor de corriente medida (I_{1r}^{med} , I_{1i}^{med} , $I_k^{2 med}$) y estimada (I_{1r}^{est} , I_{1i}^{est} , $I_k^{2 est}$) igualmente para cada valor de tensión medida (U_1^{med} , $U_k^{2 med}$) y estimada (U_1^{est} , $U_k^{2 est}$) estos valores dependen de la particularidad de cada modelo carga armónica tomada de (Task Force Harmonic Modeling and Simulation, 1996) (J. García Mayordomo et al., 1998).

3. Metodo numérico de resolución

En esta sección se describirá el problema de optimización y la implementación de nuestro nuevo algoritmo de estimación, para la estimación de los parámetros de las cargas lineales y no lineales. Nuestro problema de optimización planteado, minimiza un conjunto de variables las cuales deben cumplir con una serie de especificaciones o características de las cargas lineales y no lineales.

Por lo anterior, nos encontramos con un problema de optimización no lineal con varias variables. En los últimas décadas los métodos del punto interior, han ido evolucionando y se han adaptados para resolver problemas de optimización no lineal, estos

algoritmos han demostrado una alta eficiencia en la resolución de problemas lineales de gran dimensión (IEEE Power Engineering Society Task Force on Interior-Point Applications to Power Systems). Se considera el problema siguiente (5),

$$\begin{aligned} & \text{Min} F(y) \\ & \text{sujeto a } Mx > N \end{aligned} \tag{5}$$

Donde F es la función objetivo definida, donde M y N representan las matrices de las restricciones.

La función objetivo definida y sus restricciones fueron planteadas y resueltas con el uso del algoritmo punto interior desarrollado en el entorno de Matlab®.

3.1. Cálculo de las condiciones iniciales del algoritmo

Una de las desventajas de los métodos de optimización no lineal, es la asignación de un punto inicial para la ejecución del mismo, éstos tratan de encontrar un óptimo local; sin embargo este óptimo local encontrado puede distar del óptimo global.

Para tratar de solucionar esta desventaja de manera ingenieril se consultó la bibliografía descrita en (Arrillaga, J et al., 1985) (G. T. Heydt; 1991) (A. G. Expósito; 2002) y se formuló la utilización de la siguiente metodología.

Como primer punto en el desarrollo de la metodología propuesta, se formula una función de aproximación para el cálculo de las condiciones iniciales del nuevo algoritmo de estimación, esta función de aproximación cuenta con la siguiente información de entrada que son los parámetros medidos de corriente y tensión obtenidos mediante un analizador de calidad de energía, los datos de los equipos, para la carga lineal (motor) se contaba con información de su Potencia Activa (P) y Potencia Reactiva (Q) y los datos de placa del transformador de distribución. A continuación se procede a describir de manera secuencial la formulación de las expresiones utilizadas en la resolución de la función de aproximación. El valor de la tensión en la barra de distribución secundaria, U_k^m , del transformador se obtiene utilizando la ecuación (1). Luego, considerando la ecuación distorsión corriente armónica típica para una carga no lineal (6)

$$THD_i^2 = \frac{\sum_{k>1}^{\infty} I_k^2}{I_1^2} \tag{6}$$

despejando de (6), se obtiene la corriente armónica fundamental, I_1 de la carga no lineal, expresada por (7),

$$I_1 = \frac{\sqrt{\sum_{k>1}^{\infty} I_k^2}}{THD_i} \quad (7)$$

Para la estimación de la corriente del compensador de carga reactiva, se considera que de acuerdo con las normas técnicas los bancos de compensación reactiva, no debe exceder al 10% de la potencia nominal del transformador. Por lo tanto, podemos obtener la potencia reactiva del compensador de carga reactiva, Q_C , mediante la siguiente ecuación (8), donde F_C , es el factor de carga, S_n es la potencia del transformador y S_b es la potencia aparente base del sistema.

$$Q_C = F_C * \frac{S_n}{S_b} \quad (8)$$

La corriente del compensador de carga reactiva se estima mediante la siguiente ecuación (9),

$$I_{\text{compensador de carga reactiva}} = \frac{Q_c}{U_k^m} \quad (9)$$

La corriente fundamental de la carga lineal (motor) se obtiene mediante la aplicación de ley de corrientes de kirchhoff (10), queda expresa como,

$$I_{\text{motor}} = I_{\text{medida}} - I_{\text{rectificador controlado}} - I_{\text{compensador de carga reactiva}} \quad (10)$$

Los valores calculados de corrientes para el motor, el rectificador controlado y la corriente del compensador de carga reactiva nos servirán para calcular los valores iniciales de los parámetros. Los parámetros de la carga lineal (motor), se expresa en términos de su conductancia, G_l , y su susceptancia, B_l , estos parámetros están expresados respecto de la Potencia Activa (P) y la Potencia Reactiva (Q).

$$G_l = P_l; B_l = -Q_l$$

Para el cálculo de los parámetros del compensador de carga reactiva, y sus valores de su reactancia capacitiva X_c y capacitancia C , utilizamos las siguientes expresiones (11),

$$X_c = \frac{U_1}{I_c}; C = \frac{1}{\omega X_c} \quad (11)$$

En el cálculo de los parámetros de la carga no lineal (rectificador controlado) se utiliza la siguiente ecuación (12) para el cálculo de la potencia reactiva del condensador,

$Q_{\text{rectificador}}$

$$Q_{\text{rectificador controlado}} = Q_{\text{sistema}} - Q_{\text{motor}} - Q_{\text{compensador de carga reactiva}} \quad (12)$$

Para los cálculos de los ángulos de disparo, α_{disparo} , y final de conmutación, $\delta_{\text{final conmutación}}$ del rectificador controlado, se utilizaron las siguientes expresiones (13) (14),

$$\alpha_{\text{disparo}} = \text{atan} \left(\frac{Q_{\text{rectificador controlado}}}{P_{\text{rectificador controlado}}} \right) \quad (13)$$

$$\delta_{\text{final conmutación}} = \alpha_{\text{disparo}} + \mu \quad (14)$$

donde, $\mu = 5 * \frac{\pi}{180}$ es un ángulo de conmutación asumido para una carga ligera (Wildi, Theodore;2007)

Para el cálculo de la reactancia del rectificador controlado, X , se asume un 10% de la potencia del rectificador controlado. La potencia aparente, $S_{\text{rectificador controlado}}$, del rectificador controlado se estimada mediante la siguiente expresión (15),

$$S_{\text{rectificador controlado}} = P_{\text{rectificador controlado}} + Q_{\text{rectificador controlado}} \quad (15)$$

Para la estimación del nivel de filtrado f , se considera que la reactancia de alisado X_f es 10 veces mayor que la reactancia del rectificador controlado, X , está dada por la siguiente expresión (16),

$$X = 0.10 * \left(\frac{1}{S_{\text{rectificador controlado}}} \right) \quad (16)$$

Luego de estimado todos los parámetros de las cargas lineal y no lineal, se procede a ejecutar el nuevo algoritmo de estimación.

4. Validación

El algoritmo de estimación de parámetros propuesto es validado con un caso en donde se estimaran los parámetros. Para nuestro caso en estudio, figura 1, se considera un compensador de carga reactiva, una carga lineal (motor), una carga no lineal (rectificador controlado). Las condiciones de simulación utilizadas para la validación del algoritmo de estimación, se muestran en la Tabla 1. Los resultados se pueden observar en la Tabla 2.

Una vez obtenidos los parámetros a través del proceso de estimación se evalúan de forma comparativa las magnitudes de la intensidad y tensiones estimadas con las medidas. En la Figura 2, se demuestra que no existe una diferencia significativa entre las intensidades y tensiones medidas respecto a las estimadas, lo cual es indicativo de una buena aproximación del nuevo algoritmo de estimación.

TABLA 1: Condiciones de simulación.

Cargas	Datos
Transformador	20/0.4 kV 1000 kVA $\epsilon_{sc}=4\%$ $X_{sc}/R_{sc}=5$
Carga Lineal (motor)	300 kW 150 kVA
Compensador de carga reactiva	200 kvar
Carga No lineal (rectificador)	$X1=0.025\Omega$ $f1=10$ $\alpha=10^\circ$ $\delta=15^\circ$

TABLA 2: Resultado Caso.

	Valores Iniciales	Valores Actuales	Valores Estimados
G_i (p.u)	0.1103	0.3000	0.2877
B_i (p.u)	0.0764	0.1500	0.1310
C (p.u)	0.0003	0.0006	0.0006
X_i (p.u)	0.3658	0.1563	0.1440
f_i	10.00	10.00	11.873
α_i (rad)	0.0012	0.7046	0.7839
δ_i (rad)	0.0885	0.7919	0.8411

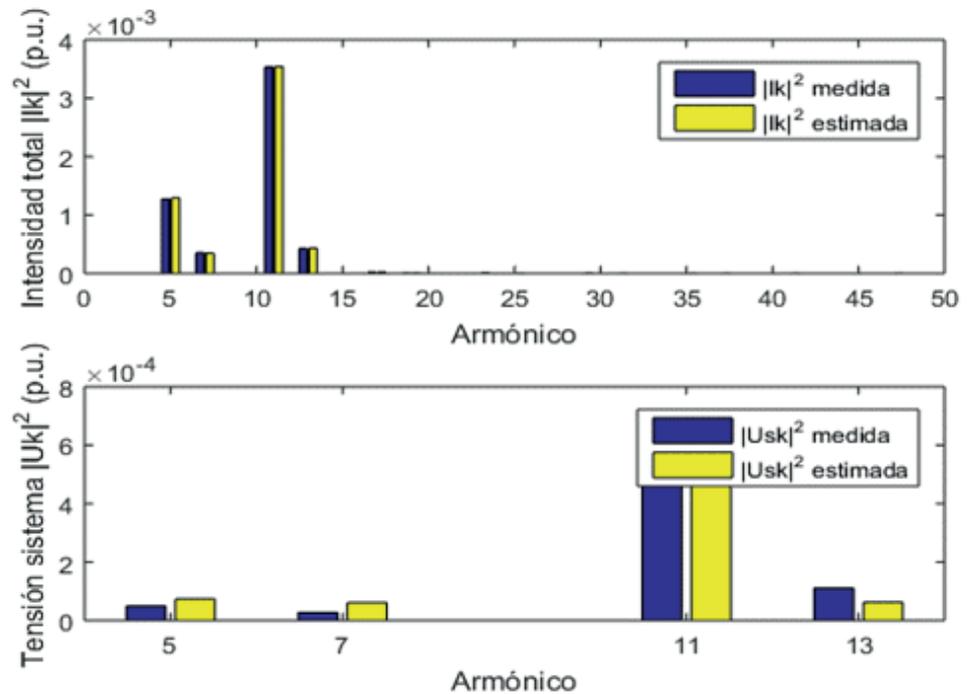


Figura 2: Intensidades y tensiones medidas respecto a las estimadas.

5. Conclusiones

En este artículo, se implementó con éxito la metodología de los mínimos cuadrados ponderados para la estimación de los parámetros de las cargas armónicas contaminantes instaladas en una red de distribución. El nuevo algoritmo de estimación tiene la capacidad de estimar con una razonable exactitud los valores de los parámetros a estimar, esto se hace posible debido a la buena elección de las condiciones iniciales calculados con una nueva función de aproximación. La implementación de este nuevo algoritmo de estimación ayudaría en los estudios de calidad de energía, para determinar la contribución de los clientes contaminantes conectados a la red de distribución para así aplicar las respectivas sanciones que se aplique en las normativas para clientes contaminantes. Los resultados obtenidos representan una referencia para la extensión de este nuevo algoritmo de estimación para identificar fuentes de contaminación armónica en los sistemas residenciales.

Referencias

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, *"Power System Quality"*. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [2] IEEE "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1992. *IEEE Standard 519*.
- [3] EN-50 160 Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, 2000.
- [4] Task Force Harmonic Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.11, No.1, pp. 452-465, January, 1996.
- [5] J. M. M. Ortega, A. G. Expósito, A. L. T. García, and M. B. Payan, "A state estimation approach to harmonic polluting load characterization in distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 765-772, May 2005.
- [6] *IEEE Power Engineering Society Task Force on Interior-Point Applications to Power Systems*, "Mini Lecture Interior-Point Application to Power Systems."
- [7] Wildi, Theodore. *"Máquinas eléctricas y sistemas de potencia"*. Sexta edición. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2007.
- [8] J. García Mayordomo, M. Izzeddine, L. Zabala, "A Contribution for Modeling Controlled and Uncontrolled AC/DC Converters in Harmonic Power Flows", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, October 1998, pp. 1501-1508.

- [9] A. Abur and A. Gómez-Expósito, *"Power System State Estimation: Theory and Implementation"*. New York: Marcel -Dekker, 2004.
- [10] Arrillaga, J., Bradley, D.A., Bodger, P.S.; *"Power System Harmonics"*, John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [11] G. T. Heydt, *"Electric Power Quality"*, Ed. Stars in a Circle Publication, 1991.
- [12] A. G. Expósito. *"Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica"*. Madrid, Spain: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2002.

Autorización y Exención de Responsabilidad

El autor autoriza al ESTEC a publicar el documento en las actas de la conferencia. Ni ESTEC ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el documento.