

Caracterización de datos de desbalance de tensión en el suministro eléctrico industrial

Julio R. Gómez
 Marcos A. de Armas
 Percy R. Viego
 Ángel Costa

Recibido: Julio del 2006
 Aprobado: Septiembre del 2006

Resumen / Abstract

En este trabajo se abordan aspectos probabilísticos relacionados con el desbalance de tensión en una red de suministro eléctrico industrial donde predominan cargas trifásicas. Se muestra el perfil de desbalance de tensión en diferentes subestaciones industriales, describiendo los datos registrados en términos estadísticos. Se muestra la necesidad de considerar este tipo de deterioro de la calidad de la energía en diversos análisis operacionales relacionados con el comportamiento en estado estable de los motores asincrónicos.

Palabras clave: Algoritmos genéticos, motor asincrónico, parámetros, desbalance de tensión

One of the goals of parameter identification in asynchronous motors is efficiency evaluation in field conditions. According to the equivalent circuit method, knowing the parameters of the Park circuit in the operating range of the machine, adapted to the power quality of field conditions, corresponding calculation are made. In unbalanced voltage condition, there are some complexities because there are two sets of parameters belonging to the positive and negative sequence networks differing fundamentally in the rotor circuit. This paper, with the application of genetic algorithm; (GA), a new approach is proposed to identified the parameters of both sequences combining the powerful proprieties of GA with one initial vector of parameters that allows reduce the search time without needs special proofs of some complexity that in field conditions are very expensive or impossible to do.

Key words: Genetic algorithm, asynchronous motors, voltage unbalance, parameter identification

INTRODUCCIÓN

El desbalance de tensión, aunque es más frecuentemente encontrado en redes de distribución comerciales y residenciales, también está presente en redes industriales debido a diversos factores, entre los que se encuentran la conexión de cargas monofásicas (equipos de soldadura, alumbrado, estufas, transformadores monofásicos, equipos auxiliares de control, etc.) y problemas operacionales. Todas estas causas son categorizadas como factores funcionales. También existen factores denominados

estructurales, entre los cuales se encuentran las asimetrías en las impedancias de las líneas aéreas y cables y la propia estructura física de los transformadores.¹⁻³

Los factores estructurales provocan desbalances de tensión normalmente constantes, debido a la naturaleza poco cambiante de la red; mientras que el desbalance de origen funcional depende de las cargas, que tienen ciclos variables de demanda y provocan fluctuaciones de la corriente y, por tanto, del desbalance.

La mayoría de los estudios presentados en la literatura, que analizan el comportamiento de los motores trifásicos asincrónicos operando en redes con desbalance de tensión, parten de establecer el nivel de desbalance o le dan un carácter determinístico, obviando lo que sucede realmente en la práctica. Producto de que la potencia trifásica que fluye por las tres fases varía con la conmutación aleatoria de las cargas, el nivel de desbalance de tensión también fluctúa aleatoriamente. La consideración del comportamiento aleatorio del desbalance de tensión es importante en el establecimiento de los límites permisibles y en el estudio de su efecto sobre las cargas sensibles, como son los motores asincrónicos en un ambiente industrial.

En el presente trabajo se investiga la función de distribución de probabilidades del nivel de desbalance de tensión en diferentes subestaciones de un sistema de suministro eléctrico industrial y los resultados se muestran con medidas estadísticas que lo caracterizan. También se presenta un enfoque probabilístico al incremento de temperatura de un motor trabajando en estas condiciones.

MEDIDAS Y NORMATIVAS DEL DESBALANCE DE TENSIÓN

En las normas internacionales se han establecido límites para la explotación eficiente de las máquinas eléctricas en condiciones de desbalance de tensión y procedimientos para determinar la magnitud del desbalance.

La norma ANSI C50.41.4.2 establecen que un desbalance superior a un 1% es una condición inusual que debe eliminarse. La IEC 34.1.12.2.1 plantea que los motores deben ser capaces de operar por un largo período de tiempo con un desbalance de un 1%, o por un corto período de tiempo que no exceda varios minutos con un desbalance de 1,5 %. Además, durante las pruebas de elevación de temperatura, la tensión de secuencia negativa debe ser inferior a un 0,5% de la tensión de secuencia positiva sin componentes de secuencia cero. La norma NEMA MG1 14.35 recomienda un *derating* a aplicar a los motores en función del desbalance.

Se emplean fundamentalmente tres definiciones de desbalance de tensión:

1. Factor de desbalance de tensión de línea definido por la NEMA:

$$FDVL = \frac{\text{Máx}(|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|)}{V_{avg}} \cdot 100\%$$

donde:

$\text{Máx}(|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|)$: Valor máximo de la diferencia entre los voltajes de línea y el valor promedio de los voltajes de línea definido como:

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$$

2. Factor de desbalance de tensión de fase según la IEEE Std. 141:

$$FDVF = \frac{\text{Máx}(|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|)}{V_{avg}} \cdot 10$$

donde:

$\text{Máx}(|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|)$: Valor máximo de la diferencia entre los voltajes de fase y el valor promedio de los voltajes de fase definido como:

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

3. Factor de desbalance de tensión definido por la IEC como la relación entre la componente de secuencia negativa V_2 y la componente de secuencia positiva V_1 de la tensión:

$$FDV = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100\%$$

De estos factores el más utilizado en la práctica es el propuesto por la NEMA, ya que aunque no especifica qué tipo de desbalance tiene lugar, evita el uso del álgebra compleja y el trabajo con componentes simétricas, empleando las mediciones del valor rms de las tensiones de línea directamente.

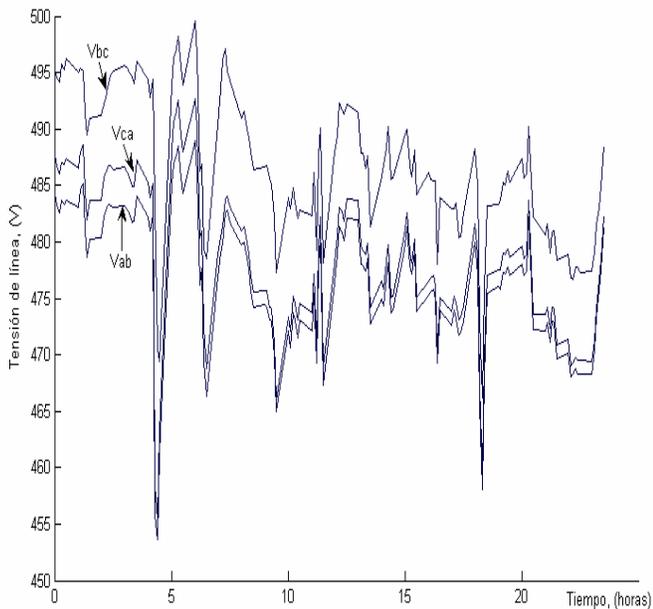
MEDICIONES REALIZADAS

Las mediciones se realizaron en la red de suministro eléctrico industrial de la Empresa Azucarera Ciudad Caracas, en la provincia de Cienfuegos, utilizando un analizador de redes digital modelo Power Sight 3000 que puede registrar simultáneamente tensión, corriente, potencia activa y reactiva, etc. El intervalo de tiempo entre mediciones se programó para 10 min y se conectó durante 24 h al secundario, los transformadores de 1000 kVA, 6,3/0,48 kV de las subestaciones industriales 5TP1 y 5TP2, que alimentan las cargas del área de generación de vapor. Se obtuvieron los perfiles de tensión que se muestran en la figura 1 a) y b), en las cuales se

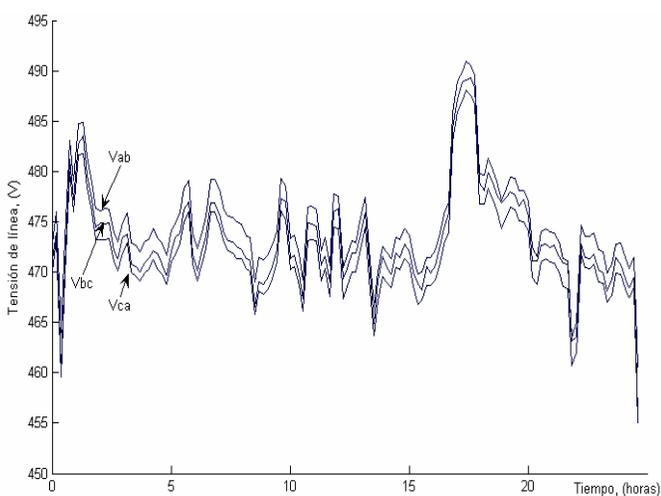
aprecia la variación de la tensión con el tiempo en cada subestación.

La magnitud del desbalance de tensión se calculó según definición de la NEMA y su comportamiento puede observarse en la figura 2.

Estas mediciones de campo indican claramente que el desbalance de tensión varía con el tiempo debido a los cambios continuos en las condiciones de carga y en la configuración del sistema.



a)

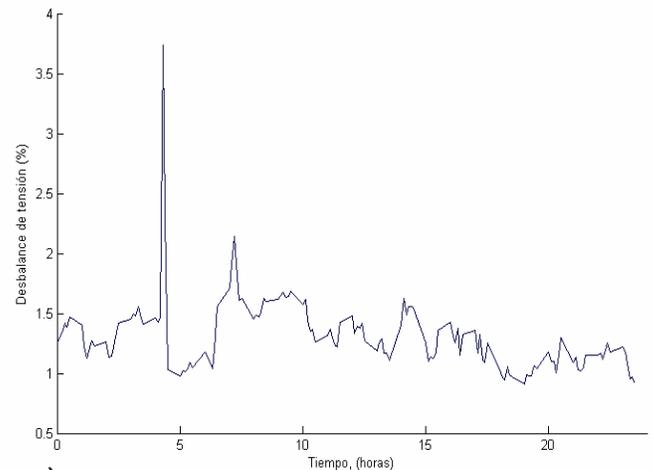


b)

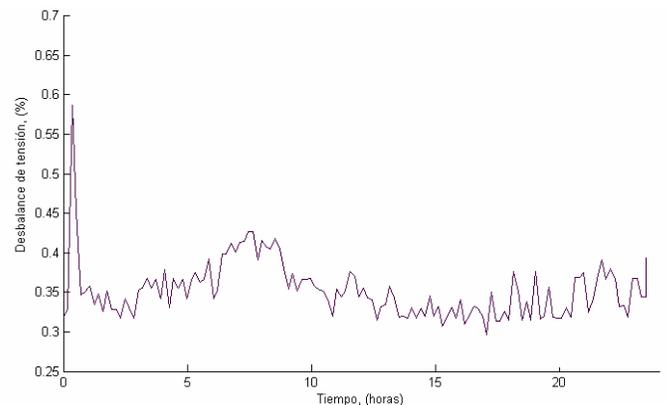
Perfil de tensión de línea en diferentes subestaciones:
a) Sub 5TP1; b) Sub 5TP2.

1

Se puede apreciar el hecho de que durante gran parte del tiempo se supera el 1% en la Sub-5TP1, excediendo así el nivel recomendado por las normas internacionales para el funcionamiento correcto de los motores asíncronos. Es importante tener en cuenta que en este caso, la tensión de línea V_{bc} es siempre mayor que V_{ab} y V_{ca} lo cual puede ser indicativo de un problema estructural (defecto en el propio transformador, en el cambia *taps*, terminales de salida, etc.) que debe ser investigado por el personal de operación y mantenimiento de la instalación.



a)



b)

Porcentaje de desbalance calculado a partir de las mediciones anteriores: a) Sub 5TP1; b) Sub 5TP2.

2

CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS DE LA TENSIÓN DE DESBALANCE

Los valores calculados del desbalance de tensión presente en ambas subestaciones pueden ser descritos en términos estadísticos, de manera similar al tratamiento dado a otra información de carácter aleatorio⁴ para transformarlos y mostrarlos en una forma compacta y de más fácil interpretación.

Utilizando las herramientas estadísticas del Matlab 7.0, se determinan los parámetros de la función de distribución de dichas mediciones cuyas gráficas se muestran en la figura 3 con una densidad de distribución dada por:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(X - X_{avg})^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots(1)$$

Para ambos casos los parámetros de la distribución se dan en la tabla 1.

Esta forma de representar los datos esconde la información de cuándo tiene lugar en el tiempo determinada magnitud del desbalance, que es importante si el interés es precisar el efecto del mismo sobre la eficiencia y otras características operacionales de los motores asíncronos con carga variable, pero que se resuelve si el análisis estadístico se aplica a subintervalos.

Tabla 1
Medidas estadísticas del desbalance de tensión de la figura 2

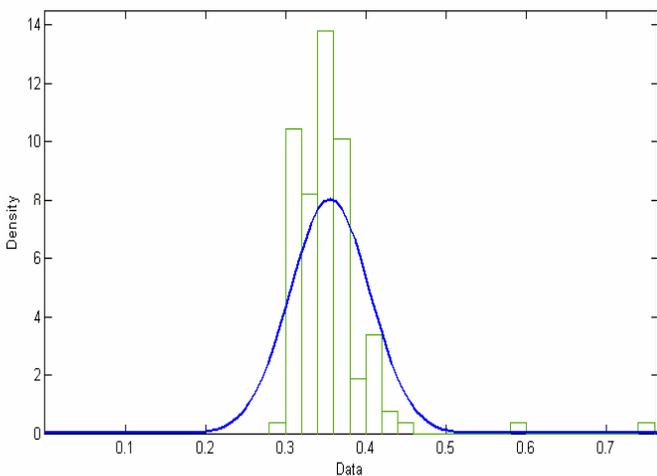
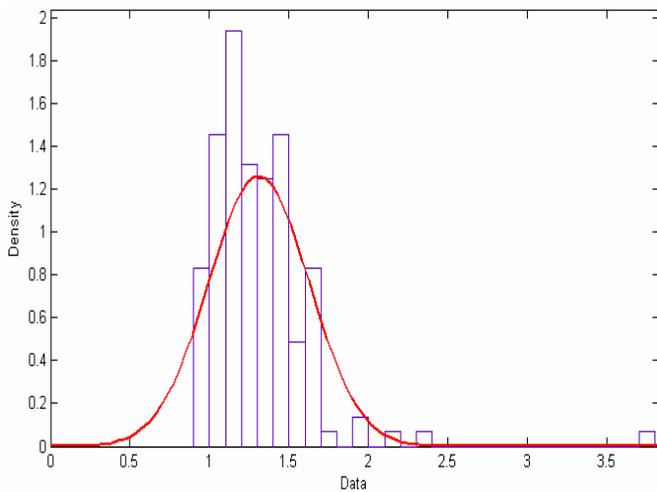
Subestación	X_{avg}	σX
5TP1	1,310 54	0,315 242
5TP2	0.355 39	0,049 613

La misma información anterior puede mostrarse con la función de distribución de probabilidades. Esta función $P_X(x)$ es la sumatoria de todos los intervalos en los cuales la variable excede un determinado nivel. Aunque esta también tiene las desventajas señaladas anteriormente, permite el cálculo de la probabilidad que existe de sobrepasar una magnitud de desbalance. Esto se expresa de la siguiente forma:

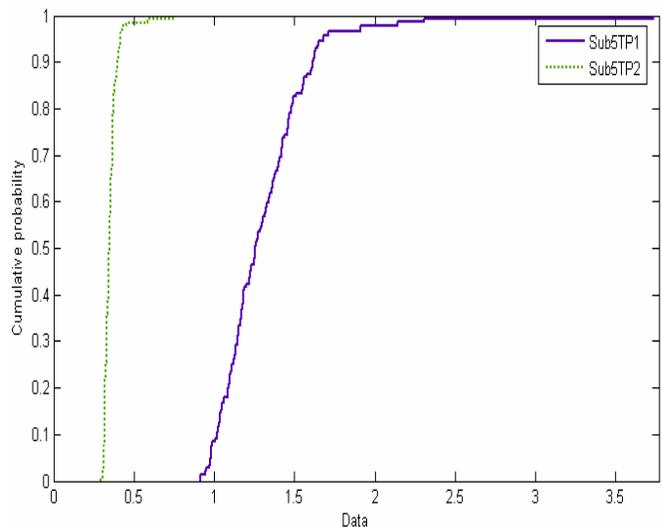
$$P(X > x) = 1 - P_X(x) = 1 - \int_{-\infty}^x p_X(\tau) d\tau \quad \dots(2)$$

Esta curva de probabilidades se muestra en la figura 4 para ambas subestaciones.

Se puede observar que para el caso de la Sub 5TP1, la probabilidad de que el desbalance se encuentre por encima del 1% es del orden de 0,9 aproximadamente, mientras que para la Sub 5TP2 existe muy baja probabilidad de que la magnitud del desbalance supere el 0,5%.



Función de densidad de probabilidades para los datos de la figura 2.



Curva de distribución de probabilidades para datos de desbalance de la figura 2.

Se puede observar que para el caso de la Sub 5TP1, la probabilidad de que el desbalance se encuentre por encima del 1% es del orden de 0,9 aproximadamente, mientras que para la Sub 5TP2 existe muy baja probabilidad de que la magnitud del desbalance supere el 0,5 %.

EFFECTO DEL DESBALANCE DE TENSIÓN SOBRE EL MOTOR ASINCRÓNICO

Los motores eléctricos son las cargas más sensibles al desbalance de tensión. Se conoce bien que cuando un motor asincrónico está alimentado desde una red con tensiones asimétricas, tiene lugar una reducción de la potencia útil desarrollada y de la eficiencia. La reducción de la eficiencia es motivada por el incremento en las pérdidas de cobre del estator, del rotor, las adicionales y las de núcleo, debido a la circulación de corrientes de secuencia negativa, lo que provoca a la vez un aumento en el calentamiento de los devanados. Además, se manifiesta un incremento en las vibraciones, oscilaciones del par, ruido, etcétera.

La investigación desarrollada por la NEMA y varios investigadores sugiere que cuando las tensiones son desbalanceadas, el porcentaje de aumento del incremento de temperatura es aproximadamente igual al doble del porcentaje de desbalance de tensión.⁵ Esto puede expresarse como:

$$\Delta T = 2(FDVL)^2 / 100 \quad \dots(3)$$

Si $X = FDV$ es una magnitud aleatoria con densidad de distribución $p(x)$ dada por (1), y $\Delta T = f(x)$ una función de una magnitud aleatoria según (3), la esperanza matemática de ΔT será igual a:⁶

$$M(\Delta T) = M[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \cdot f(x) \cdot dx \quad \dots(4)$$

Y la dispersión será:

$$D(\Delta T) = D[f(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - M(\Delta T)]^2 p(x) \cdot dx \quad \dots(5)$$

Sustituyendo (1) y (3) en (4) se tiene:

$$M(\Delta T) = 0,02 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(FDVL)^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(FDVL - X_{avg})^2}{2\sigma^2}\right) dFDVL$$

Calculando la integral y después de varias transformaciones se tiene:

$$M(\Delta T) = 0,02 \cdot (X_{avg}^2 + \sigma^2)$$

Y con los parámetros de la distribución encontrados para la subestación 5TP1, se tiene:

$$M(\Delta T) = 0,02 \cdot (1,310 54^2 + 0,315 242^2) = 0,036 3 pu$$

Análogamente, de (5) se obtiene la expresión para la dispersión del incremento de temperatura debido al desbalance de tensión:

$$D(\Delta T) = 0,000 4 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(FDVL)^4}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-(FDVL - X_{avg})^2}{2\sigma^2}\right) dFDVL$$

$$- [M(\Delta T)]^2 = 0,000 4 \cdot (2 \cdot \sigma^4 + 4 \cdot X_{avg}^2 \cdot \sigma^2)$$

$$D(\Delta T) = 0,000 4 \cdot (2 \cdot 0,315 242^4 + 4 \cdot 1,310 54^2 \cdot 0,315 242^2)$$

$$D(\Delta T) = 0,000 28 \cdot (pu)^2$$

La desviación media cuadrática del incremento de temperatura será:

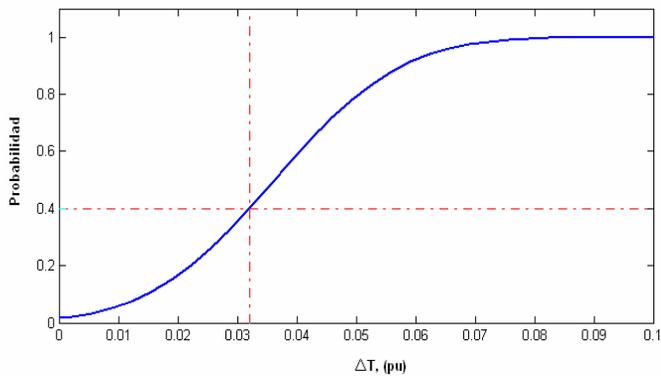
$$\sigma_{\Delta T} = \sqrt{D(\Delta T)} = 0,016 72 pu$$

Estos parámetros permiten encontrar la curva de probabilidades del porcentaje de incremento de temperatura del motor que se muestra en la figura 5. Para ejemplificar, se parte del caso hipotético de un motor con aislamiento clase B que opera en régimen nominal en estas condiciones de desbalance, cuyo incremento de temperatura nominal para esta clase de aislamiento se corresponde con 80 °C, existirá una probabilidad de 0,60 para que el incremento de temperatura del motor supere el nominal en 3,2 %, o sea, mayor que:

$$\Delta T = 80 \cdot (1 + 0,032) = 82,56^\circ C$$

Existen otros modelos para determinar el incremento de temperatura, propuestos por diferentes investigadores en función del desbalance de corriente y otros parámetros del motor.⁷ De igual manera, se puede encontrar para ellos la distribución de probabilidades, así como una distribución para la duración de la vida del aislamiento, considerando la relación no lineal entre incremento de temperatura y tiempo de vida del aislamiento.

Otra aplicación de este tipo de análisis pudiera ser el establecimiento de curvas de *derating* probabilísticas, en lugar de las propuestas actualmente con carácter determinístico.



Distribución de probabilidades para el incremento de temperatura en un motor que trabaja con el desbalance existente en la subestación 5TP1.

5

CONCLUSIONES

El análisis anterior justifica la necesidad de considerar o no el desbalance en diferentes estudios electroenergéticos que se realicen en redes industriales y(o) de servicios. Por ejemplo, en este estudio de caso, se aprecia que en la Sub-5TP1 es necesario tener en cuenta el desbalance, ya que la probabilidad de que su magnitud se encuentre por encima del 1% es muy alta. Este nivel de desbalance de tensión afecta la eficiencia, incrementa la temperatura de trabajo e impone la necesidad de *derating* para los motores que operan en estas condiciones.

En este trabajo se demuestra que teniendo el modelo de incremento de temperatura del motor en función del desbalance de tensión, y considerando esta como una magnitud aleatoria, es posible encontrar la probabilidad de superar determinado incremento de temperatura en el motor. Consecuentemente, también se puede calcular el tiempo de vida, el *derating* a aplicar, etc., todo esto desde un punto de vista probabilístico.

REFERENCIAS

- Pierrat, L. and R.E. Morrison:** "Probabilistic Modeling of Voltage Asymmetry", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, pp. 1614-1620, July, 1995.
- Wang, Y. J.:** "Modelling of Random Variation of Three-Phase Voltage Unbalance in Electric Distribution Systems Using the Trivariate Gaussian Distribution", *IEE Proc- Gener. Transm. Distrib.* Vol 143, No. 4, pp. 279-284, July, 2001.

- Wang, Y. J.:** "Simulation of Random Variation of Three-Phase Voltage Unbalance Resulting from Load Fluctuation Using Correlated Gaussian Random Variables", *Proc. Nat. Sci. Coun., Rep. China, A, Phys. Sci. Eng.*, Vol. 24, No. 3, pp. 216-225, 2000.

- Baghzouz-Chair, Y. et al.:** "Time-Varying Harmonics: Part I-Characterizing Measured Data", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, pp. 938-944, July, 1998.

- Pillay, P.; P. Hofmann and M. Manyage:** "Derating of Induction Motors Operating with a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 4, pp. 485-491, December, 2002.

- Anísimova, N. D. et al.:** "Cálculo y análisis de regímenes de trabajo de redes eléctricas", pp. 281-372, Ed. MIR. Moscú, 1978.

- López, X. M. and M. Pérez Donsión:** "Relationship Between Unbalanced Power Supply and Temperature Rise in an Induction Motor Considering the Influence of Ventilation. Part II", *Proceedings International Conference on Electrical Machines*, Estambul, Turquía, September, 1998.

AUTORES

Julio R. Gómez Sarduy

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Instructor, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba

e-mail: jugosa@fmec.ucf.edu.cu

Marcos A. de Armas Teyra

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Asistente, CEEMA, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba

e-mail: marmas@fmec.ucf.edu.cu

Percy R. Viego Felipe

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, CEEMA, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba

e-mail: pviego@fmec.ucf.edu.cu

Ángel Costa Montiel

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: aacm@electrica.cujae.edu.cu