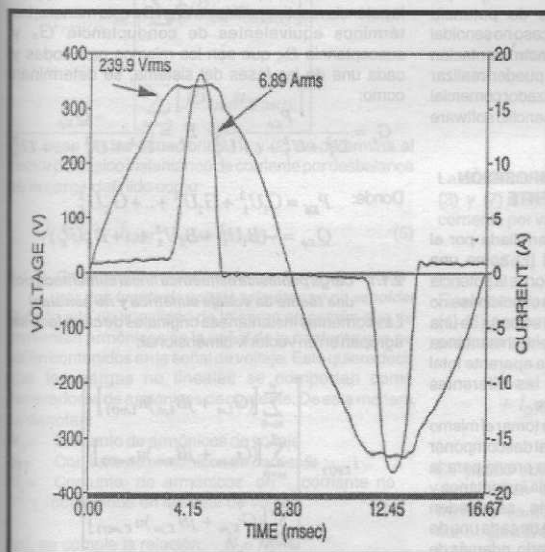


Metodología para la medición de potencia eléctrica de señales periódicas no senoidales



RESUMEN

Este artículo describe una metodología que se puede emplear como herramienta para una correcta medición de la potencia eléctrica en sistemas con presencia de señales no senoidales e incluye su fundamentación teórica. Se muestran además los resultados obtenidos para un caso real.

PALABRAS CLAVES

Componentes de potencia eléctrica, metodología, sistemas polifásicos, sistemas no senoidales, distorsión, PNSN.

ABSTRACT

This article describes a methodology that can be used as a tool to correctly measure electrical power in systems, on presence of nonsinusoidal signals; its theoretical support is included and real case results are also shown.

KEYWORDS

Electrical Power Components, Methodology, Polyphasic Systems, Nonsinusoidal Systems, Distortion, PNSN.

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los casos, los sistemas eléctricos se analizan

□ Jairo Palomino De La Cruz, Ing.
Profesor Titular,
Universidad del Valle
Cali-Colombia

□ Jhonny Diossa O., Ing.
Universidad del Valle
Cali-Colombia.

□ Paul Andrés Manrique C., Ing.
Universidad del Valle
Cali-Colombia.

Universidad del Valle.
Cali - Valle-Colombia.

* Recibido : Mayo 2002
* Aceptado: Junio 2002

asumiendo una forma senoidal pura para las señales de voltaje y/o corriente. Sin embargo, la realidad demuestra que esta forma de onda está sujeta a deformaciones debido a la presencia de armónicos, por lo general múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz) introducidos por elementos perturbadores de señal, especialmente dispositivos electrónicos, cuyo uso se ha incrementado en un amplio rango de aplicaciones por su bajo costo y alta eficiencia [1,2,3].

Esta deformación origina nuevas componentes de potencia eléctrica que no son tenidas en cuenta por los actuales instrumentos de medición, estableciendo así errores en las medidas y por consiguiente una reducción en la confiabilidad de los estudios que requieren de ellas [2,6]. Bajo esta circunstancia, existe una metodología que permite cuantificar las componentes de potencia convencionales y otras inherentes solo al caso no senoidal y, aunque actualmente no existe la instrumentación necesaria que la adopte, en la práctica se pueden realizar mediciones confiables al emplear un analizador comercial de armónicos de voltaje y corriente, y un sencillo software de cálculo.

2. METODOLOGÍA DE LA DESCOMPOSICIÓN ORTOGONAL DE LA CORRIENTE

La base de esta metodología fue desarrollada por el investigador polaco Leszek Czarnecki [7] como una herramienta que permite determinar el valor de la potencia aparente total de un sistema polifásico en condiciones no senoidales. Sin embargo, aunque en ella se parte de una sorprendente descomposición de la corriente instantánea total, sólo se limita a expresar la potencia aparente total de todo el sistema polifásico y no las diferentes componentes de potencia para cada fase.

A continuación se muestra que a pesar de tomar el mismo camino empleado por este investigador al descomponer la corriente instantánea total como paso previo para la obtención de las componentes de potencia instantánea y de las componentes rms de corriente, se pueden determinar las componentes de potencia de cada una de las fases del sistema polifásico por separado, además de la relación entre ellas y así analizarlas en forma independiente cuando se requiera sin limitarse a establecer sólo la potencia aparente polifásica total como se presenta en la metodología original [1].

2.1 Componentes de corriente instantánea

Se parte de un sistema polifásico con carga asimétrica lineal alimentada por una fuente de voltaje simétrica y no senoidal hasta llegar a un sistema con carga asimétrica no lineal alimentada por una fuente de voltaje asimétrica no senoidal.

La carga polifásica se representa como un vector de admitancias k-dimensional $Y_{k(\phi)}$ donde k=número de

fases del sistema polifásico. Este vector lo conforman las admitancias originales de cada una de las k-ésimas fases Y_k :

$$Y_{k\phi} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + jB_1 \\ G_2 + jB_2 \\ \vdots \\ G_k + jB_k \end{bmatrix}$$

donde G_k y B_k equivalen respectivamente a la conductancia y susceptancia originales de cada k-ésima fase.

Se puede establecer un sistema polifásico equivalente al sistema original en términos del voltaje eficaz para cada fase U_k , de la potencia activa polifásica $P_{k\phi}$ y de la potencia reactiva polifásica $Q_{k\phi}$. De esta manera, los términos equivalentes de conductancia G_e y susceptancia B_e , que son los mismos para todas y cada una de las fases del sistema, se determinan como:

$$G_e = \frac{P_{k\phi}}{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2} \quad B_e = \frac{-Q_{k\phi}}{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}$$

Donde: $P_{k\phi} = G_1 U_1^2 + G_2 U_2^2 + \dots + G_k U_k^2$

$$Q_{k\phi} = -(B_1 U_1^2 + B_2 U_2^2 + \dots + B_k U_k^2).$$

2.1.1 Carga polifásica asimétrica lineal alimentada por una fuente de voltaje simétrica y no senoidal

Las corrientes instantáneas originales de cada fase se agrupan en un vector k-dimensional:

$$i_{k\phi}(t) = \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{\infty} [(G_{1,m} + jB_{1,m}) u_{1,m}(t)] \\ \sum_{m=0}^{\infty} [(G_{2,m} + jB_{2,m}) u_{2,m}(t)] \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{\infty} [(G_{k,m} + jB_{k,m}) u_{k,m}(t)] \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde m representa el orden del armónico de la señal. Al asumir la carga con admitancia equivalente, el vector de corriente instantánea se determina como:

$$i_{k\phi, \text{simétrico}}(t) = i_{aK\phi, F}(t) + i_{rK\phi}(t) \quad (2)$$

donde $i_{aK\phi, F}(t)$ representa el vector polifásico instantáneo de corriente activa de Fryze [8] (ya que según este autor, la conductancia equivalente G_e es la misma para cada m-ésimo armónico), e $i_{rK\phi, F}(t)$ representa el vector polifásico instantáneo de corriente reactiva:

$$\vec{i}_{aK\phi, F(t)} = \begin{bmatrix} G_e \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{1,m}(t)] \\ G_e \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{2,m}(t)] \\ \vdots \\ G_e \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{K,m}(t)] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{i}_{aK\phi(t)} = \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{\alpha} [jB_{em} u_{1,m}(t)] \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [jB_{em} u_{2,m}(t)] \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [jB_{em} u_{K,m}(t)] \end{bmatrix} \quad (4)$$

Con base en las ecuaciones (1) y (2) se determina el vector polifásico instantáneo de corriente por desbalance de la carga definido como:

$$\vec{i}_{UK\phi(t)} = \vec{i}_{K\phi(t)} - \vec{i}_{K\phi, \text{simétrico}(t)}; \quad (5)$$

2.1.2 Carga polifásica asimétrica no lineal alimentada por una fuente de voltaje asimétrica y no senoidal
Debido a la no linealidad de la carga es común que se presenten armónicos en la señal de la corriente que no están contenidos en la señal de voltaje. Esto quiere decir que las cargas no lineales se comportan como generadores de armónicos de corriente. De esta manera se denotan:

N_v = Conjunto de armónicos de voltaje

N_i = Conjunto de armónicos de corriente

N_g = Conjunto de armónicos de corriente no contenidos en la señal de voltaje.

Así, se cumple la relación: $N_g = N_i - N_v$.

Luego, el vector polifásico instantáneo de corriente generada por la carga se define como:

$$\vec{i}_{gK\phi(t)} = \begin{bmatrix} \sum_{m \in N_g} i_{g1,m} \\ \sum_{m \in N_g} i_{g2,m} \\ \vdots \\ \sum_{m \in N_g} i_{gK,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{m \in N_g} [\sqrt{2} I_{g1,m} \cos(m\omega_1 t + \beta_{1,m})] \\ \sum_{m \in N_g} [\sqrt{2} I_{g2,m} \cos(m\omega_1 t + \beta_{2,m})] \\ \vdots \\ \sum_{m \in N_g} [\sqrt{2} I_{gK,m} \cos(m\omega_1 t + \beta_{K,m})] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde:

$I_{g,Km}$ = Valor eficaz de m-ésimo armónico de corriente para la fase K.

$\beta_{K,m}$ = Ángulo de defase respecto a la referencia del m-ésimo armónico de corriente para la Fase K.

En el caso de cargas no lineales la conductancia equivalente no es constante para todos los armónicos debido a fenómenos tales como el *efecto piel*, lo cual implica que el vector polifásico instantáneo de corriente activa sea redefinido como:

$$\vec{i}_{aK\phi} = \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{\alpha} [G_{em} u_{1,m}(t)] \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [G_{em} u_{2,m}(t)] \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [G_{em} u_{K,m}(t)] \end{bmatrix}; \quad (7)$$

La diferencia entre los vectores dados en las ecuaciones (3) y (7) definen el vector polifásico instantáneo de corriente por variación de la conductancia como:

$$\vec{i}_{s,K\phi(t)} = \vec{i}_{aK\phi, F(t)} - \vec{i}_{aK\phi(t)}; \quad (8)$$

Finalmente, los vectores establecidos en las ecuaciones (4)-(8) conforman el vector polifásico instantáneo de corriente total $\vec{i}_{K\phi(t)}$:

$$\vec{i}_{K\phi(t)} = \vec{i}_{a,K\phi(t)} + \vec{i}_{r,K\phi(t)} + \vec{i}_{UK\phi(t)} + \vec{i}_{g,K\phi(t)} + \vec{i}_{s,K\phi(t)}; \quad (9)$$

Se puede observar que al sustituir cada uno de los vectores en la ecuación anterior, la corriente total instantánea que circula en cada k-ésima fase para el caso más adverso (ítem 2.1.2) corresponde a:

$$i_{K(t)} = \sum_{m=0}^{\alpha} [G_{K,m} u_{K,m}(t)] + \sum_{m=0}^{\alpha} [jB_{K,m} u_{K,m}(t)] + \sum_{m \in N_g} i_{g,Km}(t)$$

lo cual indica que el vector polifásico instantáneo de corriente total está conformado por los armónicos originales de corriente comunes a la señal de voltaje y por los armónicos contenidos solo en la señal de corriente como sucede en un caso real.

2.2 Componentes de potencia instantánea

Al multiplicar ambos miembros de la ecuación (9) en forma de producto escalar con el vector instantáneo de voltaje [1, 7] $\vec{u}_{K\phi(t)}$ definido como:

$$u_{K\phi(t)} = \begin{bmatrix} \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{1,m}(t)] \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{2,m}(t)] \\ \vdots \\ \sum_{m=0}^{\alpha} [u_{K,m}(t)] \end{bmatrix}$$

se obtiene para cada k-ésima fase la expresión:

$$p_{K(t)} = p_{a,K(t)} + q_{r,K(t)} + d_{u,K(t)} + d_{g,K(t)} + d_{s,K(t)} \quad (10)$$

donde se definen:

- Potencia instantánea activa:

$$p_{a,K(t)} = u_{K(t)} \cdot i_{a,K(t)}$$

- Potencia instantánea reactiva:

$$q_{r,K(t)} = u_{K(t)} \cdot i_{r,K(t)}$$

- Potencia instantánea de dispersión por desbalance de la carga:

$$d_{u,K(t)} = u_{K(t)} \cdot i_{u,K(t)}$$

- Potencia instantánea de dispersión por generación de armónicos en la carga:

$$d_{g,K(t)} = u_{K(t)} \cdot i_{g,K(t)}$$

- Potencia instantánea de dispersión por variación de la conductancia con respecto a la frecuencia:

$$d_{s,K(t)} = u_{K(t)} \cdot i_{s,K(t)}$$

2.3 Valores eficaces de los componentes de corriente instantánea

Partiendo de una función periódica no senoidal expresada en términos de una serie de Fourier como:

$$f_{K(t)} = \sum_{m=0}^{\alpha} [\sqrt{2} F_{K,m} \cos(m \cdot \omega_1 t + \theta_{K,m})]$$

$F_{K,m}$ = Valor eficaz del m-ésimo armónico de la K-ésima fase.

$\theta_{K,m}$ = Ángulo de defase respecto a la referencia del m-ésimo armónico de la K-ésima fase.

Esta tiene un valor rms total definido como [1,4,7]:

$$F_K = \sqrt{\sum_{m=0}^{\alpha} [F_{K,m}^2]} \quad (11)$$

el cual se aplica a cada una de las componentes de corriente instantánea de cada k-ésima fase para obtener los valores homólogos rms: $I_{a,K}$; $I_{r,K}$; $I_{u,K}$; $I_{g,K}$; $I_{s,K}$

- Corriente Eficaz Activa:

$$I_{a,K} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\alpha} [G_{em}^2 U_{km}^2]}$$

- Corriente eficaz reactiva:

$$I_{r,K} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\alpha} [(B_{em} U_{km})^2]}$$

- Corriente eficaz de dispersión por generación de armónicos en la carga:

$$I_{g,K} = \sqrt{\sum_{m \in Ng} [I_{gkm}^2]}$$

- Corriente eficaz de dispersión por variación de la conductancia con la frecuencia:

$$I_{s,K} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\alpha} [(G_e - G_{em})^2 U_{km}^2]}$$

- Corriente eficaz de dispersión por desbalance de la carga:

$$I_{u,K} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\alpha} [(G_{km} - G_e)^2 + (B_{km} - B_{em})^2] U_{km}^2}$$

De otro lado, para relacionar los anteriores valores eficaces se aplica la definición de valor rms al vector $i_{K(t)}$ dado en la ecuación (9):

$$I_{K\phi}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_{K\phi(t)}^2 dt \Leftrightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_K \end{bmatrix}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \begin{bmatrix} i_{1(t)} \\ i_{2(t)} \\ \vdots \\ i_{K(t)} \end{bmatrix}^2 dt$$

lo cual permite obtener la expresión:

$$I_K^2 = I_{a,K}^2 + I_{r,K}^2 + I_{u,K}^2 + I_{g,K}^2 + I_{s,K}^2 \quad (12)$$

que establece las componentes rms de corriente para cada k-ésima fase.

2.4 Componentes de potencia

Al multiplicar ambos lados de la ecuación (12) por el cuadrado del valor rms del voltaje de la k-ésima fase U_K se deduce la ecuación que relaciona las componentes de potencia en cada fase del sistema polifásico [1]:

$$S_K^2 = P_K^2 + Q_K^2 + D_{u,K}^2 + D_{g,K}^2 + D_{s,K}^2 \quad (13)$$

donde se definen:

- Potencia activa:

$$P_K = U_K \cdot I_{a,K}$$

- Potencia reactiva:

$$Q_K = U_K \cdot I_{r,K}$$

- Potencia de dispersión por desbalance de la carga:

$$D_{u,K} = U_K \cdot I_{u,K}$$

- Potencia de dispersión por generación de armónicos en la carga:

$$D_{g,K} = U_K \cdot I_{g,K}$$

- Potencia de dispersión por variación de la conductancia con respecto a la frecuencia:

$$D_{s,K} = U_K \cdot I_{s,K}$$

3. COMPARACIÓN CON LA METODOLOGÍA DE MAKRAM-GIRGIS

Existe una metodología desarrollada por los investigadores egipcios Elham Makram y Adly Girgis [1,5] la cual toma un camino diferente al de la metodología anterior y permite descomponer la potencia instantánea en cada fase del sistema polifásico en condiciones no senoidales de una manera similar al establecido en el caso senoidal. De acuerdo con esta metodología, las señales de voltaje y/o corriente periódicas con formas de onda no senoidales se pueden expresar en Series de Fourier como:

$$\begin{aligned} v(t) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sqrt{2} V_m \cos(m\omega_1 t + \alpha_m) \\ i(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega_1 t + \alpha_n + \theta_n) \end{aligned} \quad (14)$$

donde:

- m = orden del armónico de la señal de voltaje.
- n = orden del armónico de la señal de corriente.
- ω_1 = frecuencia fundamental.
- α_m = ángulo de desfase del armónico de voltaje de orden m con respecto a la referencia.
- α_n = ángulo de desfase del armónico de corriente de orden n con respecto a la referencia.
- θ_n = ángulo de desfase del armónico de voltaje de orden n con respecto al armónico de corriente de orden n .

De otro lado, la potencia instantánea para cualquier fase de un sistema polifásico se determina como el producto de los valores instantáneos de voltaje y corriente, y de acuerdo con la ecuación (14) se expresa considerando los casos cuando $m=n$ y $m \neq n$ de la siguiente manera:

$$p_{(t)} = P + p_{r(t)} + q_{r(t)} + d_{(t)}; \quad (15)$$

donde cada una de sus componentes se especifica a continuación:

- Potencia activa:
Definida como

$$P = \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m; \quad (16)$$

y corresponde a la potencia promedio de la señal de potencia instantánea $p_{(t)}$ con cualquier forma de onda pero periódica.

- Potencia activa rotatoria:
Se establece como

$$\begin{aligned} p_r(t) &= \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m (\cos 2(m\omega_1 t + \alpha_m)) \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ \text{impares}}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n [\cos((m+n)\omega_1 t + (\alpha_m + \alpha_n))] \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ \text{impares}}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n [\cos((m-n)\omega_1 t + (\alpha_m - \alpha_n))] \end{aligned} \quad (17)$$

y equivale a la componente de la potencia útil que consume o entrega la carga en un instante dado, y se determina al agrupar los términos que contienen el factor $\cos \theta$ cuando los armónicos m y n son ambos pares o impares.

- Potencia de distorsión o residual:

Es una componente de la potencia instantánea que sólo aparece en presencia de armónicos, ya que implica los términos que contienen los factores $\cos \theta$ y $\sin \theta$ tomando los armónicos pares de voltaje e impares de corriente, o viceversa.

Se define como:

$$\begin{aligned} d(t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ (\text{impar} \times \text{par})}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n [\cos((m+n)\omega_1 t + (\alpha_m + \alpha_n))] \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ (\text{impar} \times \text{par})}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n [\cos((m-n)\omega_1 t + (\alpha_m - \alpha_n))] \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ (\text{impar} \times \text{par})}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n (\sin((m-n)\omega_1 t + \alpha_m - \alpha_n)) \\ &- \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par} \\ (\text{impar} \times \text{par})}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n (\sin((m+n)\omega_1 t + \alpha_m + \alpha_n)) \end{aligned} \quad (18)$$

- Potencia reactiva rotatoria:
Se deduce como

$$q_r(t) = - \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \sin \theta_m \sin(2m\omega t + \alpha_m) \\ - \sum_{\substack{m=1 \\ \text{par}}}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{impar}}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n [\sin((m+n)\omega t + (\alpha_m + \alpha_n))] \\ + \sum_{\substack{m=1 \\ \text{impar}}}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{par}}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n [\sin((m-n)\omega t + (\alpha_m - \alpha_n))] \quad (19)$$

y corresponde a la potencia reactiva que suministra o entrega la carga en cualquier instante. Se determina al agrupar los términos que contienen el factor $\sin \theta$ cuando ambos armónicos son pares o impares. En realidad las expresiones (15)-(19) equivalen a una extensión al caso no senoidal de la definición de potencia instantánea dada para el caso senoidal, establecida como:

$$P(t) = P(1 + \cos(2\omega t)) + Q(2\omega t); \quad (20)$$

De esta manera, la ecuación (15) permite determinar la potencia instantánea total en cada una de las fases del sistema polifásico y compararla con la potencia instantánea establecida en la ecuación (10) de la metodología anterior lo cual conlleva a resultados muy similares tal como se muestra de la figura 10 a la figura 12.

Aunque la teoría de Makram-Girgis tiene una correcta base matemática y física se limita sólo a componentes teóricas de potencia instantánea. De esta manera resulta más útil la metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente ya que además de determinar las componentes de potencia instantánea con un significado más práctico también establece los valores rms de voltaje y de las componentes de corriente además de las componentes de potencia de cada una de las fases.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para determinar en la práctica las componentes de potencia eléctrica de un sistema polifásico en condiciones no senoidales se desarrolló el programa **PNSN** el cual adopta la metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente para obtener los gráficos de potencia instantánea y los valores de las componentes de potencia eléctrica de cada una de las fases del sistema, en adición a las señales de voltaje y corriente de entrada. Este programa también adopta la metodología de **MAKRAM-GIRGIS** (ítem 3) para mostrar los gráficos que comparan las potencias instantáneas totales por

fase obtenidos con las dos metodologías, tal como se muestra de la figura 10 a la figura 12.

Los datos de entrada de este software corresponden a los valores rms de armónicos de voltaje y de corriente para cada una de las fases con sus respectivos ángulos expresados respectivamente en Volts, Amperes y Grados considerando que acepta un máximo de 12 armónicos y 3 fases.

Como un caso práctico se empleó la medición de las componentes de potencia eléctrica para la carga trifásica tetrafilar de la Torre de Ingeniería de la Universidad de Valle compuesta principalmente por un ascensor y su equipo de control asociado, además de equipos de laboratorio y elementos típicos de oficina tales como lámparas fluorescentes, computadores, entre otros. Estos elementos constituyen una fuente considerable de armónicos que distorsionan en gran medida la señal de corriente para cada fase tal como se muestra en las figuras 1, 2 y 3.

La medición se realizó con un analizador comercial de armónicos Fluke conectado a los bornes de baja tensión



Figura 1. Voltaje y corriente de entrada de Fase 1.

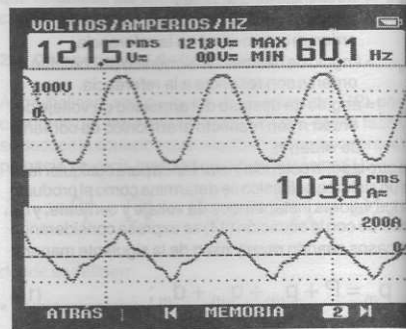


Figura 2. Voltaje y corriente de entrada de Fase 2.

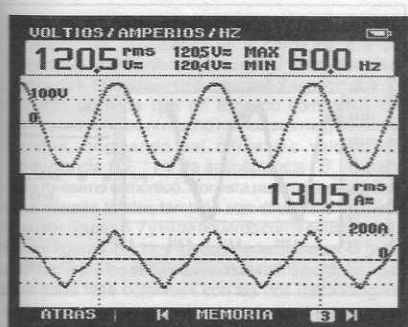


Figura 3. Voltaje y corriente de entrada de Fase 3.

BT del transformador de distribución de la Torre tomando los armónicos de voltaje línea-neutro V_{L-N} y de corriente para cada fase.

Los armónicos de las señales de entrada de voltaje y corriente para este caso están consignados en la Tabla 1.

Tabla 1. Magnitud y ángulo de las señales de voltaje y Corriente de Entrada

FASE 1				
Armónico	V_{rms} (V)	$\angle V_{rms}$ (°)	I_{rms} (A)	$\angle I_{rms}$ (°)
1	120,5	0	231,7	0
3	-	-	34,8	-138
5	2,5	-163	14,8	1
FASE 2				
Armónico	V_{rms} (V)	$\angle V_{rms}$ (°)	I_{rms} (A)	$\angle I_{rms}$ (°)
1	121,8	0	102	0
3	-	-	15,6	-167
5	2,5	-162	12	-38
7	-	-	4,1	165
11	-	-	1,2	-30
FASE 3				
Armónico	V_{rms} (V)	$\angle V_{rms}$ (°)	I_{rms} (A)	$\angle I_{rms}$ (°)
1	120,3	0	133,9	0
3	-	-	16,4	-150
5	2,5	-162	12,3	-26
7	-	-	4,2	153

5. RESULTADOS

Los resultados numéricos obtenidos se muestran en la Tabla 2 y los resultados gráficos corresponden a los establecidos desde la figura 4 hasta la figura 12, e indican que la metodología expuesta en este artículo puede implementarse fácilmente mediante un sencillo programa de software que permite cuantificar de una manera más exacta las componentes de potencia para

el caso de sistemas polifásicos con presencia de señales periódicas no senoidales.

Tabla 2. Resultados de Metodología de Descomposición Ortogonal de la Corriente.

POTENCIA	FASE 1	FASE 2	FASE 3
P_K (Watts)	18744,90	19150,62	18882,87
Q_{sk} (Vars)	906,84	916,62	905,34
D_{sk} (VA)	1584,38	1601,47	1581,75
D_{uk} (VA)	4194,30	1970,45	2037,03
D_{sk} (VA)	28013,38	12633,68	16262,12
S_K (VA)	34015,37	23100,74	24919,42

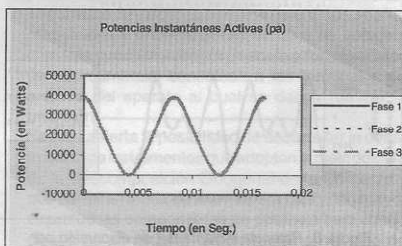


Figura 4. Potencia instantánea activa

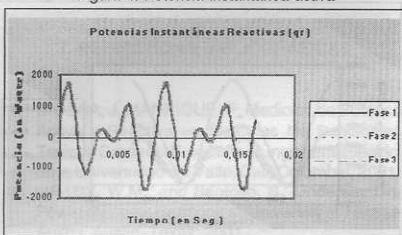


Figura 5. Potencia instantánea reactiva

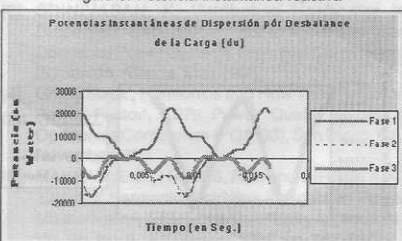


Figura 6. Potencia instantánea de dispersión por desbalance en la carga

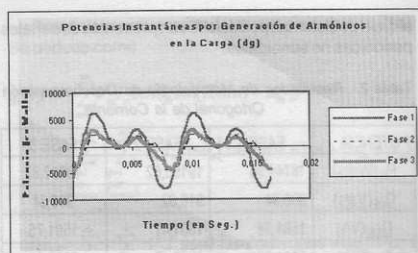


Figura 7. Potencia instantánea de dispersión por generación de armónicos en la carga

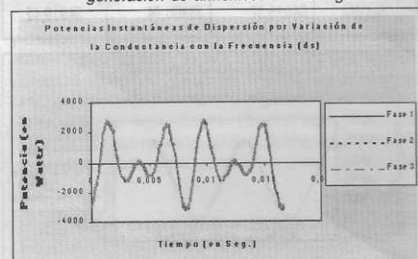


Figura 8. Potencia instantánea de dispersión por variación de la conductancia respecto a la frecuencia

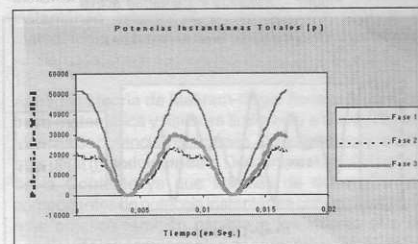


Figura 9. Potencia instantánea total.

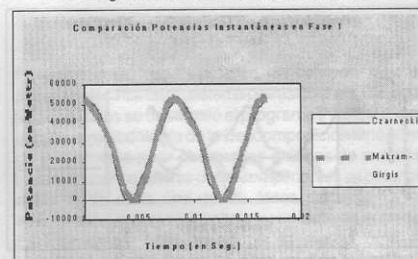


Figura 10. Comparación de potencia instantánea en Fase 1

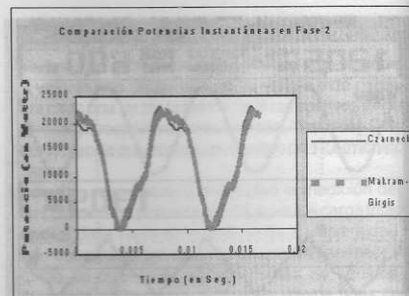


Figura 11. Comparación de potencia instantánea en Fase 2

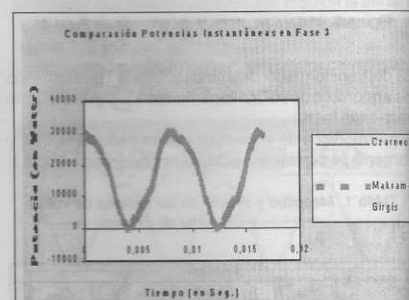


Figura 12. Comparación de potencia instantánea en Fase 3

De acuerdo con los gráficos establecidos desde la figura 4 hasta la figura 12 se puede observar que las señales resultantes a pesar de no ser senoidales son periódicas y con el doble de la frecuencia fundamental; además se puede determinar en qué instante cualquiera de las componentes instantáneas de potencia para determinar si la fase es entregada al sistema o tomada por la carga, medir, dependiendo de su valor negativo o positivo respectivamente. Estas características son similares a las establecidas en el caso de señales senoidales puras. Para el caso práctico adoptado, los gráficos de las componentes de potencia instantánea activa (p_r), reactiva (q_r) y de dispersión por variación de conductancia respecto a la frecuencia (d_r) son coincidentes para cada una de las tres fases (ver figuras 4, 5 y 8) ya que existen los mismos armónicos de voltaje con valores similares de magnitud y ángulo para cada una de ellas. Además, las conductancias equivalentes (G_r) y por armónico (G_{em}) junto con la susceptancia equivalente (B_{em}) son las mismas en cada una de las fases del sistema.

Los gráficos de las componentes instantáneas de dispersión por desbalance de la carga (d_n), y de generación de armónicos en la carga (d_g) son diferentes para cada k-ésima fase ya que las señales originales de corriente de cada una de ellas no comparten los mismos armónicos ni mucho menos sus magnitudes y ángulos, originando así diferentes valores de conductancia ($G_{k,m}$) y de susceptancia ($B_{k,m}$) para cada m-ésimo armónico. Por esta razón, las potencias instantáneas totales también son diferentes en cada fase (ver figuras 6, 7 y 9) de acuerdo con la ecuación 10. En las figuras 10, 11 y 12 se puede observar la gran similitud entre las señales de potencia instantánea total para cada fase obtenidas con las dos metodologías expuestas en este artículo ya que están casi superpuestas una sobre la otra lo cual ratifica su validez a pesar de tomar caminos diferentes.

Según los resultados consignados en la Tabla 2 se puede observar la similitud entre los valores por fase de las componentes de potencia activa P_a , reactiva Q_r , y de distorsión por variación de la conductancia con respecto a la frecuencia D_s . No obstante, las componentes de potencia de dispersión por desbalance de la carga D_u y de dispersión por generación de armónicos en la carga D_g son notablemente diferentes en cada fase. La razón de esta situación es la misma establecida más atrás para las componentes de potencia instantánea ya que sólo se adoptan para cada fase los valores rms de todas y cada una de las componentes instantáneas de corriente y de la señal instantánea de voltaje y por ende se incluyen los términos equivalentes de las conductancias (G_{cm}) y (G_c), y de las susceptancias (B_{cm}), además de las conductancias ($G_{k,m}$) y susceptancias ($B_{k,m}$) originales por fase y por armónico, tal como se establece en las ecuaciones 12 y 13.

6. CONCLUSIONES

La metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente se puede aplicar a cualquier sistema polifásico incluyendo el monofásico, en condiciones no senoidales, y permite cuantificar las componentes de potencia activa, reactiva y aparente cuya interpretación física es la misma a la establecida en el caso senoidal e incluye nuevas componentes de potencia relacionadas con el desbalance de la carga, con la presencia de armónicos de corriente no contenidos en el voltaje y con la variación de la conductancia respecto a la frecuencia. Se incluyen además los componentes homónimos de potencia instantánea.

La metodología anterior permite determinar además los gráficos de las distintas componentes instantáneas de potencia para cada fase con el propósito de establecer comparaciones y evaluar sus valores en

cualquier instante, indicando si éstos son consumidos por la carga o son entregados al sistema.

La metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente y la metodología de Makram-Girgis a pesar de tomar diferentes caminos convergen en los mismos resultados correspondientes a los gráficos de potencia instantánea total por fase aunque la naturaleza o interpretación de sus componentes sean distintos. Esto ratifica la validez de ambas metodologías aunque es más completa y práctica la primera de ellas.

A pesar de no existir actualmente un instrumento comercial que permita obtener las componentes de potencia eléctrica empleando la metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente éstas se pueden determinar en la práctica mediante un sencillo software de cálculo. Los datos de entrada son las magnitudes y ángulos de las señales de voltaje y corriente suministrados por un analizador de señales de uso comercial conectado a las terminales de entrada del aparato al cual se desea realizar la medición.

Se deja abierta la posibilidad de desarrollar la construcción de instrumentos que adopten la metodología de la Descomposición Ortogonal de la Corriente y que permitan medir de una manera fácil y con mayor exactitud las componentes de potencia bajo condiciones no senoidales directamente en el sitio de medida.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DIOSSA, J, MANRIQUE, P, Medición de Potencia Activa y Reactiva en Sistemas No Senoidales, Tesis de Grado del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2001.
- [2] GRADY, W.M., and Santoso, S, 'Understanding Power Systems Harmonics', University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2001. www.ece.utexas.edu/~grady/
- [3] SRINIVASAN, K, 'Attributing Harmonics in Dispersed Generation', IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Edmonton, Alberta, May 1990.
- [4] Grady, Mack, 'Harmonics and How They Relate to Power Factor', EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA' 93), San Diego, CA, November 1993.
- [5] MAKRAM, E.B.; HAINES, R.B. and GIRGIS, A.A.: 'Effect of Harmonic Distortion in Reactive Power Measurement', IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 28, No. 4, July/August 1992, pp. 782-787
- [6] FILIPSKI, P.S.: 'Polyphase Apparent Power and Power Factor Under Distorted Waveform Conditions',

- IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 11161-1165.
- [7] CZARNECKI, Leszek, "Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source", IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 37 N° 1, March 1988, pp. 30,34.
- [8] FILIPSKI, Piotr: 'A New Approach to Reactive Current and Reactive Power Measurement in Nonsinusoidal Systems', IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. IM-29, No. 4, December 1980, pp. 423-426

AUTORES



Jairo Palomino De La Cruz.
Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.
jaipal@mafalda.univalle.edu.co

Paul Andrés Manrique Castillo.
Ingeniero electricista de la Universidad del Valle. Áreas de interés: Medición de potencia eléctrica con señales periódicas No senoidales y Diseño de máquinas asíncronas.
paulmaco@hotmail.com



Jhonny Diossa Orozco. Ingeniero electricista de la Universidad del Valle. Área de interés: Medición de potencia eléctrica con señales periódicas No senoidales y Diseño de Máquinas Asíncronas.
Johdio40@hotmail.com

«Me interesa el futuro porque en él voy a pasar el resto de mi vida.»

CHARLES F. KETTERING.