

COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS UTILIZANDO LA TEORÍA P-Q-R

RESUMEN

Este artículo describe la manera de compensar armónicos en un sistema trifásico de cuatro hilos utilizando la teoría p-q-r sin elementos que almacenen energía. Además se utiliza la teoría p-q-r para conformar un componente mixto cuyo propósito es afinar los resultados.

PALABRAS CLAVES: Teoría pqr, calidad de energía, compensación de reactivos

ABSTRACT

This paper describes how to compensate harmonics in a four-wire-three phase system based in pqr theory without energy storage elements. Furthermore pqr theory is used to establish mixed component to obtain better results.

KEYWORDS: pqr theory, energy quality, reactive compensation.

ALFONSO ALZATE

Ingeniero Electricista, Ms.C
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

ÁLVARO OROZCO

Ingeniero Eléctrico.
Profesor Asociado
Universidad Tecnológica de Pereira
aorozco@utp.edu.co

CARLOS GALVÁN

Ingeniero Electricista
Ingeniero de Diseño
Siemens de Colombia
carlosgc@magnetron.com.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen muchos métodos para la compensación de reactivos entre los cuales se pueden anotar la compensación del factor de potencia utilizando capacitores y transformadores en zigzag y la compensación de potencia instantánea real e imaginaria definidos en el dominio del tiempo por las teorías p-q y p-q-r.

Ambas teorías basan su principio de trabajo en la teoría cruz, ésta expresa que tanto la potencia real como la imaginaria son definidas por las siguientes expresiones:

Dados los voltajes y corrientes instantáneos de un sistema trifásico

$$v = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

La potencia activa instantánea puede ser definida como:

$$p = [v][i] \quad (2)$$

Y la potencia reactiva instantánea como:

$$q = [v] \times [i] \quad (3)$$

Donde \times denota el producto cruz y q se expresa como:

$$q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b & v_c \\ i_b & i_c \\ v_c & v_a \\ i_c & i_a \\ v_a & v_b \\ i_a & i_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

Y

$$q = \|q\| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} \quad (5)$$

Donde v e i son vectores a-b-c ó θ - α - β ó p-q-r.

En consecuencia se define el vector de corriente activa instantánea como i_p , el vector de corriente reactiva instantánea i_q , la potencia aparente s y el factor de potencia instantáneo como λ , así:

$$i_p = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} \stackrel{def}{=} \frac{p}{v \cdot v} \quad (6)$$

$$i_q = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \stackrel{def}{=} \frac{q \times v}{v \cdot v} \quad (7)$$

$$s = vi \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{p}{s} \quad (9)$$

Donde: los voltajes y corrientes instantáneos están representados por las siguientes ecuaciones.

$$v = \|v\| = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (10)$$

$$i = \|i\| = \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2}$$

i puede también ser expresado como la suma de las componentes i_p e i_q . [1].

$$i \equiv i_p + i_q \quad (11)$$

En conclusión la teoría cruz define una potencia real y tres potencias imaginarias que permiten demostrar la conservación de la potencia.

A partir de la teoría cruz, la teoría p - q - r presenta un algoritmo para la compensación de potencia. Dicho algoritmo se aplicará en este documento a una carga simulada desbalanceada basada en cargas no lineales monofásicas y pasivas.

2. TEORÍA P-Q-R

La teoría p - q - r tiene como origen las transformaciones a - b - c a 0 - α - β de voltaje y corriente¹.

Sistema de voltajes:

$$\begin{bmatrix} e_p \\ e_q \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{0\alpha\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sistema de corrientes:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} e_0 & e_\alpha & e_\beta \\ 0 & -e_{0\alpha\beta}e_\beta & e_{0\alpha\beta}e_\alpha \\ e_{\alpha\beta} & -e_0e_\alpha & -e_\beta e_0 \\ e_{\alpha\beta} & e_{\alpha\beta} & e_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

La potencia real instantánea

$$p = e_p i_p \quad (14)$$

$$p = e_\alpha i_{\alpha p} + e_\beta i_{\beta p} + e_0 i_{0 p} \quad (15)$$

La potencia imaginaria instantánea.

$${}^1 \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$q_q = -e_p i_r \quad (16)$$

$$q_r = e_p i_q \quad (17)$$

La potencia aparente

$$s = \|e\| \|i\| = \sqrt{p^2 + q_q^2 + q_r^2} \quad (18)$$

El sistema de corrientes calculado a partir de las potencias es:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{e_p} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ -q_q \end{bmatrix} \quad (19)$$

3. CARACTERÍSTICAS DE LA TEORÍA P-Q-R

Dentro de las características más relevantes de esta teoría se encuentran:

La potencia activa del circuito cuenta solamente con una componente real de la corriente que contribuye solamente a la potencia real.

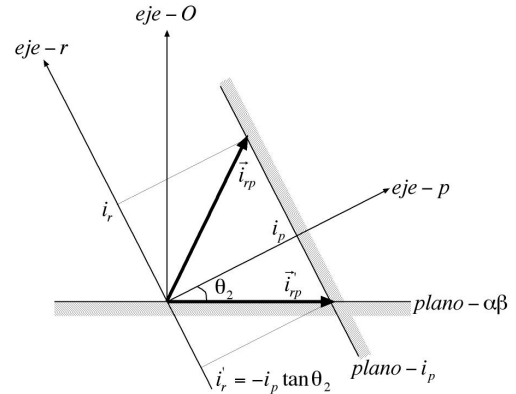


Figura 1. Relación entre la corriente de línea a neutro i_n y los ejes r de la corriente i_r en coordenadas p - q - r

La i_q del circuito cuenta con una componente imaginaria de corriente que contribuye solamente a la potencia imaginaria en la dirección r .

La i_r del circuito cuenta con una componente imaginaria que contribuye solamente a la potencia imaginaria en la dirección q .

Las potencias imaginarias q_q y q_r pueden ser compensadas separadamente para controlar las corrientes i_r e i_q independientemente, sin necesidad de utilizar elementos que almacenen energía.

Los grados de libertad para controlar el sistema de corrientes es exactamente igual a tres (3), es decir las tres potencias instantáneas p , q_q y q_r son completamente independientes la una de la otra, más aún las dos corrientes i_q e i_r pueden ser controladas

directamente sin usar elementos que almacenen energía.

4. ESTRATEGIAS DE COMPENSACIÓN

Un problema presente en los sistemas trifásicos son el incremento de las corrientes a través del neutro y la distorsión de las corrientes de línea en las tres fases producidas por cargas no lineales.

La eliminación de la corriente de línea a neutro de un sistema trifásico de cuatro hilos esta relacionada con la componente i_r , Figura 1, por lo que la corriente de referencia que compensará a i_n es:

$$i_r^* = \frac{e_0}{e_{\alpha\beta}} \cdot i_p \quad (20)$$

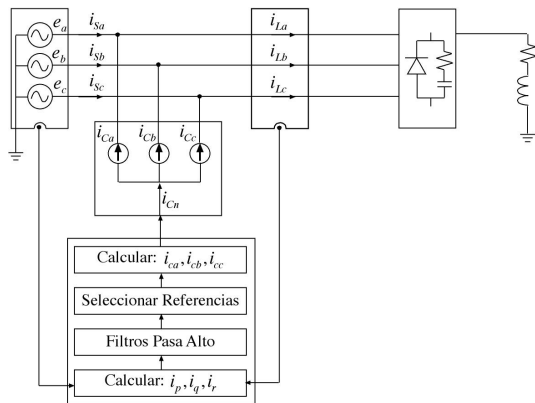


Figura 2. Sistema de control para una línea de tres fases y cuatro hilos.

A pesar de que la teoría $p-q-r$ cuenta con dos opciones de control “reference current control method” y

“reference power control method”. El primer método fue el seleccionado para la simulación. Donde las corrientes de control para la compensación de los armónicos y las corrientes a través del neutro son:

$$\begin{aligned} i_{pc} &= i_{pac} \\ i_{qc} &= i_q \text{ ó } i_{qdc} \text{ ó } i_{qac} \\ i_{rc} &= i_r + \left(\frac{e_0}{e_{\alpha\beta}} \right) \cdot (i_p) \end{aligned} \quad (21)$$

La componente de control de i_{qc} cuenta con tres términos i_q ó i_{qc} ó i_{qdc} , los cuales serán seleccionados de acuerdo a las condiciones del circuito.

El modelo para la aplicación del algoritmo también se enseña en la figura 2.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Aplicando los algoritmos al circuito de la figura 2. Los resultados generados se observan en las figuras 4 y 5, donde se aprecia la calidad de señal en la fuente.

6. CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN

El circuito de simulación cuenta con los siguientes valores:

- Va, Vb y Vc = .2 kV rms a 50 Hz.
- Carga resistiva: 0.5 Ω
- Carga inductiva: 35 mH

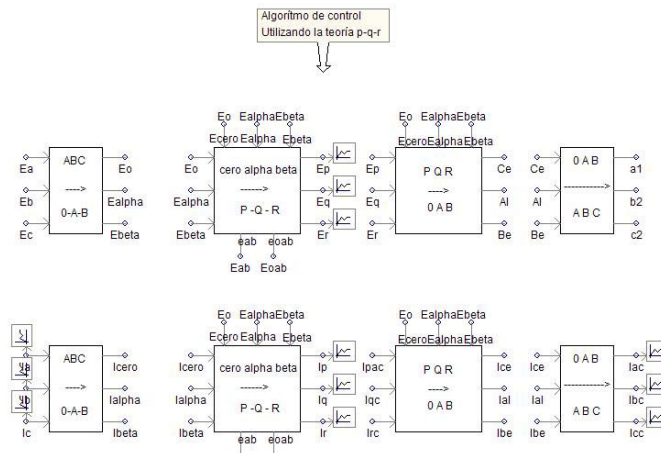


Figura 3 Transformaciones $a-b-c$ a $p-q-r$ y $p-q-r$ a $a-b-c$

Corrientes de carga y de la fuente

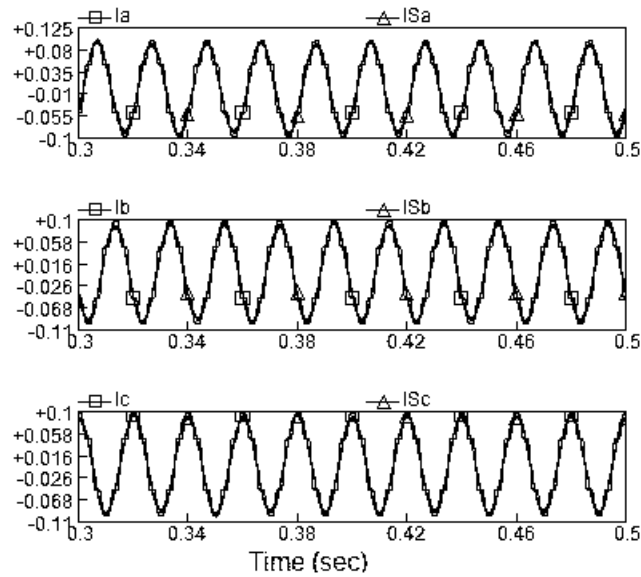


Figura 4. Señales en la carga y en la fuente

Señales finales de la fuente

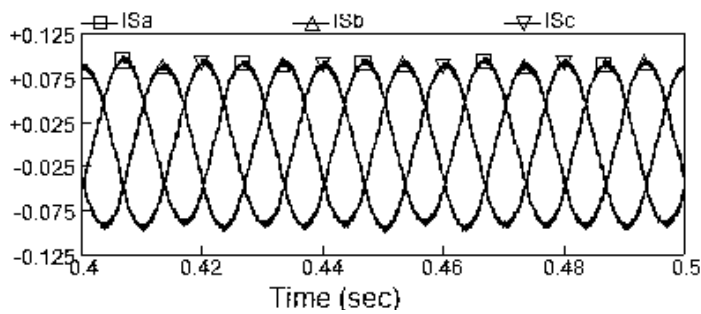


Figura. 5 Corrientes a través de la fuente una vez compensadas

El método “reference current control method” demostró ser una buena herramienta para la compensación de armónicos en sistemas de cuatro hilos pero se observó también que las señales cuentan con vástagos de armónicos de orden 5th y 7th. Para compensar dichos trazos de armónicos se utilizó la combinación de este algoritmo con filtros pasivos y una adecuada sintonización de las corrientes de control.

Filtros Pasivos

Los componentes pasivos seleccionados para la compensación del 5th y 7th son los enseñados en la siguiente tabla:

5 th	L=1.2 mH	C=340 µF	Q=14
7th	L=1.2 mH	C=170 µF	Q=14
HPF	L=0.26 mH	C=300 µF	R=3Ω

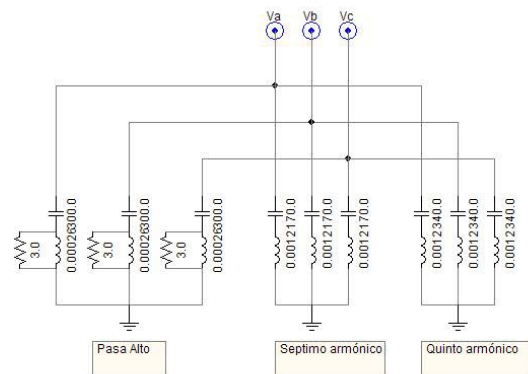


Figura 6. Filtros pasivos conectados a la red.

Las corrientes nuevamente compensadas a través de la teoría mixta se observan en la figura 7 y 8.

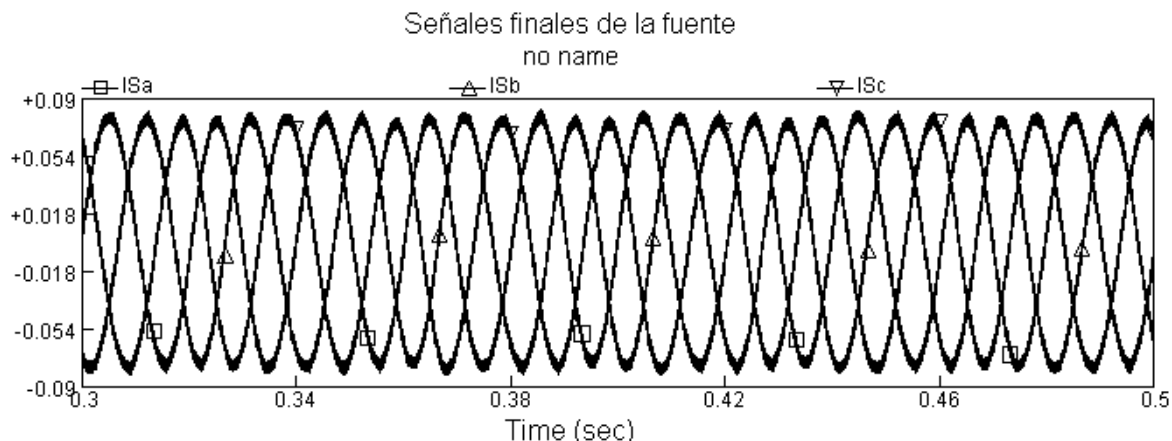


Figura 7. Corrientes en la carga compensadas por el método mixto.

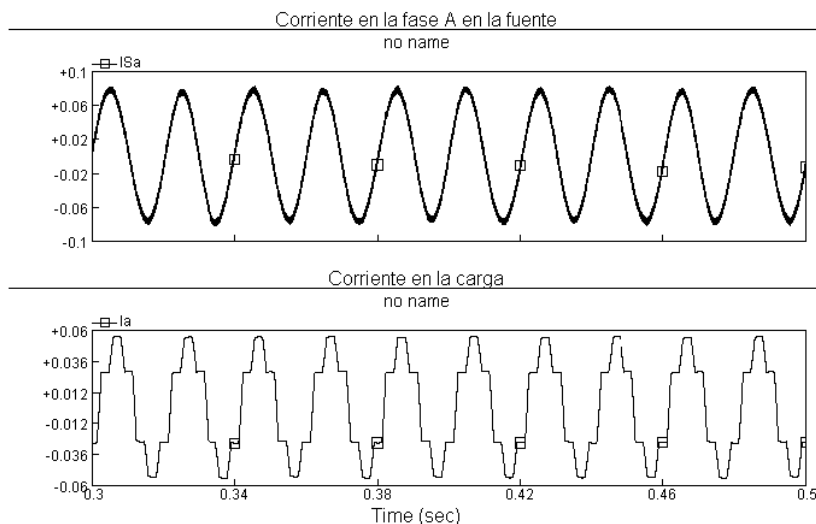


Figura 8. Corriente en la fase A en la fuente y en la carga utilizando la teoría mixta.

7. CONCLUSIONES

El método para compensación de armónicos a través de la teoría *p-q-r*, demostró ser una valiosa herramienta que permitió no solo la eliminación de armónicos sino también la eliminación de la corriente de línea a neutro.

La teoría *p-q-r* es una teoría que para su implementación requiere de un procesamiento matemático fuerte y por lo tanto de rápidos microcontroladores que respondan en tiempo real a las exigencias del sistema.

La generación de técnicas mixtas de compensación presentó excelentes resultados como puede observarse de los gráficos de las figuras 7 y 8.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen y j, Choi, "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using *p-q-r* Theory" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 17, No5, September 2002, pp. 701-709.

[2] F. Z. Peng, G.W. Ott, D.J. Adams, "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory Three-Phase Four Wire Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 13, No6, November 1998, pp. 1174-1181.

[3] Hideaki Fujita and Hirofumi Akagi, "A practical Approach to Harmonic Compensation in Power System – Series Connection of Pasive and Active Filters.

