



# Mejora del funcionamiento de sistemas desbalanceados sin neutro con compensadores de reactivo

Vicente León  
Davel Borges

Recibido: Junio del 2005  
Aprobado: Septiembre del 2005

## Resumen / Abstract

Los desbalances producen deficientes funcionamientos adicionales cuando en los sistemas eléctricos hay equipos de compensación de reactiva, originando compensaciones inadecuadas, con diferentes factores de potencia en cada fase de los transformadores eléctricos y el consiguiente peligro de la presencia de sobretensiones en las instalaciones, por efecto Ferranti, que pueden destruir tanto las cargas como a los capacitores de los compensadores de potencia reactiva. Este artículo describe un dispositivo, llamado filtro de secuencia, que es capaz de eliminar estos malos funcionamientos en los sistemas eléctricos desbalanceados, aplicado sobre sistemas sin conductor neutro.

Palabras clave: filtros de secuencia, compensación de potencia reactiva, factor de potencia, desbalance, efecto Ferranti

*The unbalanced produce additional bad workings when in the electric systems there are shunt capacitors for reactive compensation, causing inadequate compensations, with different power factors in each phase of the electric transformers and the consequent danger of the presence of over voltages in the installations, for Ferranti effect, which may destroying so the loads like the capacitors of the reactive compensators. This paper describes a device, called filter of sequence, which is able to eliminate these bad runnings in the unbalanced electric systems, applied in this paper at systems without neutral wire.*

*Key words:* filter of sequence, compensation of reactive power, power factor, unbalanced, Ferranti effect

## INTRODUCCIÓN

Los equipos de compensación de reactiva utilizados en las instalaciones trifásicas industriales son dispositivos balanceados, es decir, suministran la misma potencia reactiva en cada una de sus fases. Mientras que las instalaciones sean balanceadas o los desbalances pequeños, estos dispositivos proporcionan resultados muy satisfactorios, disminuyendo el suministro de potencia reactiva por parte de los generadores, pero sin dar lugar a la aparición de otros fenómenos que afecten al buen funcionamiento de los sistemas eléctricos. No obstante, cuando los desbalances son considerables, lo cual es bastante usual en las instalaciones de baja

tensión, la conexión de equipos de compensación de reactiva puede producir efectos muy perjudiciales en el funcionamiento general de estas instalaciones; la compensación es inadecuada, al haber diferentes factores de potencia en cada fase, alguna de ellas puede pasar a ser capacitiva y dar lugar a efecto Ferranti sobre los transformadores de distribución. El efecto Ferranti, como es conocido, se caracteriza por la presencia de sobretensiones permanentes en los devanados de los transformadores, al incrementarse el valor de sus fems, cuando alimentan a cargas capacitivas; estas sobretensiones pueden superar los 240 V en redes de 220 V y causar daños muy importantes en los receptores de las instalaciones así

como en los equipos de compensación de reactiva. Aunque pueda parecer contradictorio con lo anterior, los equipos de compensación de reactiva funcionan correctamente tanto en los sistemas balanceados como en los desbalanceados, realizando el trabajo que se les ha asignado, es decir, eliminar o, al menos, disminuir los flujos de potencia reactiva de las instalaciones. Para entender el mal funcionamiento de las instalaciones desbalanceadas con equipos de compensación de reactiva, hay que conocer con exactitud la naturaleza de los fenómenos energéticos que se manifiestan durante el funcionamiento de los sistemas eléctricos.

La Teoría Unificadora de la Potencia Eléctrica<sup>1</sup> establece que el fenómeno del desfase o reactivo se manifiesta en todos los sistemas eléctricos, lineales y no lineales, simétricos o asimétricos, mediante tres flujos sinusoidales de potencia reactiva, de igual amplitud, desfasados 120° entre sí y del doble de la frecuencia de las tensiones de alimentación. Cualquier diferencia respecto a esta distribución temporal de la potencia corresponde a otros fenómenos energéticos; así, la diferencia de amplitudes de los flujos de potencia en cada fase debe ser atribuidos al fenómeno del desequilibrio y los flujos de potencia de distinta frecuencia corresponden al fenómeno de la distorsión. Este modelo de la potencia eléctrica explica mejor que las teorías tradicionales el funcionamiento energético de los sistemas eléctricos; a partir de él, se entiende porqué los equipos de compensación de reactiva funcionan bien en todos los sistemas eléctricos con buena calidad en el suministro, ya que proveen flujos de potencia reactiva balanceados y contrarios a los de las instalaciones. Pero, además, este modelo de potencia permite diseñar dispositivos capaces de eliminar los efectos perjudiciales provocados por otras ineficiencias, imposibles de desarrollar con las teorías tradicionales de la potencia eléctrica, alguna de las cuales están recogidas en la *IEEE Standard 1485-2000*.<sup>2</sup> En este artículo se presenta uno de estos dispositivos, llamados filtros de secuencia,<sup>3</sup> aplicados a la mejora de instalaciones trifásicas sin conductor neutro (también se dispone de filtros de secuencia para redes con hilo neutro, aunque no son objetivo de este trabajo).

La compensación de los desbalances de corriente en las instalaciones a partir del empleo de filtros de secuencia resulta de vital importancia para la calidad del sistema de suministro eléctrico, en particular la simetría de tensiones en los receptores.<sup>4</sup>

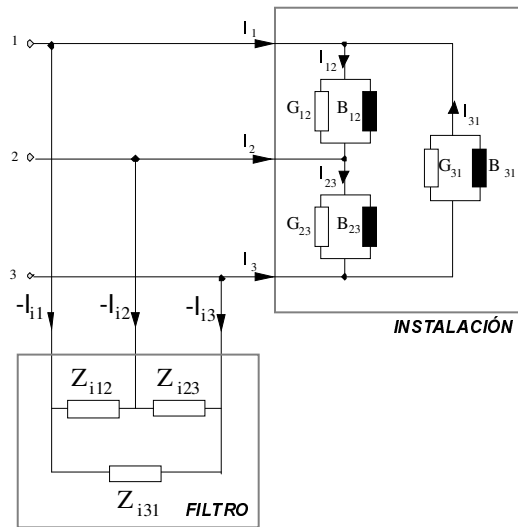
## DESARROLLO

### A. Filtros de secuencia para instalaciones trifásicas sin neutro

Estos dispositivos son los encargados de eliminar el desbalance de las instalaciones trifásicas. El principio de funcionamiento es similar al de los equipos de

compensación de reactiva: así como estos últimos suministran las corrientes reactivas de las instalaciones, los filtros de secuencia suministran las corrientes de desequilibrio que, en las instalaciones trifásicas sin hilo neutro, cuyas fuentes son balanceadas de secuencia directa, están formadas únicamente por las corrientes de secuencia inversa.<sup>3</sup>

Los filtros de secuencia para instalaciones trifásicas sin neutro están constituidos por conexiones trifásicas desbalanceadas, en triángulo, de bobinas y condensadores (figura 1), que se conectan en paralelo con las instalaciones cuya potencia de desequilibrio se desea compensar.



Filtro de secuencia negativa para sistemas en delta.

1

Los valores de las impedancias de cada fase del filtro de secuencia se calculan, en función de las conductancias ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{31}$ ) y de las susceptancias ( $B_{12}$ ,  $B_{23}$ ,  $B_{31}$ ) de las fases de las instalaciones, a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{12i} &= \frac{-3}{j\sqrt{3}(G_{23} - G_{31}) + 2\bar{B}_{12} - \bar{B}_{23} - \bar{B}_{31}} \\ \bar{Z}_{23i} &= \frac{-3}{j\sqrt{3}(G_{31} - G_{12}) - \bar{B}_{12} + 2\bar{B}_{23} - \bar{B}_{31}} \\ \bar{Z}_{31i} &= \frac{-3}{j\sqrt{3}(G_{12} - G_{23}) - \bar{B}_{12} - \bar{B}_{23} + 2\bar{B}_{31}} \end{aligned} \quad \dots(1)$$

El modelo matemático es obtenido aplicando la ley de Ohm en cada fase del filtro e imponiendo la condición de que estos dispositivos deben suministrar las componentes inversas de las corrientes que absorben las instalaciones desequilibradas.

Los valores de las impedancias del filtro pueden ser obtenidos también en función de las potencias activas ( $P_{12}$ ,  $P_{23}$ ,  $P_{31}$ ) y reactivas ( $Q_{12}$ ,  $Q_{23}$ ,  $Q_{31}$ ) de cada una de las fases (1, 2 y 3) de las instalaciones, según las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{12i} &= \frac{j3V_d^2}{\sqrt{3}(P_{23} - P_{31}) - 2Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}} \\ \bar{Z}_{23i} &= \frac{j3V_d^2}{\sqrt{3}(P_{31} - P_{12}) + Q_{12} - 2Q_{23} + Q_{31}} \\ \bar{Z}_{31i} &= \frac{j3V_d^2}{\sqrt{3}(P_{12} - P_{23}) + Q_{12} + Q_{23} - 2Q_{31}} \quad \dots(2)\end{aligned}$$

donde:

$V_d$ : Valor de la tensión de fase en bornes de la instalación.

La implementación conjunta de los filtros de secuencia y compensadores de reactivo, constituye la mejora integral de la eficiencia del sistema eléctrico desbalanceado lineal.<sup>5</sup>

### B. Discusión de un caso práctico

Para comprobar la efectividad de los contenidos teóricos precedentes, se propone el caso de una instalación trifásica, desbalanceada, en triángulo, que consume en cada fase las potencias activas con los factores de potencia indicados en la tabla 1, que son suministrados por la red eléctrica, cuyas tensiones se consideran sinusoidales y balanceadas, de 220 V de tensión de línea, 50 Hz y secuencia directa. La instalación dispone de un equipo de compensación de reactiva, fijo, de potencia  $Q_c = 18\,000$  Var (figura 2).

Las teorías tradicionalmente utilizadas en la Teoría de Circuitos definirían impropriamente un factor de potencia para la instalación trifásica desequilibrada, obtenido como:

$$\begin{aligned}\cos \varphi &= \frac{P}{S} = \frac{P_{RS} + P_{ST} + P_{TR}}{\sqrt{(P_{RS} + P_{ST} + P_{TR})^2 + (Q_{RS} + Q_{ST} + Q_{TR})^2}} = \\ &= 0,757\,8 \quad \dots(3)\end{aligned}$$

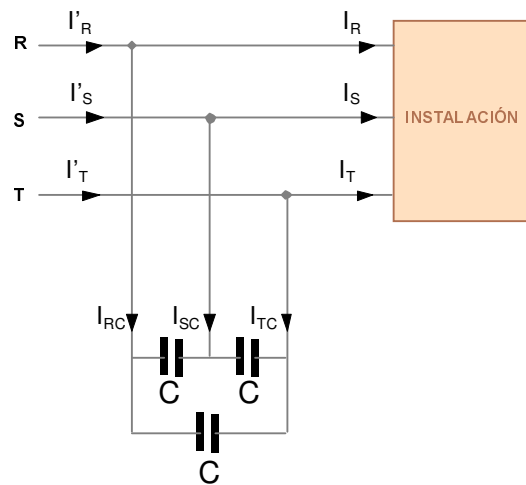
Este parámetro no tiene ningún significado en las instalaciones desbalanceadas, porque el ángulo de desfase tiene distinto valor en cada fase, ni tampoco puede ser utilizado como un índice de la eficiencia del sistema, ya que no tiene en cuenta el fenómeno del desbalance.

Sin embargo, se utiliza en la práctica industrial para determinar las características de los equipos de compensación de reactiva en instalaciones desbalanceadas, aplicando incorrectamente las mismas fórmulas de las instalaciones balanceadas:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad \dots(4)$$

**Tabla 1**  
**Datos de la instalación**

	Potencia(W)	cos
Fase RS	10,000	0,8
Fase ST	15,000	0,75
Fase TR	5,000	0,7



### Conexión del dispositivo fijo de compensación de potencia reactiva

2

Siguiendo este procedimiento, la conexión del equipo de compensación de reactiva antes citado ( $Q_c = 18\,000$  Var) debería haber mejorado el factor de potencia del sistema hasta 0,967 6.

Si la instalación hubiera sido balanceada, no cabría ninguna objeción a este valor, pero al ser la instalación desequilibrada, la compensación es diferente en cada una de sus fases:

$$Q'_{RS} = Q_{RS} - \frac{1}{3}Q_c = 7\,500 - 6\,000 = 1\,500 \text{ var}$$

$$Q'_{ST} = Q_{ST} - \frac{1}{3}Q_c = 13\,229 - 6\,000 = 7\,229 \text{ var}$$

$$Q'_{TR} = Q_{TR} - \frac{1}{3}Q_c = 5\,101 - 6\,000 = -899 \text{ var}$$

$$\cos \phi'_{RS} = 0,989 \text{ (ind)}$$

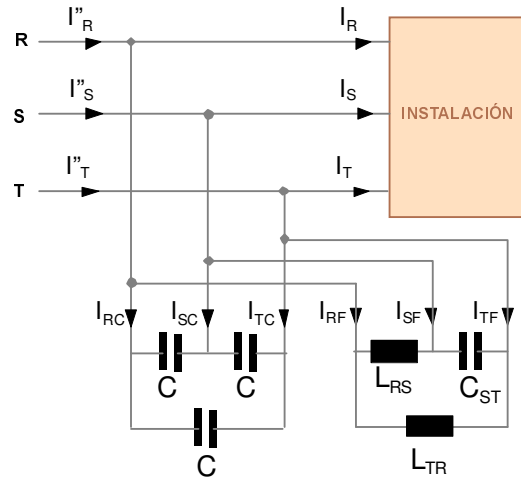
$$\cos \phi'_{ST} = 0,9 \text{ (ind)}$$

$$\cos \phi'_{TR} = 0,984 \text{ (cap)}$$

En este caso, la tercera fase del generador o del transformador en triángulo pasaría al campo capacitivo, con el consiguiente riesgo de que se manifiesten sobretensiones, por efecto Ferranti. Las corrientes suministradas por el generador en estas condiciones son, lógicamente desbalanceadas, de valores en cada fase de la línea indicados en la tabla 2.

En la tabla 2 se observa el efecto del equipo de compensación de reactiva en la disminución del valor eficaz de las corrientes de las líneas; se aprecia también el distinto efecto de la compensación en cada una de las fases de las corrientes de línea, mientras que el desbalance no mejora.

Si en bornes del equipo de compensación de reactiva se conecta un filtro de secuencia (figura 3), obtenido según las expresiones (2):



**Conjunto filtro de secuencia compensador de reactiva en la mejora de la eficiencia.**

3

$$\bar{Z}_{RSi} = \frac{j3V_{RS}^2}{\sqrt{3}(P_{ST} - P_{TR}) - 2Q'_{RS} + Q'_{ST} + Q'_{TR}} = j7,03 \Omega \quad L_{RS} = 22,38 \text{ mH}$$

$$\bar{Z}_{STi} = \frac{j3V_{ST}^2}{\sqrt{3}(P_{TR} - P_{RS}) + Q'_{RS} - 2Q'_{ST} + Q'_{TR}} = -j6,45 \Omega \quad C_{ST} = 493,6 \mu\text{F}$$

$$\bar{Z}_{TRi} = \frac{j3V_{TR}^2}{\sqrt{3}(P_{RS} - P_{ST}) + Q'_{RS} + Q'_{ST} - 2Q'_{TR}} = j77,78 \Omega \quad L_{TR} = 0,247 \text{ H}$$

**Tabla 2**  
**Resultados de las tensiones y corrientes del caso de estudio después de la compensación de potencia reactiva**

Tensiones de fase			Corrientes líneas			Corrientes compensador			Corrientes instalación		
	Valor (V)	Fase		Valor (A)	Fase		Valor (A)	Fase		Valor (A)	Fase
$V_{RN}$	127	$-30^\circ$	$I'_R$	65,04	$-21,8^\circ$	$I_{RC}$	47,244	$60^\circ$	$I_R$	75	$-60,7^\circ$
$V_{SN}$	127	$-150^\circ$	$I'_S$	114,18	$-161,7^\circ$	$I_{SC}$	47,244	$-60^\circ$	$I_S$	131,72	$-182,2^\circ$
$V_{TN}$	127	$-270^\circ$	$I'_T$	76,82	$-308,4^\circ$	$I_{TC}$	47,244	$-180^\circ$	$I_T$	112,4	$-327,6^\circ$

En la tabla 3 se observa que ahora no solo ha quedado eliminado el desequilibrio, sino también han desaparecido los problemas de compensación de reactiva, que se realiza por igual en las tres fases, sin que ninguna de ellas pase a ser capacitiva. Ha desaparecido, por tanto, el mal funcionamiento del sistema y el riesgo de sobretensiones por efecto Ferranti.

## REFERENCIAS

1. León, V.; J. Giner; J. Montañana y A. Cazorla: "Eficiencia en las instalaciones eléctricas. Nuevas definiciones de potencia", *Revista Mundo Electronico*, No. 322, pp. 28-32, Barcelona, julio, 2001.
2. IEEE Power Engineering Society. IEEE Std 1459-2000: IEEE Trial-Use Standard Definitions for the

Tabla 3

Resultados de las tensiones y corrientes del caso de estudio después de la compensación simultánea del desbalance y la potencia reactiva

Corrientes en las líneas			Corrientes filtro de secuencia			Corrientes compensador			Corrientes instalación		
	Valor (A)	Fase		Valor (A)	Fase		Valor (A)	Fase		Valor (A)	Fase
$I''_R$	81,367	-44,6°	$I_{RF}$	32,46	-94,7°	$I_{RC}$	47,244	60°	$I_R$	75	-60,7°
$I''_S$	81,367	-164,6°	$I_{SF}$	32,46	25,3°	$I_{SC}$	47,244	-60°	$I_S$	131,72	-182,2°
$I''_T$	81,367	-284,6°	$I_{TF}$	32,46	145,3°	$I_{TC}$	47,244	-180°	$I_T$	112,4	-327,6°

## CONCLUSIONES

La conexión de filtros de secuencia conjuntamente con los equipos de compensación de reactiva permite mejorar el funcionamiento de los sistemas eléctricos, balanceando las corrientes suministradas por los generadores o por los transformadores de distribución y permitiendo una compensación de reactiva eficaz, sin riesgos de aparición de sobretensiones.

El filtro de secuencia es independiente de la compensación de reactiva que se desee realizar. Es fácil comprobar que los valores de los elementos del filtro no cambian, tanto si hay equipo de compensación de reactiva como si no lo hay, dado que ambos dispositivos tienen propósitos diferentes: el equipo de compensación actúa sobre el fenómeno reactivo, mientras que el filtro de secuencia actúa sobre el desbalance, y este último fenómeno no se modifica al conectar una batería balanceada de condensadores.

Se propone con este artículo, y en aras de mejorar el funcionamiento de los sistemas eléctricos, la conveniencia de que los fabricantes de equipos de compensación de reactiva construyan dispositivos que compensen conjuntamente reactiva y desbalance, dispositivos que deben ser variables cuando los receptores así lo sean.

*Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions.* Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. New York, 21 June, 2000.

3. Cazorla, A.; J. Giner; V. León y J. Montañana: *Filtro de secuencia integral para la mejora de la eficiencia de las instalaciones eléctricas.* Oficina Española de Patentes y Marcas, agosto, 2000.

4. Von Jouanne, Annette: "Assessment of Voltage unbalance / Basudeb Banerjee", *IEEE Transactions on Power Delivery.* 16(4) 782-790, 2001.

5. León, V.; J. Giner; J. Montañana y A. Cazorla: "Compensación de reactiva en instalaciones desequilibradas. Optimización de las prestaciones de los equipos de compensación", *Revista Mundo Electrónico*, No. 317, pp. 54-57, Barcelona, febrero, 2001.

## AUTORES

### Vicente León Martínez

Ingeniero Técnico en Electricidad, Ingeniero Superior Industrial, Doctor Ingeniero Industrial, Catedrático, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España.

e-mail: vleon@die.upv.es

### Davel Borges Vasconcellos

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba

e-mail: davel@em.reduc.edu.cu