

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 702 530**

21 Número de solicitud: 201830563

51 Int. Cl.:

**H02J 3/26** (2006.01)

**H02J 3/18** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**08.06.2018**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**01.03.2019**

71 Solicitantes:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
(100.0%)**

**Servicio de Promoción y Apoyo a la  
Investigación, la Innovación y la Transferencia;  
Edificio Nexus (6G) - 3ª planta; Camí de Vera, s/n  
46022 Valencia ES**

72 Inventor/es:

**LEÓN MARTÍNEZ, Vicente y  
MONTAÑANA ROMEU, Joaquín**

74 Agente/Representante:

**MALDONADO JORDAN, Julia**

54 Título: **PROCEDIMIENTO DE REALIZACIÓN DE UN COMPENSADOR INTEGRAL Y COMPENSADOR INTEGRAL OBTENIDO POR EL MISMO**

57 Resumen:

La invención describe un procedimiento de realización de un compensador integral efectivo de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, minimizando el compensador desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador. El procedimiento comprende las etapas de a) calcular las susceptancias complejas de un compensador integral ideal; b) dado que un compensador integral real se asemeja a la conexión en paralelo del compensador integral ideal de la etapa a) y cargas adicionales, calcular las susceptancias complejas de un compensador de pérdidas adicional; c) obtener al menos uno de la conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas energéticas ( $P_k$ ) para cada elemento ( $k$ ) del compensador; y d) determinar las susceptancias de elementos del compensador integral efectivo, que compensa los desequilibrios y la energía reactiva de la carga, así como los desequilibrios provocados por las pérdidas energéticas en los elementos del propio compensador.

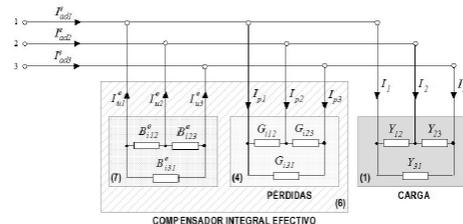


FIG. 4

**DESCRIPCIÓN**

PROCEDIMIENTO DE REALIZACIÓN DE UN COMPENSADOR INTEGRAL Y  
COMPENSADOR INTEGRAL OBTENIDO POR EL MISMO

Campo de la invención

5           La presente invención se refiere de manera general al campo de los dispositivos pasivos encargados de disminuir el impacto que pueden ejercer cargas monofásicas y trifásicas sobre la red eléctrica. Más específicamente, la invención se refiere al campo de los compensadores integrales pasivos de  
10 potencia reactiva y de desequilibrios, para cargas e instalaciones eléctricas alimentadas por fuentes trifásicas

Antecedentes de la invención

15           En la técnica ya se conocen compensadores pasivos dedicados a disminuir el impacto que pueden ejercer cargas monofásicas y trifásicas, muy intensivas, sobre la red eléctrica o cualquier otra fuente trifásica, tales como sistemas de carga de las baterías de coches eléctricos y receptores de alumbrado, entre otros.

20           Las cargas intensivas son aquellas, monofásicas o trifásicas, de elevada potencia, que absorben corrientes de gran valor. Por tanto, su conexión a la red eléctrica puede provocar importantes pérdidas energéticas y elevadas caídas de tensión, que afectan al buen funcionamiento de los receptores  
25 e instalaciones eléctricas, tanto propias como de otros usuarios. Dentro de este tipo de cargas se encuentran los sistemas de carga de vehículos eléctricos y los receptores de alumbrado, entre otras. Los sistemas de carga de vehículos eléctricos requieren el empleo de suministros monofásicos, a  
30 230 V, o trifásicos, a 400 V, con potencias de entre 3,3 y 43 kW, dependiendo del tiempo de carga. Los sistemas de carga más lenta son menos intensivos, con corrientes de 16 A, mientras que los sistemas de carga muy rápida (20-30 minutos) son muy

intensivos, con corrientes de hasta 63 A, en corriente alterna, y de hasta 125 A, en corriente continua, obtenida por rectificación de la corriente alterna. Entre los receptores de alumbrado, resultan especialmente intensivos los proyectores  
5 LED, para eventos deportivos de exterior, con potencias de 1750 W, a 230 V, y los proyectores de halogenuros, con potencias de 2000 W, a 400 V.

Además de los inconvenientes de tipo técnico anteriormente mencionados a los que dan lugar estas cargas,  
10 provocados por la circulación de corrientes de elevado valor, hay que añadir otros efectos económicos, tales como el aumento de los costes de las instalaciones eléctricas en donde se disponen dichas cargas, derivados del mayor valor de las potencias nominales de los transformadores necesarios y del  
15 incremento de las secciones de los conductores de las líneas eléctricas.

Todos estos efectos adversos pueden paliarse mediante el empleo de compensadores integrales pasivos, que están constituidos fundamentalmente por bobinas y condensadores.

20 La misión principal de estos compensadores es reducir el valor de las corrientes de desequilibrio suministradas por la red eléctrica trifásica, transformando las cargas monofásicas y trifásicas desequilibradas en receptores trifásicos equilibrados. Adicionalmente, los compensadores también pueden  
25 suministrar las corrientes reactivas, necesarias para dichas cargas.

En la práctica industrial se conocen ciertos convertidores electrónicos, denominados filtros activos, de los cuales hay una gran variedad en cuanto a constitución y  
30 empresas fabricantes, y que pueden realizar las funciones arriba indicadas. Estos dispositivos pueden "fabricar", con gran precisión, las corrientes reactivas y de desequilibrio que precisan las cargas fijas y variables. Sin embargo,

presentan importantes inconvenientes que los hacen poco útiles para su aplicación a los sistemas de carga de vehículos eléctricos y a los receptores de alumbrado, a saber: son caros, voluminosos y sus bobinas suelen tener importantes consumos de  
5 energía.

Los compensadores integrales pasivos, por el contrario, son dispositivos mucho más económicos, ya que no disponen de elementos propios de la electrónica de potencia ni precisan de circuitería de control, y su constitución es relativamente  
10 sencilla para cargas fijas, ya que están formados por bobinas y condensadores de valor fijo, únicamente, y ocupan bastante menos espacio que los filtros activos de la misma potencia.

Las patentes ES2156828B1, ES2169651B1 y ES2333838B2, presentadas por los presentes inventores, describen tres  
15 compensadores integrales pasivos. Los dos primeros son para cargas fijas, monofásicas y trifásicas, a tres y cuatro hilos, respectivamente, cuyos elementos son bobinas y condensadores, que pueden calcularse en base a las ecuaciones recogidas tanto en los documentos de dichas patentes como en la publicación  
20 "Circuitos conductivos lineales", de Vicente León Martínez, Joaquín Montañana Romeu y Antonio Cazorla Navarro, Editorial Universitat Politècnica de València, 2018, ISBN 978-84-9048-608-5. El compensador desarrollado en la tercera patente es para cargas monofásicas y trifásicas variables; su  
25 constitución y formulación se describen en el artículo "Unbalance Compensator for Three-Phase Industrial Installations", León-Martinez, V.; Montanana-Romeu, J., et al, *Latin America Transactions, IEEE*, vol. 9, n.º 5, págs. 808-814, septiembre de 2011, DOI:10.1109/TLA.2011.6030993, y  
30 en la ponencia "Passive unbalance compensation device for three-phase variable loads", de León-Martinez, V.; Montanana-Romeu, J.; et al; presentada en 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011, págs.

1-4, 8-11 de mayo de 2011  
DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874580.

Otras referencias bibliográficas relevantes sobre estos compensadores incluyen: 1) Jeon, S.J. y Willems, J.L. en el artículo "Reactive power compensation in a multi-line system under sinusoidal unbalanced conditions", International Journal of Circuit Theory and Applications, abril de 2010, Wiley, DOI: 10.1002/cta.629, y 2) F.R. Quintela, J.M.G. Arévalo, R.C. Redondo y N.R. Melchor en el artículo "Four-wire three-phase load balancing with static var compensators", Electrical Power and Energy Systems n.º 33, Elsevier Journal, págs. 562-568, 31 de enero de 2011.

No obstante, en la práctica, los compensadores con elementos pasivos, citados en las anteriores referencias bibliográficas, no pueden compensar los desequilibrios provocados por las pérdidas energéticas en los elementos del propio compensador, que están determinadas por el factor de calidad de las reactancias del compensador (fundamentalmente, de la calidad o energía perdida por sus bobinas, ya que las pérdidas en los condensadores reales suelen ser despreciables). Si las bobinas son de excelente calidad (con factores de la calidad  $Q_F$  superiores a 100), los compensadores descritos en las patentes ES2156828B1 y ES2169651B1 funcionan correctamente, equilibrando las corrientes y reduciendo su valor hasta 0,333 veces la corriente sin compensador, en los compensadores de cargas monofásicas en estrella (ES2169651B1), y hasta 0,577 veces, en los compensadores de cargas monofásicas en triángulo (ES2156828B1). Sin embargo, las bobinas con factores de calidad tan elevados son caras, pesadas y voluminosas; y el empleo de bobinas de inferior calidad, más baratas y menos voluminosas, no es aconsejable en esos compensadores, pues disminuye sensiblemente su eficiencia y buen funcionamiento.

El factor de calidad, es decir, las pérdidas energéticas, de los elementos de los compensadores integrales reales perjudica, pues, el buen funcionamiento de los mismos, al introducir desequilibrios adicionales sobre las corrientes de  
5 línea.

Por tanto, existe en la técnica la necesidad de un procedimiento de diseño y realización de compensadores integrales que permita compensar los malos funcionamientos provocados por las pérdidas energéticas en el propio  
10 compensador, de modo que se obtengan buenos resultados incluso con bobinas económicas con factores de calidad aceptables.

#### Sumario de la invención

Para solucionar los problemas de la técnica anterior, la  
15 presente invención da a conocer un procedimiento de realización de un compensador integral efectivo de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, minimizando el compensador desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador,  
20 comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- a) calcular las susceptancias complejas de los elementos de un compensador integral ideal;
- b) dado que un compensador integral real se asemeja a la conexión en paralelo del compensador integral ideal de  
25 la etapa a) y cargas adicionales, calcular las susceptancias complejas de un compensador de pérdidas adicional;
- c) obtener al menos uno de la conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas energéticas ( $P_k$ ) para cada elemento  
30 (k) del compensador; y
- d) determinar las susceptancias de elementos del compensador integral efectivo, que compensa los desequilibrios y la energía reactiva de la carga, así

como los desequilibrios provocados por las pérdidas energéticas en los elementos del propio compensador.

Breve descripción de los dibujos

5 La presente invención se entenderá mejor con referencia a los siguientes dibujos que ilustran realizaciones preferidas de la presente invención, proporcionadas a modo de ejemplo, y que no deben interpretarse como limitativas de la invención de ninguna manera:

10 La figura 1 representa esquemáticamente un compensador integral, pasivo, ideal, conectado a una carga trifásica alimentada entre fases de una fuente trifásica.

La figura 2 representa el efecto propio de las pérdidas energéticas de los elementos del compensador integral, pasivo,  
15 real, para cargas alimentadas entre fases de una fuente trifásica.

La figura 3 representa el dispositivo pasivo, necesario para minimizar los efectos de las pérdidas de los elementos del compensador integral real.

20 La figura 4 representa el compensador integral efectivo para cargas alimentadas entre fases de una fuente trifásica, según una realización preferida de la presente invención. El compensador integral efectivo resulta de integrar en un único dispositivo el compensador integral real, mostrado en la figura  
25 2, con el compensador de las pérdidas, mostrado en la figura 3.

La figura 5 representa esquemáticamente un compensador integral, pasivo, ideal, conectado a una carga trifásica alimentada entre fase y neutro de una fuente trifásica.

30 La figura 6 representa el efecto propio de las pérdidas energéticas de los elementos del compensador integral, pasivo, real, para cargas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica.

La figura 7 representa el dispositivo pasivo, necesario para minimizar los efectos de las pérdidas de los elementos del compensador integral real.

La figura 8 representa el compensador integral efectivo para cargas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica según una segunda realización preferida de la presente invención. El compensador integral efectivo resulta de integrar en un único dispositivo el compensador integral real, mostrado en la figura 6, con el compensador de las pérdidas, mostrado en la figura 7.

La figura 9 muestra los elementos pasivos que integran al compensador integral efectivo según una realización preferida de la presente invención para cargas alimentadas entre fases de la fuente trifásica, así como el hardware para la medida y visualización de datos.

La figura 10 muestra los elementos pasivos que integran al compensador integral efectivo según otra realización preferida de la presente invención para cargas alimentadas entre fase y neutro de la fuente trifásica, así como el dispositivo para la medida y visualización de datos.

La figura 11 muestra el procedimiento de medida del factor de reducción de pérdidas (*FRP*) y del coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento ( $\varepsilon$ ) del compensador integral efectivo según una realización preferida de la presente invención.

25

#### Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Según la realización preferida de la presente invención, se da a conocer un procedimiento de realización de un compensador integral efectivo de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, minimizando el compensador desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador. En concreto, el procedimiento sirve para determinar las características de los

elementos de los compensadores integrales pasivos de desequilibrios para cargas monofásicas y trifásicas, a tres y cuatro hilos, alimentadas por la red eléctrica o cualquier otra fuente trifásica equilibrada, aproximando a la unidad el factor de potencia de instalaciones eléctricas. De manera novedosa, los compensadores obtenidos mediante el procedimiento según la presente invención minimizan los efectos indeseables provocados por la mala calidad (pérdidas energéticas) de las reactancias (bobinas y condensadores) del compensador.

El procedimiento según la realización preferida comprende las etapas de:

- a) calcular las susceptancias complejas de los elementos de un compensador integral ideal;
- 15 b) dado que un compensador integral real se asemeja a la conexión en paralelo del compensador integral ideal de la etapa a) y cargas adicionales, calcular las susceptancias complejas de un compensador de pérdidas adicional;
- 20 c) obtener al menos uno de la conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas energéticas ( $P_k$ ) para cada elemento (k) del compensador; y
- d) determinar las susceptancias de elementos del compensador integral efectivo, que compensa los desequilibrios y la energía reactiva de la carga, así como los desequilibrios provocados por las pérdidas energéticas en los elementos del propio compensador.

Según otra realización preferida de la presente invención, el procedimiento comprende además las etapas de:

- 30 e) calcular el factor de reducción de pérdidas (FRP%) como el cociente entre las pérdidas provocadas por el funcionamiento de la carga desequilibrada en los distintos elementos del sistema con y sin compensador

integral; y

- f) verificar el correcto funcionamiento del compensador integral a partir del coeficiente de verificación  $\varepsilon$  entre el valor del FRP% calculado con valores óptimos de las corrientes y con valores reales medidos de las mismas;

determinándose que el funcionamiento del compensador integral es mejor cuanto más se aproxime a 1 el valor de  $\varepsilon$ .

Desde el punto de vista de la formulación de los elementos que componen el compensador, se distinguen dos casos prácticos: 1) cargas monofásicas y trifásicas alimentadas entre fases de una fuente trifásica (en triángulo), y 2) cargas monofásicas y trifásicas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica (en estrella). A continuación se detallarán las ecuaciones a aplicar en cada uno de dichos casos prácticos para la implementación de las etapas a) a f) anteriormente descritas del procedimiento según la realización preferida de la presente invención.

- 1) Cargas alimentadas entre fases de una fuente trifásica (en triángulo).

El compensador integral ideal para cargas monofásicas y trifásicas de admitancias complejas  $\bar{Y}_x = G_x + \bar{B}_x$  en cada fase ( $x = 12, 23, 31$ ), que se alimentan entre fases ( $z = 1, 2, 3$ ) de una fuente trifásica equilibrada, en estrella, está formado por una única conexión en triángulo, de bobinas y condensadores ideales, dispuesta tal como se muestra en la conexión (2) de la figura 1. Las susceptancias complejas ( $\bar{B}_{i12}^i, \bar{B}_{i23}^i, \bar{B}_{i31}^i$ ) del mismo se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [1] y [2] a continuación:

$$\bar{B}_{i12}^i = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{31} - G_{23}) - \bar{B}_{12} \quad \bar{B}_{i23}^i = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{12} - G_{31}) - \bar{B}_{23}$$

$$\bar{B}_{i31}^i = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{23} - G_{12}) - \bar{B}_{31}$$

[1]

$$\bar{B}_{i12}^i = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{31} - P_{23}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{12}^*]$$

$$\bar{B}_{i23}^i = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{12} - P_{31}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{23}^*]$$

5 
$$\bar{B}_{i31}^i = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{23} - P_{12}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{31}^*]$$

[2]

en las que  $\bar{Y}_x = G_x + \bar{B}_x$  son las admitancias complejas en cada fase ( $x = 12,23,31$ ) de la carga;  $(P_x, \bar{Q}_x)$  son las potencias activas y reactivas consumidas por cada fase ( $x = 12,23,31$ ) de la carga;  $V_{línea}$  es el valor eficaz de la tensión de línea (entre

10 fases),  $j = 1\angle 90^\circ$  es la unidad imaginaria, en el plano de Gauss; y el asterisco (\*) denota el conjugado de un número complejo.

Las conexiones de reactancias, con los valores determinados por las ecuaciones [1] o [2], suministran las

15 corrientes de desequilibrio, de secuencia inversa, en este caso, así como las corrientes reactivas, de secuencia directa, que absorben las cargas.

Los valores calculados en base a las ecuaciones [1] y [2] son ideales y no tienen en cuenta los efectos prácticos de las

20 reactancias reales. Estos efectos se observan gráficamente en la conexión (4) de la figura 2, por separado del compensador ideal, mediante tres conductancias adicionales ( $G_{i12}, G_{i23}, G_{i31}$ ) conectadas en triángulo, que representan las pérdidas energéticas existentes en las reactancias reales. El

25 compensador integral real equivale, entonces, a la asociación (3), formada por la conexión en paralelo de (2) y (4), en la figura 2.

Las conductancias adicionales ( $G_{ix}, x = 12,23,31$ ) determinan consumos adicionales de potencia activa ( $P_{ix} = G_{ix} \cdot V_{línea}^2, x =$

12,23,31), que dan lugar a desequilibrios adicionales de potencia activa y que son los responsables últimos del mal funcionamiento del compensador integral real. La compensación de estos desequilibrios adicionales y, por tanto, la  
 5 minimización de los efectos de las pérdidas energéticas del compensador integral real (3), puede efectuarse bajo la consideración de que las conductancias  $G_{ix}$  (4) constituyen otra carga desequilibrada, conectada en paralelo con la carga real (1), de admitancias en cada fase  $\bar{Y}_x = G_x + \bar{B}_x$ , y que, por tanto  
 10 los desequilibrios adicionales que esta carga produce pueden compensarse mediante la conexión de un compensador adicional (5), en la figura 3, cuyas susceptancias ( $B'_x, x = 12,23,31$ ) pueden obtenerse mediante una cualquiera de las ecuaciones [3] y [4] a continuación, análogas a las ecuaciones [1] y [2]:

$$15 \quad \bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i31} - G_{i23}) \quad \bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i12} - G_{i31})$$

$$\bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i23} - G_{i12})$$

[3]

$$\bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} (P_{i31} - P_{i23})$$

$$\bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} (P_{i12} - P_{i31})$$

$$20 \quad \bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} (P_{i23} - P_{i12})$$

[4]

en las que  $G_{i12}, G_{i23}, G_{i31}$  son las conductancias y  $P_{i12}, P_{i23}, P_{i31}$  son las pérdidas energéticas de las cargas del compensador integral real.

25 A fin de que estas últimas reactancias no introduzcan nuevas pérdidas, este compensador (5) debe integrarse en el compensador integral de la carga real (3), formando un único dispositivo, tal como se representa en la figura 4. Los valores ( $\bar{B}^e_{i12}, \bar{B}^e_{i23}, \bar{B}^e_{i31}$ ) de las susceptancias (7) de este compensador

integral efectivo (6) se obtienen, en función de las conductancias y susceptancias de las fases de la carga (1) y de las conductancias de las pérdidas en el compensador integral real (3), mediante una cualquiera de las ecuaciones [5] y [6] a continuación:

$$\bar{B}_{i12}^e = \bar{B}_{i12}^i + \bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{31} + G_{i31} - G_{23} - G_{i23}) - \bar{B}_{12}$$

$$\bar{B}_{i23}^e = \bar{B}_{i23}^i + \bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{12} + G_{i12} - G_{31} - G_{i31}) - \bar{B}_{23}$$

$$\bar{B}_{i31}^e = \bar{B}_{i31}^i + \bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{23} + G_{i23} - G_{12} - G_{i12}) - \bar{B}_{31}$$

[5]

$$10 \quad \bar{B}_{i12}^e = \bar{B}_{i12}^i + \bar{B}'_{i12} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{31} + P_{i31} - P_{23} - P_{i23}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{12}^*]$$

$$\bar{B}_{i23}^e = \bar{B}_{i23}^i + \bar{B}'_{i23} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{12} + P_{i12} - P_{31} - P_{i31}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{23}^*]$$

$$\bar{B}_{i31}^e = \bar{B}_{i31}^i + \bar{B}'_{i31} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{línea}^2} [j(P_{23} + P_{i23} - P_{12} - P_{i12}) - \sqrt{3}\bar{Q}_{31}^*]$$

[6]

El carácter inductivo o capacitivo de los elementos de cada fase del compensador integral efectivo (6) no cambia respecto del que tienen los elementos del compensador integral real (3), debido a que las susceptancias ( $\bar{B}'_{i12}, \bar{B}'_{i23}, \bar{B}'_{i31}$ ) son, en la práctica, siempre menores que las susceptancias ( $\bar{B}_{i12}^i, \bar{B}_{i23}^i, \bar{B}_{i31}^i$ ). Por consiguiente, las pérdidas energéticas (4) del compensador integral efectivo (6) son prácticamente iguales a las del compensador integral real (3).

Las corrientes de línea suministradas por la fuente trifásica son, en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de la misma, las siguientes:

25 - Sin compensador. Iguales a las absorbidas por la carga,

$$\bar{I}_z = \bar{I}_{adz} + \bar{I}_{rdz} + \bar{I}_{uz}^i$$

[7]

siendo  $\bar{I}_{adz}$  y  $\bar{I}_{rdz}$  las respectivas corrientes complejas

activa y reactiva, de secuencia directa, y  $\bar{I}'_{uz}$  la corriente compleja de desequilibrio (de secuencia inversa), resultantes de aplicar el teorema de Fortescue.

- Con compensador integral ideal (figura 1). Iguales a las corrientes activas de secuencia directa ( $\bar{I}_{adz}$ ), cuyo valor eficaz es, en función de la potencia activa total consumida por la carga ( $P = P_{12} + P_{23} + P_{31}$ ) y del valor eficaz de las tensiones de línea ( $V_{línea}$ ):

$$I_{adz} = \frac{P}{\sqrt{3} V_{línea}} \quad [8]$$

- Con compensador integral real (figura 2). Iguales a la suma compleja de las corrientes activas de secuencia directa de la carga ( $\bar{I}_{adz}$ ) y de las corrientes activas de pérdidas ( $\bar{I}_{pz}$ ):

$$\bar{I}'_z = \bar{I}_{adz} + \bar{I}_{pz} = \bar{I}_{adz} + \bar{I}'_{adz} + \bar{I}'_{uz} \quad [9]$$

en la que  $\bar{I}'_{adz}$  y  $\bar{I}'_{uz}$  son las respectivas corrientes complejas de secuencia directa y de desequilibrio, de cada fase ( $z = 1,2,3$ ), resultante de aplicar el teorema de Fortescue a las corrientes de pérdidas ( $\bar{I}_{pz}$ ). El valor eficaz de  $\bar{I}'_{adz}$  es, en función de las pérdidas energéticas totales en el compensador real ( $P_p = P_{i12} + P_{i23} + P_{i31}$ ) y del valor eficaz de las tensiones de línea ( $V_{línea}$ ):

$$I'_{adz} = \frac{P_p}{\sqrt{3} V_{línea}} \quad [10]$$

- Con compensador integral efectivo (figura 4). Iguales a la suma compleja de las corrientes activas de secuencia directa de la carga ( $\bar{I}_{adz}$ ) y de pérdidas ( $\bar{I}'_{adz}$ ):

$$\bar{I}^e_{adz} = \bar{I}_{adz} + \bar{I}'_{adz} = \bar{I}'_z - \bar{I}'_{uz}$$

[11]

siendo su valor eficaz en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de la línea:

$$I_{adz}^e = \frac{P + P_p}{\sqrt{3} V_{línea}}$$

[12]

5 Estas corrientes son equilibradas, de secuencia directa, no tienen componente reactiva y son menores que las corrientes ( $\bar{I}_z$ ) suministradas con compensador integral real según la ecuación [9], ya que no contienen las corrientes de desequilibrio provocadas por las pérdidas en el propio  
10 compensador ( $\bar{I}_{uz}$ ).

Para determinar el impacto que produce la conexión del compensador integral para cargas alimentadas entre fases de una fuente trifásica, se establece el factor de reducción de pérdidas (FRP%) como el cociente entre las pérdidas provocadas  
15 por el funcionamiento de la carga trifásica desequilibrada en los distintos elementos del sistema (generadores, transformadores y líneas) con y sin compensador integral, y se expresa en tanto por cien, en función de las corrientes de línea, según la ecuación [13] a continuación:

20 
$$FRP\% = \frac{\sum_z (I_z^e)^2}{\sum_z I_z^2} \cdot 100$$

[13]

en la que  $I_z^e$  son los valores eficaces medidos en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de las líneas con el compensador integral conectado en bornes de la carga e  $I_z$  son los valores eficaces de las  
25 corrientes de línea absorbidas por la carga sin el compensador.

El buen funcionamiento del compensador integral y su adecuación a las previsiones teóricas se obtiene por el cociente de vigilancia ( $\varepsilon$ ) mediante la ecuación [14] a continuación, entre el valor del **FRP%** calculado en base a la  
30 ecuación [13], con los valores óptimos de las corrientes  $I_z^e$ , definidos por la ecuación [12], y con los valores prácticos,

medidos, de dichas corrientes:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (I_{adz}^e)^2}{\sum_z (I_z^e)^2} \quad [14]$$

El funcionamiento óptimo para cada compensador integral se corresponde con el valor  $\varepsilon = 1$ . Valores inferiores de dicho parámetro implican peores funcionamientos del compensador.

2) Cargas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica (en estrella).

10 El compensador integral para cargas monofásicas y trifásicas, de admitancias complejas  $\bar{Y}_z = G_z + \bar{B}_z$  alimentadas entre las fases ( $z = 1,2,3$ ) y el neutro de una fuente trifásica equilibrada está formado por una conexión en estrella (con conductor neutro) y otra en triángulo, de bobinas y  
15 condensadores ideales, dispuestos como se muestra, de forma general, en (9) de la figura 5, y cuyas susceptancias complejas son  $(\bar{B}_{h1}^i, \bar{B}_{h2}^i, \bar{B}_{h3}^i)$ , para la conexión en estrella, y  $(\bar{B}_{i1}^i, \bar{B}_{i2}^i, \bar{B}_{i3}^i)$ , para la conexión en triángulo. Estas susceptancias complejas se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [15] y  
20 [16] a continuación:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{h1}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_2 - G_3) - \bar{B}_1 & \bar{B}_{i1}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_1 - G_2) \\ \bar{B}_{h2}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_3 - G_1) - \bar{B}_2 & \bar{B}_{i2}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_2 - G_3) \\ \bar{B}_{h3}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_1 - G_2) - \bar{B}_3 & \bar{B}_{i3}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_3 - G_1) \end{aligned} \quad [15]$$

$$\begin{aligned} 25 \quad \bar{B}_{h1}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_2 - P_3) - \sqrt{3}\bar{Q}_1^*] & \bar{B}_{i1}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_1 - P_2) \\ \bar{B}_{h2}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_3 - P_1) - \sqrt{3}\bar{Q}_2^*] & \bar{B}_{i2}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_2 - P_3) \\ \bar{B}_{h3}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_1 - P_2) - \sqrt{3}\bar{Q}_3^*] & \bar{B}_{i3}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_3 - P_1) \end{aligned}$$

[16]

en las que  $\bar{Y}_z = G_z + \bar{B}_z$  son las admitancias complejas en cada fase ( $z=1,2,3$ ) de la carga;  $(P_z, \bar{Q}_z)$  son las potencias activas y reactivas consumidas por cada fase ( $z=1,2,3$ ) de la carga;  $V_{fase}$  es el valor eficaz de la tensión entre fase y neutro (simple);  $j = 1\angle 90^\circ$  es la unidad imaginaria, en el plano de Gauss; y el asterisco (\*) denota el conjugado de un número complejo.

La conexión en estrella, de susceptancias determinadas por las ecuaciones [15] o [16], suministra básicamente las corrientes reactiva de secuencia directa y de secuencia homopolar, mientras que la conexión en triángulo proporciona las corrientes de secuencia inversa, que necesita la carga desequilibrada.

Dado que las reactancias reales tienen consumos de potencia activa (pérdidas energéticas), los compensadores integrales reales para cargas en estrella (figura 6), con conductor neutro (10), pueden considerarse formados por la asociación en paralelo del compensador ideal (9), de susceptancias definidas por las ecuaciones [15] o [16], y dos conexiones desequilibradas de conductancias (11), una en estrella ( $G_{h1}, G_{h2}, G_{h3}$ ) y otra en triángulo ( $G_{i1}, G_{i2}, G_{i3}$ ), que representan los efectos de dichas pérdidas energéticas. Estas conductancias suponen, en la práctica, cargas adicionales, que dan lugar a desequilibrios de potencia activa, provocados por el propio compensador, los cuales son los responsables, en definitiva, de los malos funcionamientos de los compensadores integrales pasivos.

Los desequilibrios provocados por las conductancias ( $G_{h1}, G_{h2}, G_{h3}$ ) pueden ser compensados, igual que en las cargas trifásicas resistivas en estrella, mediante dos conexiones de bobinas y condensadores, una en estrella y otra en triángulo, de susceptancias  $(\bar{B}'_{h1}, \bar{B}'_{h2}, \bar{B}'_{h3})$  y  $(\bar{B}'_{i1}, \bar{B}'_{i2}, \bar{B}'_{i3})$ , respectivamente,

como se representa en (13) de la figura 7. Los valores de estas susceptancias se obtienen mediante una cualquiera de las ecuaciones [17] y [18] a continuación:

$$\begin{aligned}
 \bar{B}'_{h1} &= \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{h2} - G_{h3}) & \bar{B}'_{i1} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}}(G_{h1} - G_{h2}) \\
 \bar{B}'_{h2} &= \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{h3} - G_{h1}) & \bar{B}'_{i2} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}}(G_{h2} - G_{h3}) \\
 \bar{B}'_{h3} &= \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{h1} - G_{h2}) & \bar{B}'_{i3} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}}(G_{h3} - G_{h1})
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{B}'_{h1} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h2} - P_{h3}) & \bar{B}'_{i1} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h1} - P_{h2}) \\
 \bar{B}'_{h2} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h3} - P_{h1}) & \bar{B}'_{i2} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h2} - P_{h3}) \\
 \bar{B}'_{h3} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h1} - P_{h2}) & \bar{B}'_{i3} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2}(P_{h3} - P_{h1})
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

en las que  $G_{h1}, G_{h2}, G_{h3}$  son las conductancias y  $P_{h1}, P_{h2}, P_{h3}$  son las pérdidas energéticas de las cargas del compensador integral real.

Los desequilibrios provocados por las conductancias ( $G_{i1}, G_{i2}, G_{i3}$ ) pueden compensarse igual que las cargas trifásicas resistivas en triángulo, mediante una conexión, también en triángulo, como se representa en (14) de la figura 7, y cuyas susceptancias se obtienen mediante una cualquiera de las siguientes ecuaciones [19] y [20]:

$$\bar{B}'_{i12} = \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{i3} - G_{i2}) \quad \bar{B}'_{i23} = \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{i1} - G_{i3}) \quad \bar{B}'_{i31} = \frac{j}{\sqrt{3}}(G_{i2} - G_{i1})
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{B}'_{i12} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{línea}^2}(P_{i3} - P_{i2}) \\
 \bar{B}'_{i23} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{línea}^2}(P_{i1} - P_{i3})
 \end{aligned}$$

$$\bar{B}'_{i31} = \frac{j}{\sqrt{3}V_{línea}^2} (P_{i2} - P_{i1})$$

[20]

Con objeto de que los elementos del compensador de las pérdidas energéticas, (12) en la figura 7, cuyas susceptancias 5 están definidas por las ecuaciones [17], [18], [19] y [20], no introduzcan pérdidas adicionales, este compensador debe integrarse, formando un único dispositivo, con el compensador integral real (10). El compensador integral efectivo, resultante de la integración de (12) en (10), está representado 10 en (15), de la figura 8, y está formado (16) por una conexión en estrella, con conductor neutro, de susceptancias  $(\bar{B}_{h1}^e, \bar{B}_{h2}^e, \bar{B}_{h3}^e)$ , y una conexión en triángulo, de susceptancias  $(\bar{B}_{i1}^e, \bar{B}_{i2}^e, \bar{B}_{i3}^e)$ .

Los valores de las susceptancias de la conexión en 15 estrella del compensador integral efectivo (15), de la figura 8, se determinan mediante una cualquiera de las ecuaciones [21] y [22] a continuación, en función de las conductancias  $(G_1, G_2, G_3)$  y susceptancias complejas  $(\bar{B}_1, \bar{B}_2, \bar{B}_3)$  de la carga y de las conductancias de pérdidas  $(G_{h1}, G_{h2}, G_{h3})$  de los elementos de 20 la conexión en estrella del compensador integral real:

$$\bar{B}_{h1}^e = \bar{B}_{h1}^i + \bar{B}'_{h1} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_2 + G_{h2} - G_3 - G_{h3}) - \sqrt{3}\bar{B}_1]$$

$$\bar{B}_{h2}^e = \bar{B}_{h2}^i + \bar{B}'_{h2} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_3 + G_{h3} - G_1 - G_{h1}) - \sqrt{3}\bar{B}_2]$$

$$\bar{B}_{h3}^e = \bar{B}_{h3}^i + \bar{B}'_{h3} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_1 + G_{h1} - G_2 - G_{h2}) - \sqrt{3}\bar{B}_3]$$

[21]

25 
$$\bar{B}_{h1}^e = \bar{B}_{h1}^i + \bar{B}'_{h1} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_2 + P_{h2} - P_3 - P_{h3}) - \sqrt{3}\bar{Q}_1^*]$$

$$\bar{B}_{h2}^e = \bar{B}_{h2}^i + \bar{B}'_{h2} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_3 + P_{h3} - P_1 - P_{h1}) - \sqrt{3}\bar{Q}_2^*]$$

$$\bar{B}_{h3}^e = \bar{B}_{h3}^i + \bar{B}'_{h3} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_1 + P_{h1} - P_2 - P_{h2}) - \sqrt{3}\bar{Q}_3^*]$$

[22]

Los valores de las susceptancias de la conexión en triángulo del compensador integral efectivo (15), de la figura 8, se obtienen, en función de las conductancias ( $G_1, G_2, G_3$ ) de la carga y de las conductancias de pérdidas ( $G_{h1}, G_{h2}, G_{h3}$ ) y ( $G_{i1}, G_{i2}, G_{i3}$ ) de los elementos del compensador integral real, mediante una cualquiera de las ecuaciones [23] y [24] a continuación:

$$\begin{aligned}
 \bar{B}_{i1}^e &= \bar{B}_{i1}^i + \bar{B}'_{i1} + \bar{B}'_{i12} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_1 + G_{h1} + \frac{3}{2} G_{i3} - G_2 - G_{h2} - \frac{3}{2} G_{i2} \right) \\
 \bar{B}_{i2}^e &= \bar{B}_{i2}^i + \bar{B}'_{i2} + \bar{B}'_{i23} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_2 + G_{h2} + \frac{3}{2} G_{i1} - G_3 - G_{h3} - \frac{3}{2} G_{i3} \right) \\
 \bar{B}_{i3}^e &= \bar{B}_{i3}^i + \bar{B}'_{i3} + \bar{B}'_{i31} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_3 + G_{h3} + \frac{3}{2} G_{i2} - G_1 - G_{h1} - \frac{3}{2} G_{i1} \right)
 \end{aligned}$$

[23]

$$\begin{aligned}
 \bar{B}_{i1}^e &= \bar{B}_{i1}^i + \bar{B}'_{i1} + \bar{B}'_{i12} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_1 + P_{h1} + \frac{1}{2} P_{i3} - P_2 - P_{h2} - \frac{1}{2} P_{i2} \right) \\
 \bar{B}_{i2}^e &= \bar{B}_{i2}^i + \bar{B}'_{i2} + \bar{B}'_{i23} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_2 + P_{h2} + \frac{1}{2} P_{i1} - P_3 - P_{h3} - \frac{1}{2} P_{i3} \right) \\
 \bar{B}_{i3}^e &= \bar{B}_{i3}^i + \bar{B}'_{i3} + \bar{B}'_{i31} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_3 + P_{h3} + \frac{1}{2} P_{i2} - P_1 - P_{h1} - \frac{1}{2} P_{i1} \right)
 \end{aligned}$$

[24]

El carácter inductivo o capacitivo de los elementos de cada fase del compensador integral efectivo (15) no cambia respecto del que tienen los elementos del compensador integral real (10), debido a que las susceptancias ( $\bar{B}'_{i1}, \bar{B}'_{i2}, \bar{B}'_{i3}$ ) y ( $\bar{B}'_{i12}, \bar{B}'_{i23}, \bar{B}'_{i31}$ ) son, en la práctica, siempre menores que las ( $\bar{B}_{i1}^i, \bar{B}_{i2}^i, \bar{B}_{i3}^i$ ). Por consiguiente, las pérdidas energéticas (11) del compensador integral efectivo (15) son prácticamente iguales a las del compensador integral real (10).

Las corrientes de línea suministradas por la fuente trifásica son, en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de la misma, las siguientes:

- Sin compensador. Iguales a las absorbidas por la carga,

$$\bar{I}_z = \bar{I}_{adz} + \bar{I}_{rdz} + \bar{I}_{uz}^i \quad [25]$$

siendo  $\bar{I}_{adz}$  y  $\bar{I}_{rdz}$  las respectivas corrientes complejas activa y reactiva, de secuencia directa, y  $\bar{I}_{uz}^i$  la corriente compleja de desequilibrio (de secuencias inversa y homopolar), resultantes de aplicar el teorema de Fortescue.

- Con compensador integral ideal (figura 5). Iguales a las corrientes activas de secuencia directa ( $\bar{I}_{adz}$ ), cuyo valor eficaz es, en función de la potencia activa total consumida por la carga ( $P = P_1 + P_2 + P_3$ ) y del valor eficaz de las tensiones de fase ( $V_{fase}$ ):

$$I_{adz} = \frac{P}{3 V_{fase}} \quad [26]$$

- Con compensador integral real (figura 6). Iguales a la suma compleja de las corrientes activas de secuencia directa de la carga ( $\bar{I}_{adz}$ ) y de las corrientes activas de pérdidas ( $\bar{I}_{pz}$ ):

$$\bar{I}'_z = \bar{I}_{adz} + \bar{I}_{pz} = \bar{I}_{adz} + \bar{I}'_{adz} + \bar{I}'_{uz} \quad [27]$$

en donde  $\bar{I}'_{adz}$  y  $\bar{I}'_{uz}$  son las respectivas corrientes complejas de secuencia directa y de desequilibrio, de cada fase ( $z = 1,2,3$ ), resultante de aplicar el teorema de Fortescue a las corrientes de pérdidas ( $\bar{I}_{pz}$ ). El valor eficaz de  $\bar{I}'_{adz}$  es, en función de las pérdidas energéticas totales en el compensador real ( $P_p$ ) y del valor eficaz de las tensiones de fase ( $V_{fase}$ ):

$$I'_{adz} = \frac{P_p}{3 V_{fase}} \quad [28]$$

- Con compensador integral efectivo (figura 8). Iguales a la suma compleja de las corrientes activas de

secuencia directa de la carga ( $\bar{I}_{adz}$ ) y de pérdidas ( $\bar{I}'_{adz}$ ):

$$\bar{I}_{adz}^e = \bar{I}_{adz} + \bar{I}'_{adz} = \bar{I}'_z - \bar{I}'_{uz}$$

[29]

siendo su valor eficaz en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de la línea:

5 
$$I_{adz}^e = \frac{P + P_p}{3 V_{fase}}$$

[30]

Estas corrientes son equilibradas, de secuencia directa, no tienen componente reactiva y son menores que las corrientes ( $\bar{I}'_z$ ) suministradas con compensador integral real según la ecuación [25], ya que no contienen las corrientes de desequilibrio provocadas por las pérdidas en el propio compensador ( $\bar{I}'_{uz}$ ).

El impacto del compensador integral para cargas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica está determinado por el factor de reducción de pérdidas (FRP%), establecido de forma análoga que en los compensadores de cargas alimentadas entre fases de la fuente trifásica, como el cociente entre las pérdidas que el funcionamiento de la carga trifásica desequilibrada produce en los distintos elementos del sistema (generadores, transformadores y líneas), con y sin compensador integral, y se expresa en tanto por cien, en función de las corrientes de línea, según la ecuación [31] a continuación:

$$FRP\% = \frac{\sum_z (I_z^e)^2 + (I_N^e)^2}{\sum_z I_z^2 + I_N^2} \cdot 100$$

25

[31]

en la que  $I_z^e$  y  $I_N^e$  son, respectivamente, los valores eficaces medidos en cada fase ( $z = 1,2,3$ ) de las líneas y del conductor neutro ( $N$ ), con el compensador integral efectivo conectado en bornes de la carga, y  $I_z$  e  $I_N$  son los valores eficaces de las corrientes de línea absorbidas por la carga y circulantes por el conductor neutro, respectivamente, sin el

compensador.

El buen funcionamiento del compensador integral y su adecuación a las previsiones teóricas se obtiene por el cociente de vigilancia ( $\varepsilon$ ) mediante la ecuación [32] a  
 5 continuación, entre el valor del *FRP*% calculado en base a la ecuación [31], con los valores óptimos de las corrientes  $I_z^e$ , definidos por la ecuación [30], y con los valores prácticos, medidos, de dichas corrientes, a saber:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (I_{adz}^e)^2}{\sum_z (I_z^e)^2 + I_N^2}$$

10

[32]

El funcionamiento óptimo para cada compensador integral se corresponde con el valor  $\varepsilon = 1$ . Valores inferiores de dicho parámetro indican peores funcionamientos del compensador.

La conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas  
 15 energéticas ( $P_k$ ) obtenidas en la etapa c) del procedimiento según la realización preferida de la presente invención se calculan mediante la ecuación [33] a continuación:

$$G_k = \frac{B_k}{QF_k} \quad P_k = \frac{B_k \cdot V_k^2}{QF_k} \quad [33]$$

cuando el elemento (k) del compensador integral efectivo  
 20 es una bobina;

y mediante la ecuación [34] a continuación:

$$G_k = \frac{B_k}{tg\alpha_k} \quad P_k = \frac{B_k \cdot V_k^2}{tg\alpha_k} \quad [34]$$

cuando el elemento (k) del compensador integral efectivo es un condensador.

25 En las ecuaciones [33] y [34], ( $QF_k$ ) es el factor de calidad (elegido por el usuario o proporcionado por el fabricante), ( $tg\alpha_k$ ) es la tangente del ángulo de pérdidas,  $B_k$  y  $V_k$  son los valores de la susceptancia y de la tensión aplicada al elemento  $k$ , respectivamente.

30 La figura 9 muestra una realización preferida del compensador integral efectivo para cargas alimentadas entre

fases de una fuente trifásica, así como su conexión a dichas cargas y a la fuente. Los elementos de dicho compensador (E) están asociados en triángulo y, a su vez, conectados en paralelo con las fases de la carga. El procedimiento para la  
5 determinación de dichos elementos comprende las siguientes etapas:

- A partir de las conductancias y susceptancias de las fases de la carga, calcular las susceptancias de los elementos del compensador integral ideal para cargas alimentadas entre  
10 fases de la fuente trifásica, aplicando las ecuaciones [1] o [2] anteriormente definidas.

- A partir del factor de calidad de las bobinas y de la tangente del ángulo de pérdidas de los condensadores, elegidos por el usuario o proporcionados por el fabricante,  
15 obtener su conductancia de pérdidas aplicando la ecuación [33], o bien las pérdidas energéticas de cada una de las mismas aplicando la ecuación [34].

- A partir de los valores de las conductancias o de las pérdidas energéticas, obtenidas en el paso anterior,  
20 determinar las susceptancias de los elementos del compensador integral efectivo, aplicando las ecuaciones [5] o [6].

La figura 10 muestra una realización preferida del compensador integral efectivo para cargas alimentadas entre fase y neutro de una fuente trifásica, así como su conexión a  
25 dichas cargas y a la fuente. Los elementos de dicho compensador (F) están formados por una conexión en triángulo y otra en estrella, con conductor neutro, que están conectadas, a su vez, en bornes de la carga. El procedimiento para la determinación de dichos elementos comprende las siguientes  
30 etapas:

- A partir de las conductancias y susceptancias de las fases de la carga, calcular las susceptancias de los elementos del compensador integral ideal para cargas alimentadas entre

fases de la fuente trifásica, aplicando las ecuaciones [15] o [16] anteriormente definidas.

- A partir del factor de calidad de las bobinas y de la tangente del ángulo de pérdidas de los condensadores, 5 elegidos por el usuario o proporcionados por el fabricante, obtener su conductancia de pérdidas aplicando la ecuación [33], o bien las pérdidas energéticas de cada una de las mismas aplicando la ecuación [34].

- A partir de los valores de las conductancias o de 10 las pérdidas energéticas, obtenidas en el paso anterior, determinar las susceptancias de los elementos del compensador integral efectivo, aplicando las ecuaciones [21] y [23] o [22] y [24].

La figura 11 muestra una posible realización del 15 procedimiento de realización de un compensador integral efectivo, objeto de la presente invención, que puede aplicarse indistintamente tanto para compensadores de cargas alimentadas entre fases, como para compensadores de cargas alimentadas entre fase y neutro de la fuente trifásica. El procedimiento 20 comprende las siguientes etapas:

- Procesado digital (17) de las señales muestreadas obtenidas por el sistema físico (véase la figura 11) de medida y adquisición de señales eléctricas del dispositivo, obteniéndose las matrices de valores eficaces y fases iniciales 25 de las corrientes de línea suministradas por la fuente trifásica y absorbidas por la carga, a la frecuencia fundamental para cada fase de la línea.

- Con estas matrices se obtienen las corrientes circulantes por el conductor neutro de la carga y de la fuente 30 trifásica, en el caso de que existan tales conductores, así como se determinan (en 18) los valores eficaces de las componentes activas de secuencia directa suministradas por la fuente trifásica, a la frecuencia fundamental.

- A partir de las matrices de valores eficaces de las intensidades de línea y del neutro, así como de las componentes activas de secuencia directa, a la frecuencia fundamental, se calculan (en 19) el factor de reducción de pérdidas y el  
5 coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento del compensador, según las ecuaciones [13] y [14], respectivamente, para compensadores integrales de cargas alimentadas entre fases, o bien, aplicando las ecuaciones [31] y [32], respectivamente, para compensadores integrales de  
10 cargas alimentadas entre fase y neutro de la fuente.

- La información gráfica y numérica del factor de reducción de pérdidas y del coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento del compensador integral, así como los valores eficaces de las corrientes suministradas por la fuente  
15 trifásica, se visualizan (en 20) en un dispositivo de visualización.

El dispositivo para la puesta en práctica del procedimiento de medida, como se muestra en las figuras 9 y 10, está formado por un sistema físico de medida y adquisición  
20 de señales eléctricas (A) (hardware) y por un sistema procesador (B), así como por un programa de medida (C) y por un dispositivo de visualización (D).

El sistema físico se compone de unos acondicionadores de señal y una tarjeta de adquisición de datos. Los primeros  
25 adaptan los valores instantáneos de las corrientes del secundario de unos sensores de medida de intensidad (A), de manera que las tensiones en sus salidas son aplicables a las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición o dispositivo equivalente, que convierte las señales analógicas de tensión  
30 e intensidad en una serie de muestras discretas que se utilizan como entrada en el programa de medida. Asimismo, hay un sistema procesador (B) con una placa base en la que se coloca la tarjeta de adquisición para que se puedan intercambiar las

muestras discretas de las señales de tensión e intensidad con el programa de medida (C). También dispone de una pantalla o dispositivo de visualización (D) en el que se visualiza la información sobre las corrientes de línea y del neutro  
5 suministradas por la fuente trifásica, así como el factor de reducción de pérdidas y el coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento del compensador integral.

El programa de medida (C) se compone de los siguientes módulos (figura 11):

10 - Módulo de procesado digital de señal (17), que adquiere muestras de la intensidad de línea suministrada por la fuente y absorbida por la carga, y las guarda en un vector para cada una de ellas, obteniéndose los valores eficaces y la fase inicial de las corrientes de frecuencia fundamental, así como  
15 las corrientes de los neutros de la corriente fundamental.

- Módulo de simétricas (18), que obtiene las componentes activas, de secuencia directa, en valor eficaz, de las corrientes suministradas por la fuente, a la frecuencia fundamental, a partir de las matrices obtenidas en el módulo  
20 anterior.

- Módulo de coeficientes (19), encargado de obtener los valores del factor de reducción de pérdidas y el coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento del compensador integral, según las ecuaciones [13] y [14], respectivamente,  
25 para compensadores de cargas alimentadas entre fases, o bien, aplicando las ecuaciones [31] y [32], respectivamente, para compensadores integrales de cargas alimentadas entre fase y neutro de la fuente.

- Módulo de visualización (20), encargado de mostrar en  
30 una pantalla la información gráfica y numérica de las corrientes de línea y del neutro, así como el factor de reducción de pérdidas y el coeficiente de vigilancia del buen funcionamiento del compensador integral.

La invención también se refiere al compensador integral efectivo de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, que minimiza desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador, en el que las susceptancias de los elementos de dicho compensador integral efectivo se determinan mediante el procedimiento descrito anteriormente en el presente documento.

La presente invención se ha descrito anteriormente haciendo referencia a realizaciones preferidas específicas de la misma, presentadas únicamente a modo de ejemplo. Sin embargo, los expertos en la técnica podrán aplicar fácilmente modificaciones y variaciones a dichas realizaciones sin por ello apartarse del alcance de protección de la presente invención, definido únicamente por las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de realización de un compensador integral efectivo de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, minimizando el compensador desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador, comprendiendo el procedimiento las etapas de:
  - a) calcular las susceptancias complejas de los elementos de un compensador integral ideal;
  - 10 b) dado que un compensador integral real se asemeja a la conexión en paralelo del compensador integral ideal de la etapa a) y cargas adicionales, calcular las susceptancias complejas de un compensador de pérdidas adicional;
  - 15 c) obtener al menos uno de la conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas energéticas ( $P_k$ ) para cada elemento ( $k$ ) del compensador; y
  - d) determinar las susceptancias de elementos del compensador integral efectivo, que compensa los desequilibrios y la energía reactiva de la carga, así como los desequilibrios provocados por las pérdidas energéticas en los elementos del propio compensador.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que comprende además las etapas de:
  - 25 e) calcular el factor de reducción de pérdidas (FRP%) como el cociente entre las pérdidas provocadas por el funcionamiento de la carga desequilibrada en los distintos elementos del sistema con y sin compensador integral; y
  - 30 f) verificar el correcto funcionamiento del compensador integral a partir del coeficiente de verificación  $\varepsilon$  entre el valor del FRP% calculado con valores óptimos de las corrientes y con valores reales medidos de las

mismas;

determinándose que el funcionamiento del compensador integral es mejor cuanto más se aproxime a 1 el valor de  $\varepsilon$ .

- 5 3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, aplicándose el compensador integral a cargas alimentadas entre fases de la fuente trifásica, caracterizado por que en la etapa a) las susceptancias complejas del compensador integral ideal ( $\bar{B}_{i12}^i, \bar{B}_{i23}^i, \bar{B}_{i31}^i$ ) se  
10 calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [1] y [2] a continuación:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{i12}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{31} - G_{23}) - \bar{B}_{12} & \bar{B}_{i23}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{12} - G_{31}) - \bar{B}_{23} \\ \bar{B}_{i31}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{23} - G_{12}) - \bar{B}_{31} \end{aligned} \quad [1]$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_{i12}^i &= \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} [j(P_{31} - P_{23}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{12}^*] \\ \bar{B}_{i23}^i &= \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} [j(P_{12} - P_{31}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{23}^*] \\ \bar{B}_{i31}^i &= \frac{1}{\sqrt{3} V_{línea}^2} [j(P_{23} - P_{12}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{31}^*] \end{aligned} \quad [2]$$

en las que  $\bar{Y}_x = G_x + \bar{B}_x$  son las admitancias complejas en  
20 cada fase ( $x = 12, 23, 31$ ) de la carga; ( $P_x, \bar{Q}_x$ ) son las potencias activas y reactivas consumidas por cada fase ( $x = 12, 23, 31$ ) de la carga;  $V_{línea}$  es el valor eficaz de la tensión de línea (entre fases),  $j = 1 \angle 90^\circ$  es la unidad imaginaria, en el plano de Gauss; y el asterisco (\*)  
25 denota el conjugado de un número complejo.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado por que en la etapa b) las susceptancias complejas ( $\bar{B}'_{ix}, x = 12, 23, 31$ ) del compensador de pérdidas adicional se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [3] y [4] a

continuación:

$$\bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i31} - G_{i23}) \quad \bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i12} - G_{i31})$$

$$\bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{i23} - G_{i12})$$

[3]

5

$$\bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} (P_{i31} - P_{i23})$$

$$\bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} (P_{i12} - P_{i31})$$

$$\bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} (P_{i23} - P_{i12})$$

[4]

10

en las que  $G_{i12}, G_{i23}, G_{i31}$  son las conductancias y  $P_{i12}, P_{i23}, P_{i31}$  son las pérdidas energéticas de las cargas del compensador integral real.

5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 3 y 4, caracterizado por que en la etapa d) las susceptancias ( $\bar{B}_{i12}^e, \bar{B}_{i23}^e, \bar{B}_{i31}^e$ ) del compensador integral efectivo se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [5] y [6] a continuación:

15

$$\bar{B}_{i12}^e = \bar{B}_{i12}^i + \bar{B}'_{i12} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{31} + G_{i31} - G_{23} - G_{i23}) - \bar{B}_{12}$$

$$\bar{B}_{i23}^e = \bar{B}_{i23}^i + \bar{B}'_{i23} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{12} + G_{i12} - G_{31} - G_{i31}) - \bar{B}_{23}$$

$$\bar{B}_{i31}^e = \bar{B}_{i31}^i + \bar{B}'_{i31} = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{23} + G_{i23} - G_{12} - G_{i12}) - \bar{B}_{31}$$

20

[5]

$$\bar{B}_{i12}^e = \bar{B}_{i12}^i + \bar{B}'_{i12} = \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} [j(P_{31} + P_{i31} - P_{23} - P_{i23}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{12}^*]$$

$$\bar{B}_{i23}^e = \bar{B}_{i23}^i + \bar{B}'_{i23} = \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} [j(P_{12} + P_{i12} - P_{31} - P_{i31}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{23}^*]$$

$$\bar{B}_{i31}^e = \bar{B}_{i31}^i + \bar{B}'_{i31} = \frac{1}{\sqrt{3} V_{\text{línea}}^2} [j(P_{23} + P_{i23} - P_{12} - P_{i12}) - \sqrt{3} \bar{Q}_{31}^*]$$

[6]

6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, caracterizado por que en la etapa e) se calcula el factor de reducción de pérdidas (FRP%) según la ecuación [13] a continuación:

$$FRP\% = \frac{\sum_z (I_z^e)^2}{\sum_z I_z^2} \cdot 100 \quad [13]$$

en la que  $I_z^e$  es la corriente de línea con compensador integral efectivo e  $I_z$  es la corriente de línea sin compensador integral en cada fase ( $z = 1, 2, 3$ ).

- 10 7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado por que en la etapa f) se calcula el coeficiente de verificación  $\varepsilon$  mediante la ecuación [14] a continuación:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (I_{adz}^e)^2}{\sum_z (I_z^e)^2} \quad [14]$$

- 15 en la que  $I_{adz}^e$  es la corriente de línea compleja activa con compensador integral efectivo.

8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, aplicándose el compensador integral a cargas alimentadas entre fase y neutro de la fuente trifásica, estando el compensador integral ideal formado por una conexión en estrella (con conductor neutro) y otra en triángulo, cuyas susceptancias complejas son  $(\bar{B}_{h1}^i, \bar{B}_{h2}^i, \bar{B}_{h3}^i)$ , para la conexión en estrella, y  $(\bar{B}_{i1}^i, \bar{B}_{i2}^i, \bar{B}_{i3}^i)$ , para la conexión en triángulo, caracterizado por que en la etapa a) las susceptancias complejas del compensador integral ideal se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [15] y [16] a continuación:

$$\begin{aligned} \bar{B}_{h1}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_2 - G_3) - \bar{B}_1 & \bar{B}_{i1}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_1 - G_2) \\ \bar{B}_{h2}^i &= j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_3 - G_1) - \bar{B}_2 & \bar{B}_{i2}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_2 - G_3) \end{aligned}$$

$$\bar{B}_{h3}^i = j \frac{1}{\sqrt{3}} (G_1 - G_2) - \bar{B}_3 \quad \bar{B}_{i3}^i = j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_3 - G_1) \quad [15]$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_{h1}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_2 - P_3) - \sqrt{3}\bar{Q}_1^*] & \bar{B}_{i1}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_1 - P_2) \\ \bar{B}_{h2}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_3 - P_1) - \sqrt{3}\bar{Q}_2^*] & \bar{B}_{i2}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_2 - P_3) \\ 5 \quad \bar{B}_{h3}^i &= \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_1 - P_2) - \sqrt{3}\bar{Q}_3^*] & \bar{B}_{i3}^i &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_3 - P_1) \end{aligned} \quad [16]$$

en las que  $\bar{Y}_z = G_z + \bar{B}_z$  son las admitancias complejas en cada fase ( $z = 1, 2, 3$ ) de la carga;  $(P_z, \bar{Q}_z)$  son las potencias activas y reactivas consumidas por cada fase ( $z = 1, 2, 3$ ) de la carga;  $V_{fase}$  es el valor eficaz de la tensión entre fase y neutro,  $j = 1\angle 90^\circ$  es la unidad imaginaria, en el plano de Gauss; y el asterisco (\*) denota el conjugado de un número complejo.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado por que en la etapa b) el compensador integral real se asemeja a la conexión en paralelo del compensador integral ideal de la etapa a) y dos conexiones desequilibradas de cargas, una en estrella y otra en triángulo, y porque el compensador de pérdidas adicional comprende dos conexiones, una en estrella y otra en triángulo, cuyas susceptancias complejas  $(\bar{B}'_{h1}, \bar{B}'_{h2}, \bar{B}'_{h3})$  y  $(\bar{B}'_{i1}, \bar{B}'_{i2}, \bar{B}'_{i3})$  respectivamente, se calculan mediante una cualquiera de las ecuaciones [17] y [18] a continuación:

$$\begin{aligned} \bar{B}'_{h1} &= \frac{j}{\sqrt{3}} (G_{h2} - G_{h3}) & \bar{B}'_{i1} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{h1} - G_{h2}) \\ \bar{B}'_{h2} &= \frac{j}{\sqrt{3}} (G_{h3} - G_{h1}) & \bar{B}'_{i2} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{h2} - G_{h3}) \\ 25 \quad \bar{B}'_{h3} &= \frac{j}{\sqrt{3}} (G_{h1} - G_{h2}) & \bar{B}'_{i3} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{h3} - G_{h1}) \end{aligned} \quad [17]$$

$$\begin{aligned}\bar{B}'_{h1} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h2} - P_{h3}) & \bar{B}'_{i1} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h1} - P_{h2}) \\ \bar{B}'_{h2} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h3} - P_{h1}) & \bar{B}'_{i2} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h2} - P_{h3}) \\ \bar{B}'_{h3} &= \frac{j}{\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h1} - P_{h2}) & \bar{B}'_{i3} &= j \frac{2}{3\sqrt{3}V_{fase}^2} (P_{h3} - P_{h1})\end{aligned}$$

[18]

5 en las que  $G_{h1}, G_{h2}, G_{h3}$  son las conductancias y  $P_{h1}, P_{h2}, P_{h3}$  son las pérdidas energéticas de las cargas del compensador integral real.

10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 y 9, caracterizado por que en la etapa d) las  
10 susceptancias ( $\bar{B}_{h1}^e, \bar{B}_{h2}^e, \bar{B}_{h3}^e$ ) de los elementos de la conexión en estrella y ( $\bar{B}_{i1}^e, \bar{B}_{i2}^e, \bar{B}_{i3}^e$ ) de los elementos de la conexión en triángulo del compensador integral efectivo se calculan mediante cualquiera de las ecuaciones [21] y [22], y [23] y [24], respectivamente:

$$\begin{aligned}15 \quad \bar{B}_{h1}^e &= \bar{B}_{h1}^i + \bar{B}'_{h1} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_2 + G_{h2} - G_3 - G_{h3}) - \sqrt{3}\bar{B}_1] \\ \bar{B}_{h2}^e &= \bar{B}_{h2}^i + \bar{B}'_{h2} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_3 + G_{h3} - G_1 - G_{h1}) - \sqrt{3}\bar{B}_2] \\ \bar{B}_{h3}^e &= \bar{B}_{h3}^i + \bar{B}'_{h3} = \frac{1}{\sqrt{3}} [j(G_1 + G_{h1} - G_2 - G_{h2}) - \sqrt{3}\bar{B}_3]\end{aligned}$$

[21]

$$\begin{aligned}20 \quad \bar{B}_{h1}^e &= \bar{B}_{h1}^i + \bar{B}'_{h1} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_2 + P_{h2} - P_3 - P_{h3}) - \sqrt{3}\bar{Q}_1^*] \\ \bar{B}_{h2}^e &= \bar{B}_{h2}^i + \bar{B}'_{h2} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_3 + P_{h3} - P_1 - P_{h1}) - \sqrt{3}\bar{Q}_2^*] \\ \bar{B}_{h3}^e &= \bar{B}_{h3}^i + \bar{B}'_{h3} = \frac{1}{\sqrt{3}V_{fase}^2} [j(P_1 + P_{h1} - P_2 - P_{h2}) - \sqrt{3}\bar{Q}_3^*]\end{aligned}$$

[22]

$$\bar{B}_{i1}^e = \bar{B}_{i1}^i + \bar{B}'_{i1} + \bar{B}'_{i12} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_1 + G_{h1} + \frac{3}{2} G_{i3} - G_2 - G_{h2} - \frac{3}{2} G_{i2} \right)$$

$$\bar{B}_{i2}^e = \bar{B}_{i2}^i + \bar{B}'_{i2} + \bar{B}'_{i23} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_2 + G_{h2} + \frac{3}{2} G_{i1} - G_3 - G_{h3} - \frac{3}{2} G_{i3} \right)$$

$$\bar{B}_{i3}^e = \bar{B}_{i3}^i + \bar{B}'_{i3} + \bar{B}'_{i31} = j \frac{2}{3\sqrt{3}} \left( G_3 + G_{h3} + \frac{3}{2} G_{i2} - G_1 - G_{h1} - \frac{3}{2} G_{i1} \right)$$

[23]

$$\bar{B}_{i1}^e = \bar{B}_{i1}^i + \bar{B}'_{i1} + \bar{B}'_{i12} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_1 + P_{h1} + \frac{1}{2} P_{i3} - P_2 - P_{h2} - \frac{1}{2} P_{i2} \right)$$

5 
$$\bar{B}_{i2}^e = \bar{B}_{i2}^i + \bar{B}'_{i2} + \bar{B}'_{i23} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_2 + P_{h2} + \frac{1}{2} P_{i1} - P_3 - P_{h3} - \frac{1}{2} P_{i3} \right)$$

$$\bar{B}_{i3}^e = \bar{B}_{i3}^i + \bar{B}'_{i3} + \bar{B}'_{i31} = j \frac{2}{\sqrt{3}V_{línea}^2} \left( P_3 + P_{h3} + \frac{1}{2} P_{i2} - P_1 - P_{h1} - \frac{1}{2} P_{i1} \right)$$

[24]

11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, caracterizado por que en la etapa e) se calcula el factor de reducción de pérdidas (FRP%) según la ecuación [31] a continuación:

$$FRP\% = \frac{\sum_z (I_z^e)^2 + (I_N^e)^2}{\sum_z I_z^2 + I_N^2} \cdot 100$$

[31]

- 15 en la que  $I_z^e$  e  $I_N^e$  son las corrientes de línea con compensador integral efectivo en cada fase ( $z = 1, 2, 3$ ) y en el conductor neutro (N),  $I_z$  e  $I_N$  son las corrientes de línea sin compensador integral en cada fase ( $z = 1, 2, 3$ ) y en el conductor neutro (N).

12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado por que en la etapa f) se calcula el coeficiente de verificación  $\varepsilon$  mediante la ecuación [32] a continuación:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot (I_{adz}^e)^2}{\sum_z (I_z^e)^2 + I_N^2}$$

[32]

- 25 en la que  $I_{adz}^e$  es la corriente de línea compleja activa con compensador integral efectivo.

13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que en la etapa c) la

conductancia de pérdidas ( $G_k$ ) y las pérdidas energéticas ( $P_k$ ) se calculan mediante la ecuación [33] a continuación:

$$G_k = \frac{B_k}{QF_k} \quad P_k = \frac{B_k \cdot V_k^2}{QF_k} \quad [33]$$

cuando el elemento (k) es una bobina;

5 y mediante la ecuación [34] a continuación:

$$G_k = \frac{B_k}{tg\alpha_k} \quad P_k = \frac{B_k \cdot V_k^2}{tg\alpha_k} \quad [34]$$

cuando el elemento (k) es un condensador;

en las que ( $QF_k$ ) es el factor de calidad, ( $tg\alpha_k$ ) es la tangente del ángulo de pérdidas,  $B_k$  y  $V_k$  son los valores de la susceptancia y de la tensión aplicada al elemento  $k$ , respectivamente.

10

14. Compensador integral de desequilibrios para cargas alimentadas por una fuente trifásica equilibrada, que minimiza desequilibrios provocados por pérdidas energéticas en elementos de dicho compensador, determinándose las susceptancias de elementos del compensador integral efectivo mediante el procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

15

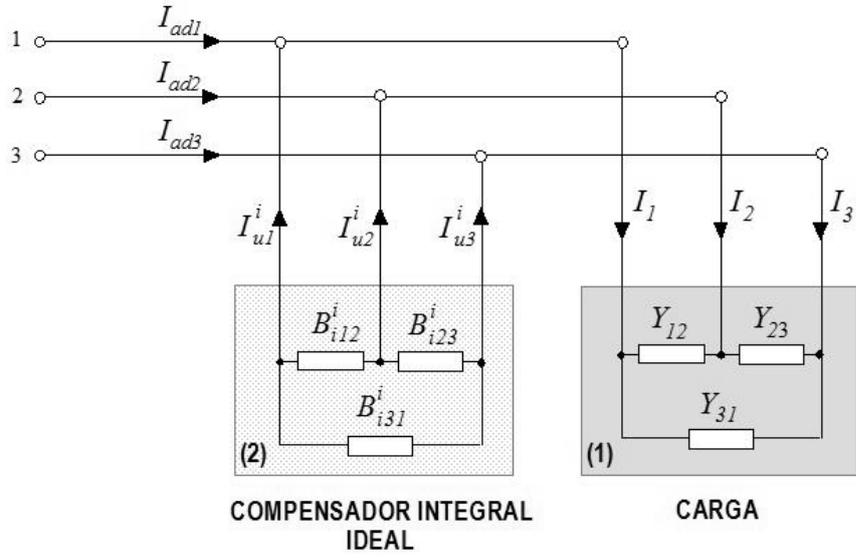


FIG. 1

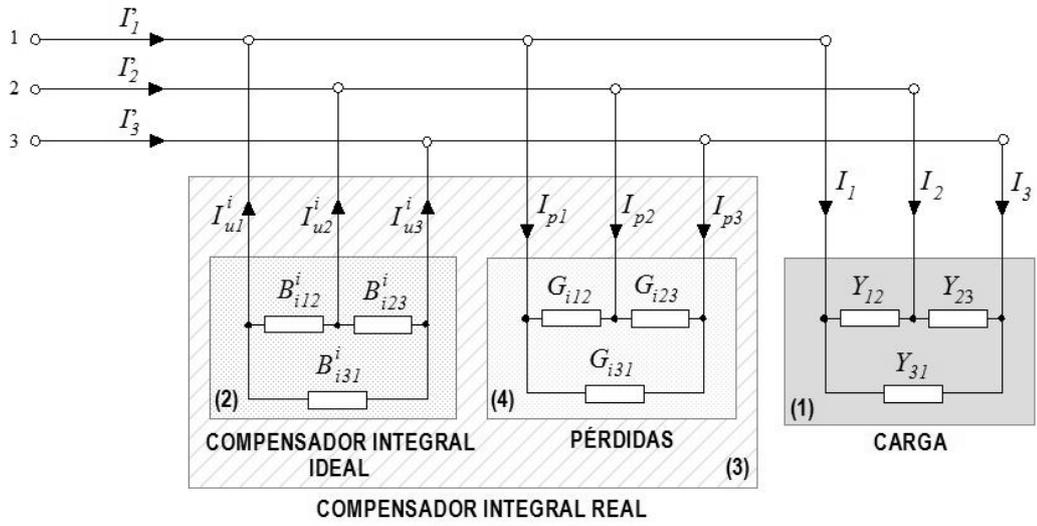


FIG. 2

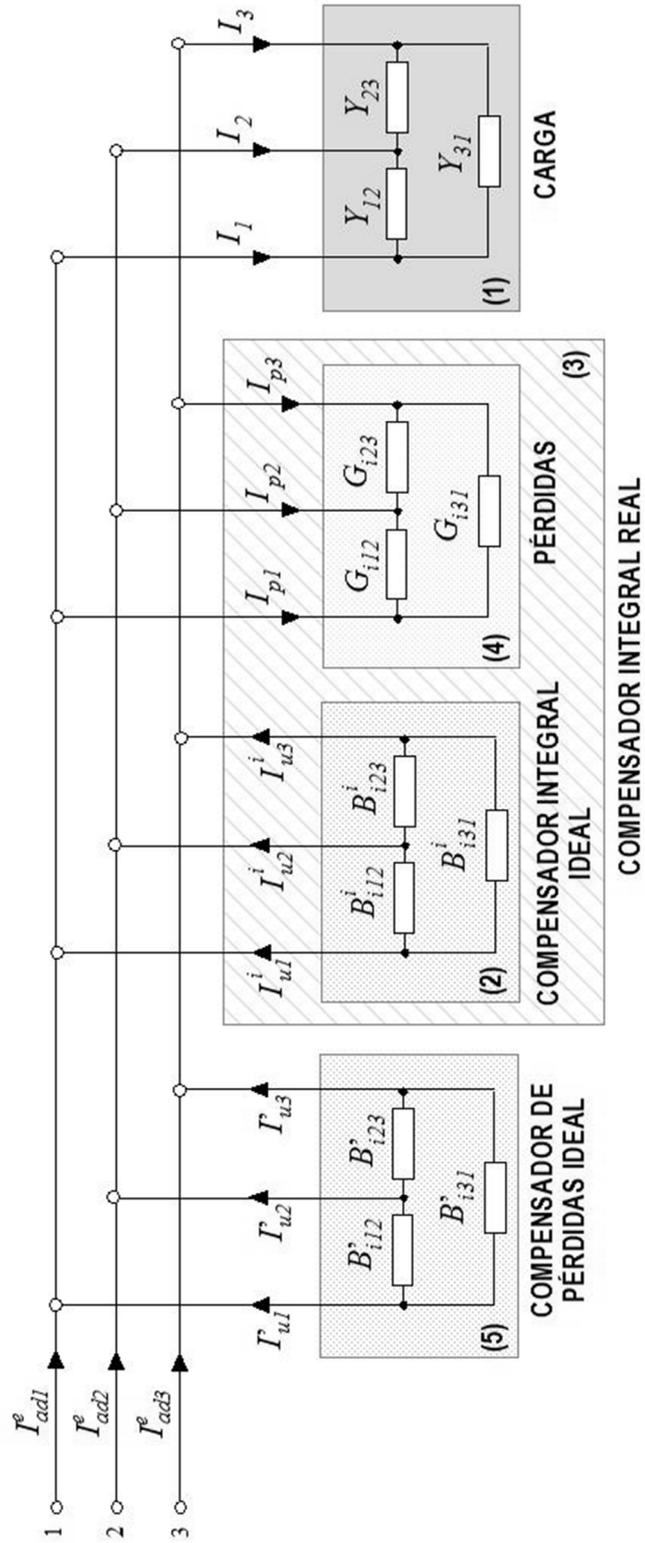
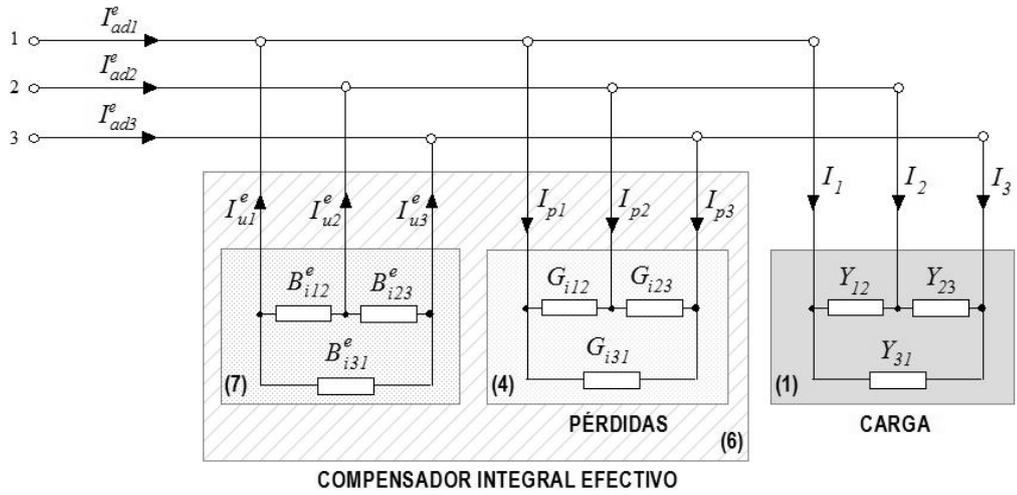
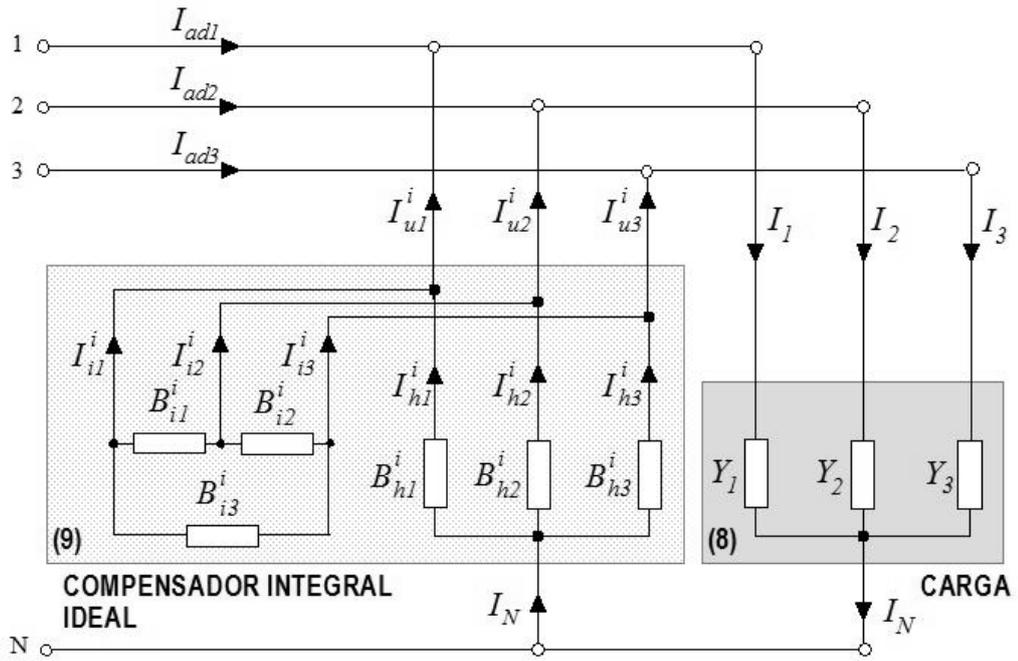


FIG. 3



**FIG. 4**



**FIG. 5**

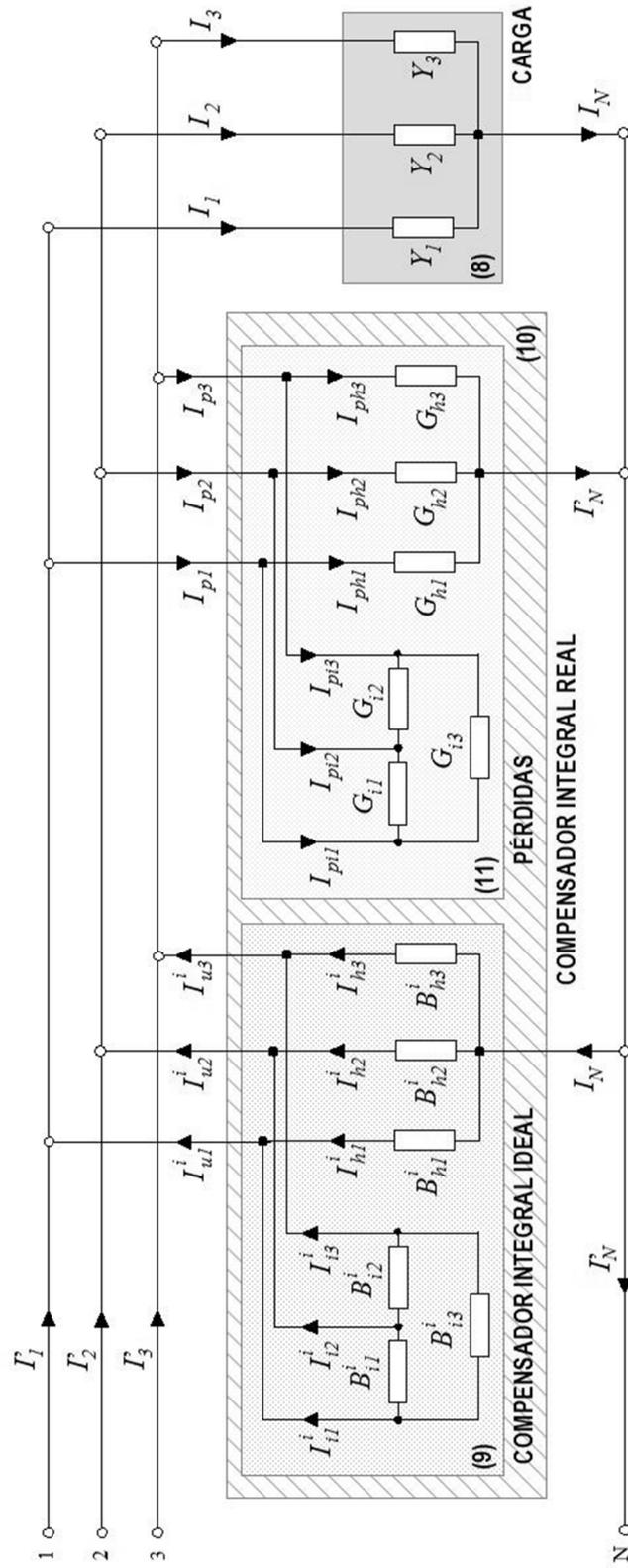


FIG. 6

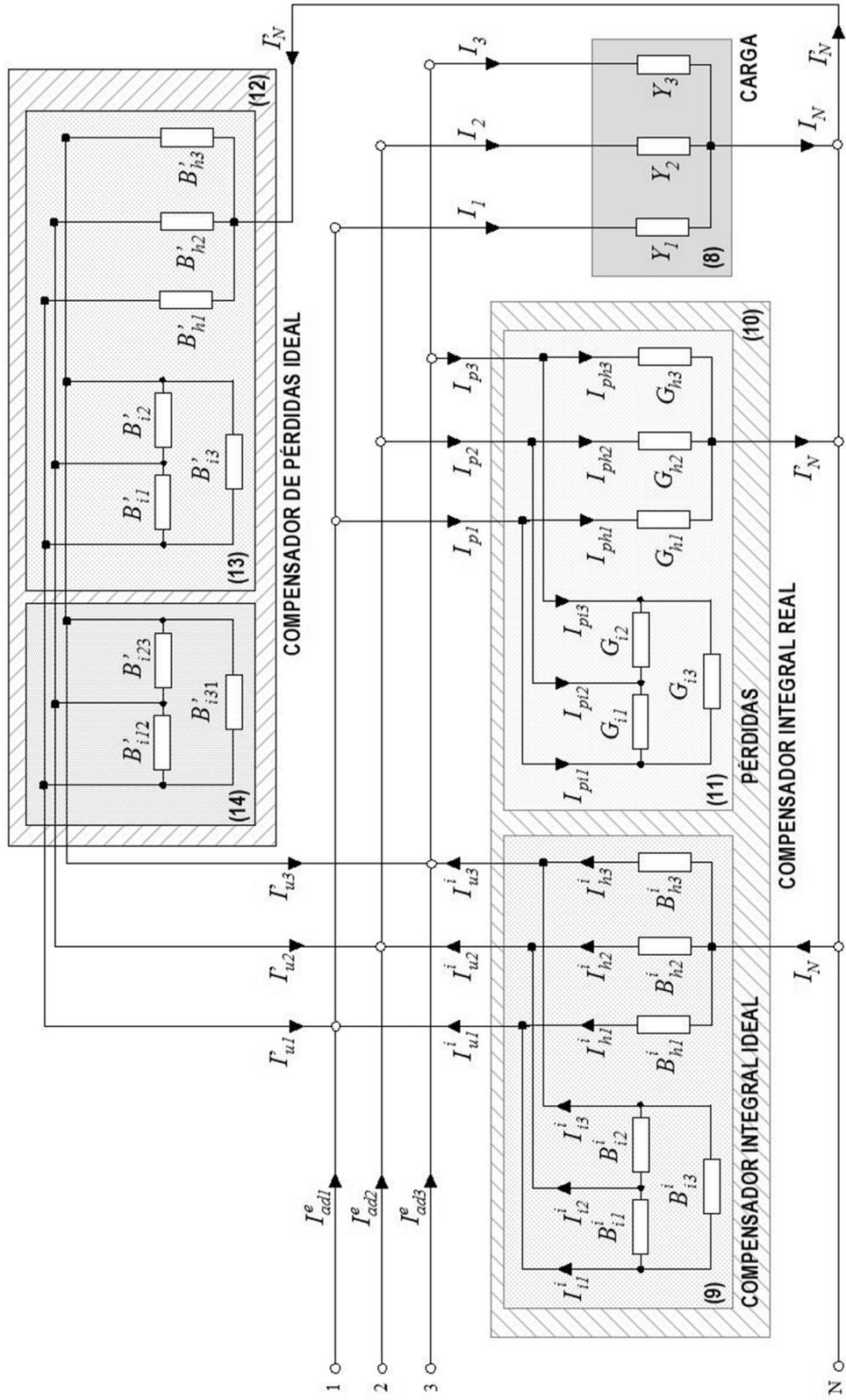


FIG. 7

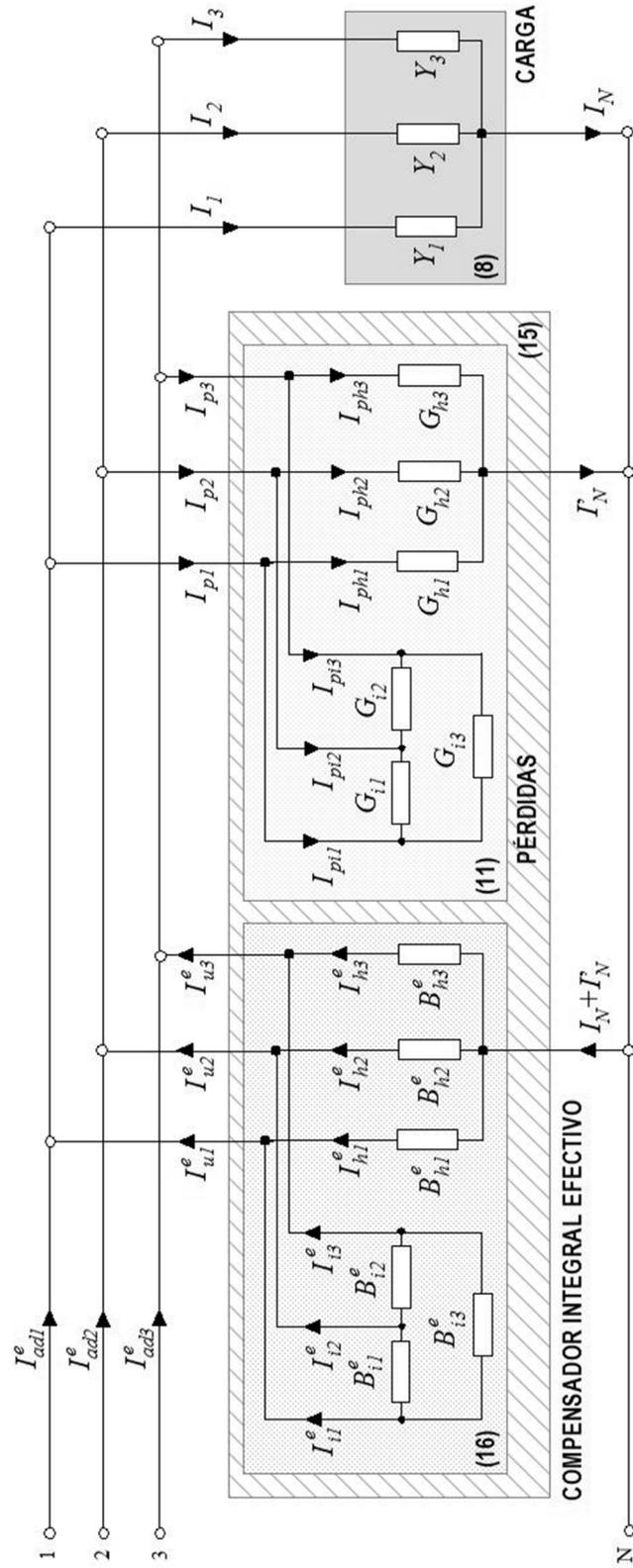


FIG. 8

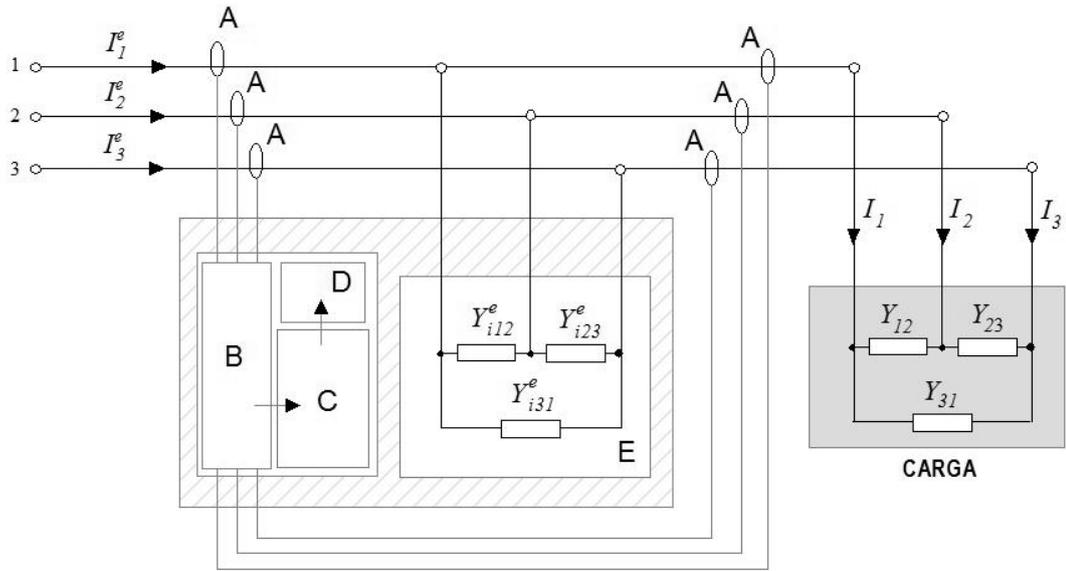


FIG. 9

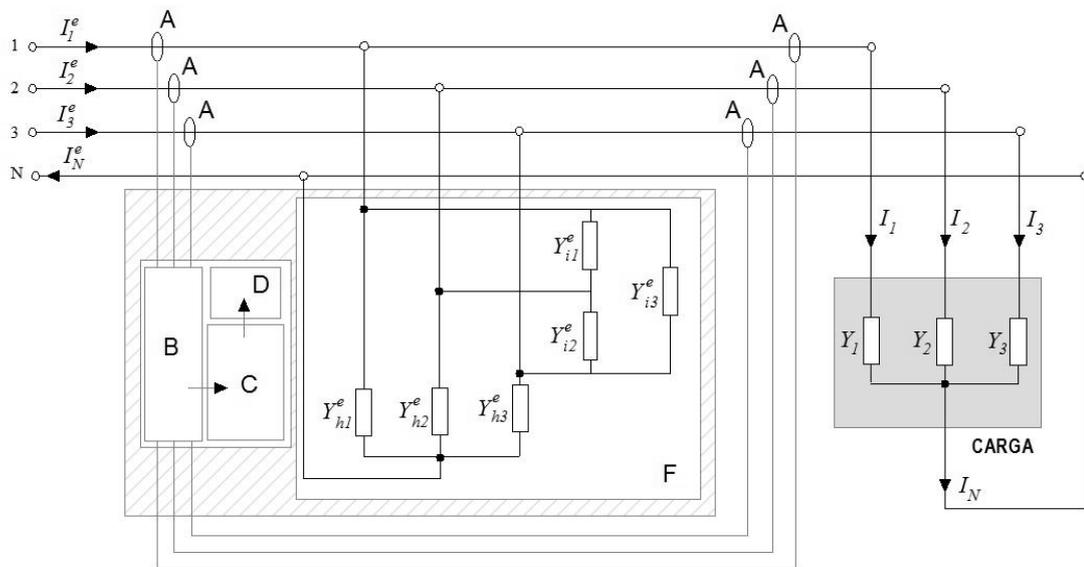


FIG. 10

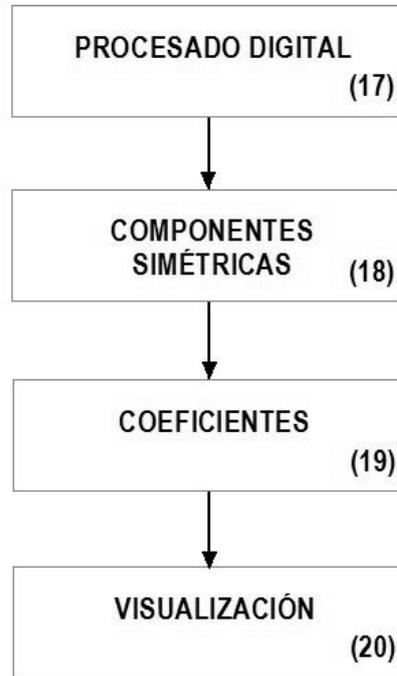


FIG. 11



- ②① N.º solicitud: 201830563  
②② Fecha de presentación de la solicitud: 08.06.2018  
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **H02J3/26** (2006.01)  
**H02J3/18** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	ES 2169651 A1 (UNIV POLITÉCNICA VALENCIA) 01/07/2002, Todo el documento.	1-14
A	DAS J C. "Passive Filters-Potentialities and Limitations" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 20040101 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US. , 01/01/2004, Vol. 40, Nº 1, Páginas 232 - 241 [en línea] [recuperado el 18/02/2019]., ISSN 0093-9994, <DOI: doi:10.1109/TIA.2003.821666>	1-14
A	LEON-MARTINEZ VICENTE et al. "Representation of load imbalances through reactances. Application to working standards" 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 20140525 IEEE. , 25/05/2014, Páginas 307 - 311 [en línea] [recuperado el 18/02/2019]., <DOI: doi:10.1109/ICHQP.2014.6842894>	1-14

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia  
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría  
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita  
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud  
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

**Fecha de realización del informe**  
20.02.2019

**Examinador**  
M. P. López Sábater

**Página**  
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

H02J

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, IEEE, Elsevier, internet