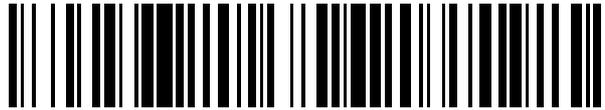


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 670 472**

21 Número de solicitud: 201631532

51 Int. Cl.:

**H02J 3/26** (2006.01)

**G01R 29/16** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**30.11.2016**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**30.05.2018**

Fecha de concesión:

**07.03.2019**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**14.03.2019**

73 Titular/es:

**POWER ELECTRONICS ESPAÑA, S.L. (100.0%)**  
**Avd. Leonardo Da Vinci, 24-26 Parque Tecnológico**  
**46980 PATERNA (Valencia) ES**

72 Inventor/es:

**SALVO LILLO, David;**  
**SALVO LILLO, Abelardo;**  
**POVEDA LERMA, Antonio;**  
**CAMPS SORIANO, José Luis y**  
**ANTÓN PONS, Marcial**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

54 Título: **MÉTODO DE EQUILIBRADO ELÉCTRICO EN UN SISTEMA TRIFÁSICO**

57 Resumen:

Método de equilibrado eléctrico en un sistema trifásico.

Se divulga un método de equilibrado eléctrico en un sistema trifásico. Los pasos son: obtener magnitud y fase de cada tensión simple de salida; alinear una primera tensión simple con el eje real; elegir dos tensiones y añadir una tercera tensión complejo conjugado de la mayor de las dos anteriores; calcular las secuencias directa, inversa y homopolar anular la secuencia inversa; calcular las secuencias directa y homopolar del nuevo sistema de tensiones simples; añadir secuencia directa y secuencia homopolar a la secuencia directa y a la secuencia homopolar calcular las nuevas tensiones simples a partir de la nueva tensión de secuencia directa y de la nueva tensión de secuencia homopolar con tensión de secuencia inversa igual a cero; repetir los dos pasos anteriores hasta que el módulo de la nueva tercera tensión simple sea igual al módulo de la tensión simple de salida descartada en el tercer paso.

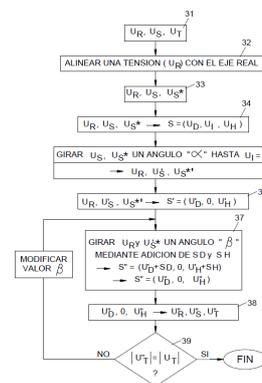


FIG. 11

## DESCRIPCIÓN

**MÉTODO DE EQUILIBRADO ELÉCTRICO EN UN SISTEMA TRIFÁSICO****CAMPO DE LA INVENCIÓN**

5 La presente invención se refiere a un método de equilibrado eléctrico aplicable a sistemas trifásicos.

El campo técnico de la invención se enmarca dentro del campo de los convertidores, generadores, transformadores, motores y cualquier otro tipo de sistema de potencia donde exista tensión/corriente trifásica.

10

**ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN**

Un convertidor de potencia n-fásico (o polifásico) basado en la topología *Multilevel Cascaded H-Bridge (MCHB)* se puede representar como un conjunto de generadores de tensión senoidales monofásicos en serie. Es decir, un convertidor de potencia trifásico tiene tres generadores de potencia monofásicos, donde cada generador de potencia está compuesto por varias celdas generadoras de potencia conectadas en serie. De esta forma, y en condiciones ideales, a la salida del convertidor se obtienen tres tensiones de la misma magnitud y con un desfase entre ellas de 120°.

15

20 En la situación anterior, se puede dar el caso de que una celda entre en modo fallo, y por tanto, la celda deja de generar potencia. Esto conlleva que el generador monofásico que contiene esa celda deja de producir potencia, obteniéndose así un fallo en el convertidor.

20

En el estado de la técnica, el problema antes indicado, es decir, cuando la celda falla, se resuelve colocando la celda de potencia en cortocircuito. En otras palabras, se realiza un "by-pass" de la celda en fallo. Esto se realiza mediante un sistema de control situado de manera que cada una de las celdas de potencia que mide la tensión de la celda a su salida y detecta cualquier variación de su tensión respecto de su tensión de trabajo habitual.

25

30 La solución del estado de la técnica anterior consigue que el convertidor de potencia siga generando potencia en caso de fallo de al menos una cualquiera de sus celdas, pero introduce un desequilibrio de tensión en la salida del convertidor.

30

Para resolver el problema de desequilibrio antes indicado, la solicitud de patente

con número de publicación US-A1-5,986,909 y título "*Multiphase power supply with plural series connected cells and failed cell bypass*" divulga una solución estática basada en medir la potencia de salida de las celdas y, en caso de fallo de una de ellas, poner la celda en cortocircuito y disminuir la potencia del resto de generadores monofásicos hasta igualar los módulos de las potencias a la salida. El equilibrado de las fases lo realiza según unas tablas previamente definidas.

La solución aportada por el documento anterior presenta varios inconvenientes. El primer inconveniente es que el equilibrado lo realiza de forma estática, es decir, en función de unas tablas pre-configuradas que en ningún caso pueden incluir todos los casos de fallos para todas las posibles potencias que pueden generar las celdas.

Otro inconveniente, resulta del hecho de que una vez se anula una celda, el número de niveles de tensión PWM (Pulse-Width Modulation) disponibles disminuye, por lo que el rizado de tensión de salida, es mayor en la fase afectada por el fallo. Esto se traduce en un mayor desequilibrio del que habría si las tensiones generadas en las celdas fuesen perfectamente senoidales en lugar de ser PWM.

Otro inconveniente resulta del hecho de que los transformadores multi-salida y en particular, los multi-pulso, por su propia construcción física, no tienen una impedancia igual en cada una de sus salidas, por lo que, dependiendo de la carga, e incluso a plena carga, las tensiones disponibles en cada celda son distintas y no se puede generar una tensión perfectamente equilibrada en las fases del convertidor.

Por tanto, sería deseable obtener un método de equilibrado (o balanceo) de los sistemas polifásicos que superase los problemas de la técnica mencionados y el equilibrado sea dinámico.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

En un aspecto de la invención, se divulga un método de equilibrado eléctrico en un sistema trifásico, donde el método comprende los siguientes pasos:

- i) obtener la magnitud y la fase de cada tensión simple de salida (R,S,T) del sistema trifásico formando un sistema de tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ); (si las magnitudes y las fases de las tres tensiones no son iguales se continua con el método, porque si fueran iguales, el sistema estaría equilibrado)
- ii) alinear una primera tensión simple con el eje real ( $U_R$ );

- iii) elegir la primera tensión simple ( $U_R$ ) previamente alienada con el eje real y una segunda tensión simple ( $U_S$ ) seleccionada de entre las dos tensiones simples restantes ( $U_S$ ,  $U_T$ ); y, añadir una tercera tensión simple ( $U_{S^*}$ ) que sea el complejo conjugado de la mayor ( $U_S$ ) de las dos anteriores ( $U_S$ ,  $U_T$ );
- 5 iv) calcular la tensión de secuencia directa ( $U_D$ ), la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_H$ ) del sistema de tensiones simples formado por la primera tensión simple, la segunda tensión simple y la tercera tensión simple ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_{S^*}$ );
- 10 v) añadir tensión de secuencia inversa de signo negativo ( $-U_I$ ) respecto a la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) antes calculada, mediante el giro de un ángulo " $\alpha$ " de la fase de la segunda tensión simple ( $U_S$ ) y mediante el giro en sentido opuesto al anterior de la fase de la tercera tensión simple ( $U_{S^*}$ ); obteniendo así un nuevo sistema tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_{S'}$ ,  $U_{S^{*}}$ ) (equilibrado en tensiones simples y compuestas) formado por la primera tensión simple
- 15 ( $U_R$ ), una nueva segunda tensión simple ( $U_{S'}$ ) igual en módulo a la segunda tensión simple ( $U_S$ ) pero desfasada un ángulo " $\alpha$ " y una nueva tercera tensión simple ( $U_{S^{*}}$ ) igual en módulo a la tercera tensión simple pero contra-desfasada un ángulo fase " $\alpha$ ";
- vi) calcular la tensión de secuencia directa ( $U_{D'}$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_{H'}$ ) del nuevo sistema de tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_{S'}$ ,  $U_{S^{*}}$ );
- 20 vii) añadir, de forma respectiva, tensión de secuencia directa (SD) y tensión de secuencia homopolar (SH) a la tensión de secuencia directa ( $U_{D'}$ ) y a la tensión de secuencia homopolar ( $U_{H'}$ ) previamente calculada girando la primera tensión simple ( $U_R$ ) un ángulo " $\beta$ " y girando la nueva segunda tensión simple ( $U_{S'}$ ) el mismo ángulo " $\beta$ " en sentido opuesto; obteniendo así una nueva tensión de secuencia directa ( $U_{D''}$ ) y una nueva tensión de secuencia homopolar ( $U_{H''}$ );
- 25 viii) calcular las nuevas tensiones simples ( $U_{R''}$ ,  $U_{S''}$ ,  $U_{T''}$ ) a partir de la nueva tensión de secuencia directa ( $U_{D''}$ ) y de la nueva tensión de secuencia homopolar ( $U_{H''}$ ) con tensión de secuencia inversa igual a cero (esto es así porque el sistema está equilibrado y por tanto no tiene tensión de secuencia
- 30 inversa);
- ix) repetir los pasos vii) y viii) hasta que el módulo de la nueva tercera tensión simple ( $U_{T''}$ ) sea igual al módulo de la tensión simple de salida descartada en

el paso iii) ( $U_T$ ); donde en cada iteración se modifica el valor del ángulo “ $\beta$ ” como una función de la diferencia entre los módulos de las tensiones anteriores ( $|U_T'| - |U_T|$ ).

En una forma de realización del primer aspecto de la invención, la tensión de secuencia directa ( $U_D$ ), la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_H$ ) de un sistema de tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) se calculan de la siguiente forma:

- $U_D = \frac{1}{3}(U_R + U_S a + U_T a^2)$
- $U_I = \frac{1}{3}(U_R + U_S a^2 + U_T a)$
- $U_H = \frac{1}{3}(U_R + U_S + U_T)$

donde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

En otra forma de realización del primer aspecto de la invención, la primera tensión simple ( $U_R$ ), la nueva segunda tensión simple ( $U_S'$ ), la nueva tercera tensión simple ( $U_S^{*'}$ ) y el ángulo “ $\alpha$ ” cumplen la siguiente relación:

$$(U_S' \cos(\alpha) + U_R) \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) = U_S' \sin(\alpha)$$

$$U_S^{*'} = \text{conj}(U_S')$$

En otra forma de realización del primer aspecto de la invención, una primera tensión simple ( $U_R$ ), una segunda tensión simple ( $U_S$ ) y una tercera tensión simple ( $U_T$ ) se obtienen a partir de unas tensiones de secuencia directa ( $U_D$ ), inversa ( $U_I$ ) y homopolar ( $U_H$ ):

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_D \\ U_I \\ U_H \end{bmatrix}$$

donde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

En otra forma de realización del primer aspecto de la invención, la tensión de secuencia directa (SD) y la tensión de secuencia homopolar (SH) que se añade en el paso vii) se calcula de la siguiente forma:

$$U_R + SD_R + SH_R = U_R''$$

$$U_S' + SD_S + SH_S = U_S''$$

donde:

$$SD_R = SD_{RX} + jSD_{RY}$$

$$SH_R = SH_S = SH = SH_X + jSH_Y$$

y,

$$\begin{pmatrix} SD_{RX} \\ SD_{RY} \\ SH_X \\ SH_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{real}(U_R) \\ \text{imag}(U_R) \\ \text{real}(U'_S) \\ \text{imag}(U'_S) \\ \text{real}(U''_R) \\ \text{imag}(U''_R) \\ \text{real}(U'_S) \\ \text{imag}(U'_S) \end{pmatrix}$$

donde

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix}$$

En otra forma de realización del primer aspecto de la invención, el método  
5 adicionalmente comprende calcular unas tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) a partir de las tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) mediante la resta de tensiones simples dos a dos:

$$U_{RS} = U_S - U_R;$$

$$U_{ST} = U_T - U_S;$$

10

$$U_{TR} = U_R - U_T;$$

En otra forma de realización del primer aspecto de la invención, el método  
adicionalmente comprende calcular unas tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) a partir de  
las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) mediante los siguientes sub-pasos:

- calcular el sistema de tensiones compuestas ( $U_{CD}$ ,  $U_{CI}$ ,  $U_{CH}$ ) formado por la  
15 tensión compuesta de secuencia directa ( $U_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U_{CH}$ ), asociadas a las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ):

$$\circ \begin{bmatrix} U_{CD} \\ U_{CI} \\ U_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{RS} \\ U_{ST} \\ U_{TR} \end{bmatrix}$$

$$\circ \text{siendo } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

20

- calcular el ángulo " $\alpha$ " de la secuencia directa y restarle  $\pi/6$ :

- $\alpha = \text{angle}(U_{CD}) - \frac{\pi}{6}$
- siendo:  $\text{angle}(U_{CD}) = \text{atan2}\left(\frac{\text{imag}(U_{CD})}{\text{real}(U_{CD})}\right)$

- girar en sentido antihorario el sistema formado por las tensiones compuestas el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

5

- $U'_{RS} = |U_{RS}|e^{j[\text{angle}(U_{RS})-\alpha]}$
- $U'_{ST} = |U_{ST}|e^{j[\text{angle}(U_{ST})-\alpha]}$
- $U'_{TR} = |U_{TR}|e^{j[\text{angle}(U_{TR})-\alpha]}$

- calcular la tensión compuesta de secuencia directa ( $U'_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U'_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U'_{CH}$ ) del sistema de tensiones compuestas girado:

10

- $$\begin{bmatrix} U'_{CD} \\ U'_{CI} \\ U'_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_{RS} \\ U'_{ST} \\ U'_{TR} \end{bmatrix}$$

- obtener el sistema formado por las tensiones simples ( $U'_R, U'_S, U'_T$ ) a partir del sistema de tensiones compuestas ( $U'_D, U'_I, U'_H$ ):

- $$\begin{bmatrix} U'_R \\ U'_S \\ U'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_D \\ U'_I \\ U'_H \end{bmatrix}$$

15

aprovechando las propiedades:

$$U'_D = U'_{CD}\varepsilon^{-1}$$

$$U'_I = U'_{CI}\varepsilon^{*-1}$$

$$U'_H = U'_I^*$$

siendo:

$$\varepsilon = -\frac{1}{2}(3 + j\sqrt{3}); \varepsilon^* = -\frac{1}{2}(3 - j\sqrt{3}).$$

- girar en sentido horario el sistema formado por las tensiones simples el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

20

- $U_R = |U'_R|e^{j[\text{angle}(U'_R)-\alpha]}$
- $U_S = |U'_S|e^{j[\text{angle}(U'_S)-\alpha]}$
- $U_T = |U'_T|e^{j[\text{angle}(U'_T)-\alpha]}$

25 El método de equilibrado aquí divulgado es dinámico ya que tiene en consideración el estado real del sistema trifásico, lo equilibra en base a ese estado real y no en base a otro tipo de consideraciones tales como las tablas presente-configuradas del estado de la técnica.

En un segundo aspecto de la invención, se divulga un método de conversión de tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) a tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) que comprende los siguientes pasos:

- 5 • calcular el sistema de tensiones compuestas ( $U_{CD}$ ,  $U_{CI}$ ,  $U_{CH}$ ) formado por la tensión compuesta de secuencia directa ( $U_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U_{CH}$ ), asociadas a las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ):

$$\circ \begin{bmatrix} U_{CD} \\ U_{CI} \\ U_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{RS} \\ U_{ST} \\ U_{TR} \end{bmatrix}$$

$$\circ \text{siendo } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

- 10 • calcular el ángulo “ $\alpha$ ” de la secuencia directa y restarle  $\pi/6$ :

$$\circ \alpha = \text{angle}(U_{CD}) - \frac{\pi}{6}$$

$$\circ \text{siendo: } \text{angle}(U_{CD}) = \text{atan2}\left(\frac{\text{imag}(U_{CD})}{\text{real}(U_{CD})}\right)$$

- girar en sentido antihorario el sistema formado por las tensiones compuestas el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

$$15 \quad \begin{aligned} \circ U'_{RS} &= |U_{RS}| e^{j[\text{angle}(U_{RS}) - \alpha]} \\ \circ U'_{ST} &= |U_{ST}| e^{j[\text{angle}(U_{ST}) - \alpha]} \\ \circ U'_{TR} &= |U_{TR}| e^{j[\text{angle}(U_{TR}) - \alpha]} \end{aligned}$$

- 20 • calcular la tensión compuesta de secuencia directa ( $U'_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U'_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U'_{CH}$ ) del sistema de tensiones compuestas girado:

$$\circ \begin{bmatrix} U'_{CD} \\ U'_{CI} \\ U'_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_{RS} \\ U'_{ST} \\ U'_{TR} \end{bmatrix}$$

- obtener el sistema formado por las tensiones simples ( $U'_R$ ,  $U'_S$ ,  $U'_T$ ) a partir del sistema de tensiones compuestas ( $U'_D$ ,  $U'_I$ ,  $U'_H$ ):

$$25 \quad \circ \begin{bmatrix} U'_R \\ U'_S \\ U'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_D \\ U'_I \\ U'_H \end{bmatrix}$$

aprovechando las propiedades:

$$U'_D = U'_{CD} \varepsilon^{-1}$$

$$U'_I = U'_{CI} \varepsilon^{*-1}$$

$$U'_H = U'_I^*$$

siendo:

$$\varepsilon = -\frac{1}{2}(3 + j\sqrt{3}); \varepsilon^* = -\frac{1}{2}(3 - j\sqrt{3}).$$

- girar en sentido horario el sistema formado por las tensiones simples el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

5

- $U_R = |U'_R|e^{j[\text{angle}(U'_R)-\alpha]}$
- $U_S = |U'_S|e^{j[\text{angle}(U'_S)-\alpha]}$
- $U_T = |U'_T|e^{j[\text{angle}(U'_T)-\alpha]}$

10 Generalmente, a la salida de los sistemas trifásicos lo que se puede medir de forma directa son las tensiones compuestas. Este segundo aspecto de la invención es complementario del primer aspecto de la invención pero también podría ser usado de forma independiente.

En un tercer aspecto de la invención, se divulga un sistema trifásico que comprende el método de equilibrado eléctrico definido en el primer aspecto de la invención.

15 En un cuarto aspecto de la invención, se divulga un sistema trifásico que comprende el método de equilibrado eléctrico definido en el segundo aspecto de la invención.

En una forma de realización del tercer aspecto de la invención, el sistema trifásico comprende:

- 20
- una salida de potencia trifásica (R,S,T);
  - celdas de potencia conectadas en cascada por cada línea de potencia;
  - una tarjeta de control por cada celda de potencia, la cual está configurada para medir la tensión suministrada por la celda a la que está asociada y modificar la tensión de la misma;
- 25
- un equipo de control conectado con cada tarjeta de control y con la salida de potencia trifásica (R,S,T) para obtener la magnitud y la fase de cada tensión simple ( $U_R, U_S, U_T$ );

30 de tal forma que el equipo de control modifica la magnitud y la fase de la tensión de cada celda mediante cada tarjeta de control hasta que la salida del sistema trifásico alcanza las nuevas tensiones simples ( $U_R'', U_S'', U_T''$ ).

En otra realización del tercer aspecto de la invención, la celda de potencia adicionalmente comprende un circuito de bypass, donde el circuito de by-pass se cierra cuando recibe una instrucción de cierre de la tarjeta de control.

5 BREVE DESCRIPCION DE LAS FIGURAS

Figura 1.- Variador de media tensión que comprende un equipo de control donde está implementado el método de equilibrado de tensiones de la presente invención.

Figura 2.- Celda de potencia comprendida en el variador de media tensión.

Figura 3.- Representación de un variador de cinco celdas en fase y fallo en tres  
10 celdas (celdas C4, C5 y B5 que no se muestran en la figura por estar en fallo).

Figura 4.- Variador de media tensión con desequilibrios provocados por la desigualdad de las celdas de potencia en su fabricación.

Figura 5.- Descomposición de un sistema desequilibrado en sus secuencias directa, inversa y homopolar.

15 Figura 6.- Descomposición vectorial de la Secuencia Directa "SD".

Figura 7.- Descomposición vectorial de la Secuencia Inversa "SI".

Figura 8.- Descomposición vectorial de la Secuencia Inversa "SI" transformada a sentido anti-horario.

Figura 9.- Descomposición vectorial de la Secuencia Inversa "SI" en un sistema  
20 vectorial equivalente al de la figura 8.

Figura 10.- Descomposición vectorial de la Secuencia Homopolar "SH".

Figura 11.- Diagrama de flujo del método de equilibrado eléctrico en sistemas trifásicos.

Figura 12.- Representación vectorial de las tensiones simples de salida de un  
25 variador de potencia desequilibrado con alineamiento de una tensión de salida en el eje real.

Figura 13.- Representación vectorial de las tensiones de salida donde una de ellas es la complejo conjugada de la otra.

Figura 14.- Representación vectorial de las tensiones de salida compuestas en  
30 equilibrio donde se cumple la condición de secuencia inversa anulada.

Figura 15.- Representación vectorial de las tensiones de salida compuestas en equilibrio donde se cumple la condición del parada del método.

### REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

A continuación con carácter ilustrativo y no limitativo se describe un ejemplo de realización de la invención.

Para el ejemplo de realización, la figura 1 muestra la topología de un variador de media tensión **1** cuya salida trifásica (R,S,T) está conectada a un motor **7**. El variador de media tensión **1** comprende un transformador rectificador de cambio de fase **2**,  
5 unas celdas de potencia **3** conectadas en cascada, una tarjeta de control **4**, un equipo de control **6** y un circuito de bypass **5**. La tarjeta de control **4** es la encargada de medir la tensión suministrada por la celda a la que está asociada y detectar, si lo hubiere, un fallo en la celda. La tarjeta de control **4** se comunica con el equipo de control **6**. El  
10 equipo de control **6** puede dar instrucciones a la tarjeta de control **4** para cerrar el circuito de by-pass **5** en caso de fallo de la celda de potencia. Alternativamente, la tarjeta de control **4** puede cerrar el circuito de by-pass **5** de forma automática cuando la tarjeta **4** detecte un fallo en la celda de potencia **3**. El equipo de control **6** tiene  
15 implementado el método de equilibrado de tensiones (o corrientes) de tal forma que actuando sobre cada una de las celdas de potencia, la salida de potencia del variador **1** se encuentra equilibrada. La actuación del equipo de control **6** sobre cada celda de potencia **3** se realiza mediante la modificación de la magnitud y la fase de la tensión o la corriente de cada una de las celdas de potencia de forma independiente según el  
20 método de la presente invención. Como se describe a continuación, el método de la presente invención permite obtener una salida de potencia totalmente equilibrada en tensiones o corrientes compuestas tanto si hay un fallo en alguna de las celdas de potencia como si existen variaciones de potencia en alguna de las celdas de potencia debidas a diferencias estructurales en la fabricación de las mismas y/o en el suministro  
25 de voltaje/corriente que reciben las celdas de potencia.

La celda de potencia **3** se muestra en la figura **2**. La celda de potencia **3** consiste en un circuito inversor mono-polar básico AC-DC-AC. La celda tiene tres entradas **8** de corriente alterna **L1,L2,L3**, que se conectan a un puente rectificador **9**, que es un puente de diodos. El puente rectificador **9** se conecta a un bus de continua **10**, y éste a  
30 un puente inversor **11**. A la salida del puente inversor se coloca el circuito de bypass **5**. El puente inversor está compuesto por IGBT's que generan ondas monofásicas de tensión PWM.

En caso de fallo de una o varias celdas, el circuito de bypass **5**, se cierra, creando un camino de corriente alternativo que permite al variador **1** seguir funcionando. La salida sería un sistema desequilibrado, tal y como se muestra en la figura 3. En este caso, la figura 3 muestra la salida de un variador de cinco celdas en fase y fallo en tres celdas (celdas C4, C5 y B5 que no se muestran en la figura por estar en fallo).

También, se pueden dar las circunstancias en las que las celdas no entreguen la misma tensión (o corriente), lo cual genera desequilibrios a la salida del variador de media tensión **1**. Este tipo de desequilibrios pueden dar lugar a situaciones como las representadas en la figura 4. De igual forma que para el caso de fallo de celda de potencia, la tarjeta de control **4** detecta las variaciones de potencia de la celda a la que está asociada porque realiza una medición continua de la potencia de la celda de potencia.

Conviene recordar que las tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) del variador **1** son el resultado de la suma de cada una de las celdas de la fase correspondiente (R, S, T; también se pueden encontrar en el estado de la técnica como U, V, W). Para obtener las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) en un sistema eléctrico trifásico, simplemente hay que restar 2 a 2 las tensiones simples ( $U_{RS} = U_S - U_R$ ;  $U_{ST} = U_T - U_S$ ;  $U_{TR} = U_R - U_T$ ). Medir las tensiones compuestas a la salida de un transformador es fácil y conocido en el estado de la técnica. Sin embargo, obtener las tensiones simples a partir de las tensiones compuestas no es conocido en el estado de la técnica. En la presente divulgación, se menciona de forma indistinta tensiones compuestas o sistema de tensiones compuestas como el conjunto de las tensiones compuestas, siendo esta última la preferida para su representación gráfica como vectores (fasores) de las tensiones compuestas.

Una vez recordado lo anterior, hay que tener en cuenta que cualquier sistema (variador, convertidor, etc.) que tenga una celda de potencia en fallo, tendrá desbalanceadas tanto sus tensiones simples como sus tensiones compuestas.

Antes de entrar en detalle sobre el método de la presente invención, conviene recordar ciertos conceptos. El teorema de Fortescue o método de las componentes simétricas permite escribir de forma general un sistema polifásico desbalanceado en régimen permanente (con n fases) como la suma de "n" sistemas equilibrados aplicando el principio de superposición.

En particular, un sistema eléctrico trifásico desbalanceado en régimen permanente, puede descomponerse en un sistema trifásico equilibrado de secuencia directa más un sistema trifásico equilibrado de secuencia inversa más un sistema de secuencia homopolar, ver figura 5.

5 La Secuencia Directa ( $\vec{D}$ ), o “SD”, es un sistema senoidal trifásico equilibrado de tensiones (o corrientes) de la misma amplitud pero decalados en el tiempo y en el espacio 120° eléctricos en sentido antihorario, ver figura 6.

El sistema eléctrico temporal, se puede expresar como un vector de tres componentes:

10 
$$\vec{U}_D(t) = [U_{DR}(t), U_{DS}(t), U_{DT}(t)]$$

Cada componente del sistema se puede expresar a su vez como un fasor temporal que gira en el espacio en sentido antihorario:

15 
$$\begin{aligned} \vec{U}_{DR} &= U_D e^{j\omega t} & \rightarrow U_{DR}(t) &= \text{Re}(\vec{U}_{DR}) \\ \vec{U}_{DS} &= U_D e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})} & \rightarrow U_{DS}(t) &= \text{Re}(\vec{U}_{DS}) \\ \vec{U}_{DT} &= U_D e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})} & \rightarrow U_{DT}(t) &= \text{Re}(\vec{U}_{DT}) \end{aligned}$$

Otra forma más compacta de representar el sistema eléctrico trifásico es mediante su vector espacial. Para obtenerlo, basta situar las magnitudes temporales (no sus fasores) sobre cada eje espacial y sumarlas:

20 
$$\begin{aligned} \vec{U}_{DR} &= U_{DR} e^{j0} = U_D \text{Re}(e^{j\omega t}) e^{j0} \\ \vec{U}_{DS} &= U_{DS} e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_D \text{Re}\left(e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}\right) e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \vec{U}_{DT} &= U_{DT} e^{j\frac{4\pi}{3}} = U_D \text{Re}\left(e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})}\right) e^{j\frac{4\pi}{3}}. \end{aligned}$$

$$\vec{D} = U_D \sum_{k=0}^2 \text{Re}\left[e^{j(\omega t + k\frac{2\pi}{3})}\right] e^{jk\frac{2\pi}{3}} = \frac{3}{2} U_D e^{j\omega t}$$

25 La Secuencia Inversa ( $\vec{I}$ ), o “SI”, es un sistema senoidal trifásico equilibrado de tensiones (o corrientes) de la misma amplitud pero decalados en el tiempo y en el espacio 120° eléctricos en sentido horario, ver figura 7. Dado que la función coseno es par, el sistema de tensiones mostrado en la figura 7 es equivalente a un sistema cuyos fasores temporales giren en sentido antihorario (en secuencia directa) de la siguiente manera (ver figura 8):

$$\left. \begin{aligned} \vec{U}_{ir}'' &= U_i e^{-j\omega t} \\ \vec{U}_{is}'' &= U_i e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})} \\ \vec{U}_{it}'' &= U_i e^{-j(\omega t + \frac{4\pi}{3})} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} \vec{U}_{ir}' &= U_i e^{j\omega t} \\ \vec{U}_{is}' &= U_i e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3})} \\ \vec{U}_{it}' &= U_i e^{j(\omega t + \frac{4\pi}{3})} \end{aligned} \right.$$

5 Este último sistema equivalente al anterior, también tiene otro equivalente (figura 9):

$$10 \left. \begin{aligned} \overline{U}_{ir}'' &= U_i e^{-j\omega t} \\ \overline{U}_{is}'' &= U_i e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})} \\ \overline{U}_{it}'' &= U_i e^{-j(\omega t + \frac{4\pi}{3})} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} \overline{U}_{ir}' &= U_i e^{j\omega t} \\ \overline{U}_{is}' &= U_i e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3})} \\ \overline{U}_{it}' &= U_i e^{j(\omega t + \frac{4\pi}{3})} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} \overline{U}_{ir} &= U_i e^{j\omega t} \\ \overline{U}_{is} &= U_i e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})} \\ \overline{U}_{it} &= U_i e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})} \end{aligned} \right.$$

Aunque la dirección de giro de los fasores temporales cambia, la del fasor espacial asociado no cambia:

$$15 \begin{aligned} \overline{U}_{IR} &= U_{ir} e^{j0} = U_i \operatorname{Re}(e^{j\omega t}) e^{j0} \\ \overline{U}_{IS} &= U_{is} e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_i \operatorname{Re}\left(e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})}\right) e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \overline{U}_{IT} &= U_{it} e^{j\frac{2\pi}{3}} = U_i \operatorname{Re}\left(e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}\right) e^{j\frac{4\pi}{3}}. \end{aligned}$$

$$\vec{I} = U_i \sum_{k=0}^2 \operatorname{Re}\left[e^{j(\omega t - k\frac{4\pi}{n})}\right] e^{jk\frac{2\pi}{n}} = U_i \sum_{k=0}^2 \operatorname{Re}\left[e^{j(\omega t + k\frac{2\pi}{n})}\right] e^{jk\frac{2\pi}{n}} = \frac{3}{2} U_i e^{-j\omega t}$$

20 La Secuencia cero u Homopolar ( $\vec{H}$ ), o "SH", es un sistema de tres tensiones (o corrientes) senoidales equilibrado de la misma amplitud y fase y situados en el mismo lugar en el espacio, ver figura 10.

El sistema eléctrico temporal, se puede expresar como un vector de tres componentes:

$$\overline{U}_H(t) = [U_{hr}(t), U_{hs}(t), U_{ht}(t)]$$

25 Cada componente del sistema se puede expresar a su vez como un fasor temporal que gira en el espacio en sentido antihorario:

$$\begin{aligned} \overline{U}_{hr} &= U_h e^{j\omega t} & \rightarrow U_{hr}(t) &= \operatorname{Re}(\overline{U}_{hr}) \\ \overline{U}_{hs} &= U_h e^{j\omega t} & \rightarrow U_{hs}(t) &= \operatorname{Re}(\overline{U}_{hs}) \end{aligned}$$

$$\overrightarrow{U_{ht}} = U_h e^{j\omega t} \rightarrow U_{ht}(t) = \text{Re}(\overrightarrow{U_{ht}})$$

En el caso de la secuencia cero u homopolar, no es posible obtener un vector espacial asociado, ya que los vectores espaciales representan exclusivamente sistemas polifásicos complejos.

Por tanto, un sistema eléctrico de tensiones desequilibrado, puede descomponerse en las siguientes secuencias: directa, inversa y homopolar:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_i \\ U_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_r \\ U_s \\ U_t \end{bmatrix}$$

$$U_d = \frac{1}{3}(U_r + U_s a + U_t a^2)$$

$$U_i = \frac{1}{3}(U_r + U_s a^2 + U_t a)$$

$$U_h = \frac{1}{3}(U_r + U_s + U_t)$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

10

Si al sistema original de tensiones, se le resta la tensión de secuencia inversa  $U_i$  obtenida de la expresión anterior, el nuevo sistema de tensiones no tendrá secuencia inversa y por tanto, se podrá escribir de la forma:

$$\begin{bmatrix} U_r \\ U_s \\ U_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ 0 \\ U_h \end{bmatrix}$$

15

$$\begin{bmatrix} U_r' \\ U_s' \\ U_t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ 0 \\ U_h \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_r + U_s a + U_t a^2 \\ 0 \\ U_r + U_s + U_t \end{bmatrix}$$

$$U_r' = \frac{1}{3}[(U_r + U_s a + U_t a^2) + (U_r + U_s + U_t)]$$

$$U_s' = \frac{1}{3}[a^2(U_r + U_s a + U_t a^2) + (U_r + U_s + U_t)]$$

$$U_t' = \frac{1}{3}[a(U_r + U_s a + U_t a^2) + (U_r + U_s + U_t)]$$

Operando:

$$U_r' = \frac{1}{3}[2U_r + U_s(1 + a) + U_t(1 + a^2)]$$

$$U_s' = \frac{1}{3}[U_r(1 + a^2) + U_s(1 + a^3) + U_t(1 + a^4)]$$

$$U_t' = \frac{1}{3}[U_r(1 + a) + U_s(1 + a^2) + U_t(1 + a^3)]$$

Recordando que:

$$\begin{aligned} 1 + a + a^2 &= 0 \\ 1 + a^3 + a^3 &= 3 \end{aligned}$$

5

$$U_r' = \frac{1}{3}[2U_r - U_s a^2 - U_t a]$$

$$U_s' = \frac{1}{3}[-U_r a + 2U_s - U_t a^2]$$

$$U_t' = \frac{1}{3}[-U_r a^2 - U_s a + 2U_t]$$

10

$$\left\{ \begin{array}{l} U_r' = \frac{1}{3}[2U_r - U_t a - U_s a^2] \\ U_s' = \frac{1}{3}[2U_s - U_r a - U_t a^2] \\ U_t' = \frac{1}{3}[2U_t - U_s a - U_r a^2] \end{array} \right\}$$

15

Este sistema formado por las tensiones ( $U_R'$ ,  $U_S'$ ,  $U_T'$ ) también está desequilibrado en tensiones simples pero no en tensiones compuestas. Además, no contiene secuencia inversa, pues así ha sido forzado.

20

El método hasta aquí descrito basado en la cancelación de la secuencia inversa presenta desventajas como que las nuevas tensiones simples ( $U_R'$ ,  $U_S'$ ,  $U_T'$ ) sean superiores a las tensiones simples disponibles ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ), lo cual no sería posible de llevar a cabo o que sean inferiores a las mismas, lo cual disminuiría el rendimiento del sistema trifásico.

25

La figura 11 representa un diagrama de flujo del método de equilibrado eléctrico para un sistema trifásico que, para el presente ejemplo de realización, es el variador de media tensión **1** mostrado en la figura 1. Este método permite equilibrar el sistema trifásico en tensiones (o corrientes) compuestas utilizando el 100% de las tensiones simples disponibles.

Paso 1 (figura 11; **31**) - Se parte del conocimiento de la amplitud y la fase de las tres tensiones simples ( $U_R, U_S, U_T$ ) de salida del variador. Si no es posible obtener las tensiones simples ( $U_R, U_S, U_T$ ), pero sí las tensiones compuestas ( $U_{RS}, U_{ST}, U_{TR}$ ), se aplica la conversión de tensiones compuestas a simples que se detalla más adelante.

5 El método de la presente invención, parte de la construcción de un sistema equilibrado cualquiera de tensiones compuestas a partir de las tensiones simples existentes y va añadiendo (sumando ó restando) de forma progresiva tensión de secuencia directa y tensión de secuencia homopolar hasta obtener la tensión máxima posible. El método garantiza el equilibrado de las tensiones compuestas que es lo que  
10 “ve” la carga (motor 7) conectada al variador 1. Los siguientes pasos del método son como a continuación se describe.

Paso 2 (figura 11; **32**) - Dado un sistema eléctrico de tensiones (o corrientes) desequilibrado, se alinea una de sus tensiones ( $U_R$ ) con el eje real (ver figura 12).

Paso 3 (figura 11; **33**) - Se elige dos de las tensiones simples disponibles  
15 (cualesquiera)  $U_R, U_S$  incluyendo la tensión simple del paso 2 ( $U_R$ ):  $U_R, U_S$  y se añade una tercera tensión  $U_S^*$  que sea el complejo conjugado de la mayor de las dos anteriores (ver figura 13).

Paso 4 (figura 11; **34**) - Se calcula el sistema formado por las componentes simétricas -S- (tensión de secuencia directa  $U_D$ , tensión de secuencia inversa  $U_I$  y  
20 tensión de secuencia homopolar  $U_H$ ):  $S = (U_D, U_I, U_H)$  de las tensiones simples ( $U_R, U_S, U_S^*$ ) del paso 3:

- $U_D = \frac{1}{3}(U_R + U_S a + U_S^* a^2)$
- $U_I = \frac{1}{3}(U_R + U_S a^2 + U_S^* a)$
- $U_H = \frac{1}{3}(U_R + U_S + U_S^*)$

25 donde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

Paso 5 (figura 11; **35**) - Se resta a este sistema -S- secuencia inversa “SI” (tensión de secuencia inversa  $U_I$ ) hasta construir un sistema trifásico -S’- sin secuencia inversa ( $U_I = 0$ ) pero manteniendo el módulo de los vectores originales (ver figura 14):

$$\begin{aligned} |U_S| &= |U_S'| \\ |U_S^*| &= |U_S^*| \end{aligned}$$

$$S' = (U_D', 0, U_H')$$

30

Para obtener los vectores  $U_S'$ ,  $U_{S'}^*$  de forma inmediata, se giran ambos vectores un ángulo  $\alpha$  con la intención de mantener el módulo hasta que los extremos de los tres vectores formen un triángulo equilátero:

$$\begin{aligned} (U_S' \cos(\alpha) + U_R) \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) &= U_S' \sin(\alpha) \\ U_{S'}^* &= \text{conj}(U_S') \end{aligned}$$

- 5 El triángulo equilátero, mostrado en la figura 14, está formado por las tensiones compuestas ( $U_{RS'}$ ,  $U_{SR}$ ,  $U_{S'S}$ ) del sistema trifásico -S'. Por tanto, la figura 14 ya muestra un sistema equilibrado en tensiones compuestas, aunque desequilibrado en tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S'$ ,  $U_{S'}^*$ ). Pero este sistema -S' no está maximizado puesto que la tensión  $U_{S'}^*$  es menor que la tensión original disponible ( $U_T$ ),  $U_R$  sigue siendo la original en magnitud y fase, y  $U_S'$  es igual en magnitud a la tensión original  $U_S$  aunque distinta en fase.

Paso 6 (figura 11; **36**) – se calcula la nueva tensión de secuencia directa ( $U_D'$ ) y la nueva tensión de secuencia homopolar ( $U_H'$ ) del nuevo sistema de tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S'$ ,  $U_{S'}^*$ );

- 15 El sistema así formado no tiene secuencia inversa y su tensión de secuencia directa y su tensión de secuencia homopolar se obtiene a partir de:

$$\begin{bmatrix} U_D' \\ 0 \\ U_H' \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ U_S' \\ U_{S'}^* \end{bmatrix}$$

- 20 Con el siguiente paso se consigue optimizar el sistema trifásico ya que se modifican todas fases de las tres tensiones ( $U_R$ ,  $U_S'$ ,  $U_{S'}^*$ ) incrementando la magnitud de  $U_{S'}^*$  hasta alcanzar  $U_T$  y manteniendo las magnitudes de las tensiones  $U_R$ ,  $U_S'$ .

Paso 7 (figura 11; **37**) -Se añade, de forma progresiva, una pareja de sistemas de secuencia directa SD (tensión de secuencia directa) y homopolar SH (tensión de secuencia homopolar) al sistema -S' obteniendo así el sistema S'':

$$S'' = (U_D' + SD, 0, U_H' + SH)$$

- 25 de modo que el módulo de las tensiones  $U_R$ ,  $U_S'$  permanezca constante. Haciendo esto, el sistema de tensiones compuestas resultante irá incrementando su tamaño sin desequilibrarse.

Paso 8 (figura 11; **38**) Se calculan las tensiones simples ( $U_R''$ ,  $U_S''$ ,  $U_T''$ ) asociadas al sistema S". Por tanto,  $U_R''$ ,  $U_S''$  son iguales en magnitud a  $U_R$ ,  $U_S'$ , respectivamente, aunque distintas en fase.

Paso 9 (figura 11; **39**) – Se compara el módulo de la tercera tensión simple ( $U_T''$ ) calculada en el paso 8 con el módulo de la tensión simple descartada en el paso 3 (ver figura 15):

$$|U_T''| = |U_t|.$$

Si ambos módulos son iguales, el método finaliza y las tensiones compuestas de equilibrio son  $U_R''$ ,  $U_S''$ ,  $U_T''$ .

10 Si ambos módulos son diferentes, se repiten los pasos 7 y 8 modificando las tensiones de secuencia directa (SD) y homopolar (SH). Esto es equivalente a modificar "β".

En la figura 15 se muestran dos triángulos equiláteros. Uno de ellos T1 coincide con el mostrado en la figura 14 que estaría formado por las tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S'$ ,  $U_S^{*'}).$  El segundo T2 está formado por el giro un ángulo β en sentido antihorario de  $U_R$  ( $\rightarrow U_R''$ ), y por el giro ese mismo ángulo β en sentido horario de  $U_S'$  ( $\rightarrow U_S''$ ). La modificación de la fase de los potenciales  $U_R$  y  $U_S'$  un ángulo β es equivalente a sumar un potencial de secuencia directa y un potencial de secuencia homopolar, que sumado a  $U_S^{*'}$  resulta en  $U_T''$ .

20 De manera similar a lo realizado en el paso 5, en el paso 6, se gira el vector  $U_R$  un ángulo β en sentido antihorario (u horario) y  $U_S'$  el mismo ángulo, pero en sentido opuesto al anterior, con la intención de mantener los módulos de estos 2 vectores:

$$\begin{aligned} U_R'' &= U_R e^{j\beta} \\ U_S'' &= U_S' e^{-j\beta} \end{aligned}$$

Este movimiento debe de corresponderse con la adición de una determinada cantidad de secuencia directa "SD" ( $U_D$ ) y secuencia homopolar "SH" ( $U_H$ ). Para 25 calcular estas cantidades, hay que recordar que la secuencia directa es un conjunto de tres vectores con la misma amplitud y desfasados  $\frac{2\pi}{3}$  entre ellos [ $SD_r, SD_s, SD_t$ ]:

$$|SD_r| = |SD_s| = |SD_t| = SD$$

$$\begin{aligned} SD_r &= SD e^{j0} \\ SD_s &= SD e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ SD_t &= SD e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{aligned}$$

Si se giran un determinado ángulo:

$$\begin{aligned}SD_r &= SDe^{j\gamma} \\SD_s &= SDe^{j\left(\frac{4\pi}{3}+\gamma\right)} \\SD_t &= SDe^{j\left(\frac{2\pi}{3}+\gamma\right)}\end{aligned}$$

Y lo mismo ocurre con la secuencia homopolar:

$$\begin{aligned}SH_r &= SHE^{j\delta} \\SD_s &= SHE^{j\delta} \\SD_t &= SHE^{j\delta}\end{aligned}$$

5

Así se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned}U_R + SD_r + SH_r &= U_R'' \\U_s' + SD_s + SH_s &= U_s''\end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}U_r + SDe^{j0} + SHE^{j\delta} &= U_re^{j\beta} \\U_s' + SDe^{j\frac{4\pi}{3}} + SHE^{j\delta} &= U_s'e^{-j\beta}\end{aligned} \right\}$$

Desarrollando:

$$\left\{ \begin{aligned}U_R &= \text{real}(U_R) + j\text{imag}(U_R) \\U_R'' &= \text{real}(U_R'') + j\text{imag}(U_R'') \\U_s' &= \text{real}(U_s') + j\text{imag}(U_s') \\U_s'' &= \text{real}(U_s'') + j\text{imag}(U_s'') \\SD_r &= SD_{rx} + jSD_{ry} \\SD_s &= (SD_{rx} + jSD_{ry}) \left( \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + jsin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right) \\SH &= SH_x + jSH_y\end{aligned} \right.$$

10

$$\left\{ \begin{aligned}\text{real}(U_R) + j\text{imag}(U_R) + SD_{rx} + jSD_{ry} + SH_x + jSH_y &= \text{real}(U_R'') + j\text{imag}(U_R'') \\ \text{real}(U_s') + j\text{imag}(U_s') + SD_{rx}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + jSD_{rx}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) - SD_{ry}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ &+ jSD_{ry}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SH_x + jSH_y = \text{real}(U_s'') + j\text{imag}(U_s'')\end{aligned} \right.$$

Estas dos ecuaciones se desdoblán en un sistema lineal de cuatro:

$$\left\{ \begin{aligned}\text{real}(U_R) + SD_{rx} + SH_x &= \text{real}(U_R'') \\ \text{imag}(U_R) + SD_{ry} + SH_y &= \text{imag}(U_R'') \\ \text{real}(U_s') + SD_{rx}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) - SD_{ry}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SH_x &= \text{real}(U_s'') \\ \text{imag}(U_s') + SD_{rx}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SD_{ry}\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SH_y &= \text{imag}(U_s'')\end{aligned} \right.$$

15

Separando términos:

$$\begin{aligned}SD_{rx} + SH_x &= \text{real}(U_R'') - \text{real}(U_R) \\SD_{ry} + SH_y &= \text{imag}(U_R'') - \text{imag}(U_R)\end{aligned}$$

$$SD_{rx} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) - SD_{ry} \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SH_x = \text{real}(U_s'') - \text{real}(U_s')$$

$$SD_{rx} \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SD_{ry} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + SH_y = \text{imag}(U_s'') - \text{imag}(U_s')$$

Escribiendo este sistema en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SD_{rx} \\ SD_{ry} \\ SH_x \\ SH_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{real}(U_R) \\ \text{imag}(U_R) \\ \text{real}(U_s') \\ \text{imag}(U_s') \\ \text{real}(U_R') \\ \text{imag}(U_R') \\ \text{real}(U_s'') \\ \text{imag}(U_s'') \end{pmatrix}$$

Resulta que:

5

$$\begin{pmatrix} SD_{rx} \\ SD_{ry} \\ SH_x \\ SH_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{real}(U_R) \\ \text{imag}(U_R) \\ \text{real}(U_s') \\ \text{imag}(U_s') \\ \text{real}(U_R') \\ \text{imag}(U_R') \\ \text{real}(U_s'') \\ \text{imag}(U_s'') \end{pmatrix}$$

Donde:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix}$$

Una vez obtenidos  $SD_r = SD_{rx} + jSD_{ry}$  y  $SH = SH_x + jSH_y$ , se puede obtener de forma directa  $SD_s$  y  $SD_t$ , y por consiguiente  $SD$  y  $SH$ .

10

Por lo que queda determinado perfectamente el sistema de secuencia directa y homopolar necesario para girar el vector  $U_R$  un ángulo  $\beta$  en sentido antihorario (u horario) Y  $U_s'$  el mismo ángulo, pero en sentido opuesto al anterior.

Si se suma esta secuencia directa y homopolar obtenidos al sistema de partida obtendremos un sistema de tensiones sin secuencia inversa:

$$(U_D' + SD, 0, U_H' + SH)$$

15

A este nuevo sistema le hemos llamado anteriormente  $S'' = [U_D'', 0, U_H'']$ .

A partir de este sistema de secuencia directa y homopolar, se obtiene sus tensiones simples:

$$\begin{bmatrix} U_R'' \\ U_S'' \\ U_T'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_D'' \\ 0 \\ U_H'' \end{bmatrix}$$

De modo que se determina  $U_T''$  y su módulo; comparando  $|U_T''|$  con  $|U_T|$  podremos calcular el error:

$$Error = |U_T''| - |U_T|$$

Y a partir de él, incrementaremos ó reduciremos el ángulo  $\beta$  y volveremos a realizar los cálculos hasta que dicho error sea menor que un valor preestablecido  $\varepsilon$ .

En los casos anteriores es posible que se conozcan las tensiones compuestas y no las tensiones simples. Para poder calcular las tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) a partir de las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ), el método adicionalmente comprende los siguientes sub-pasos, que pueden ser ejecutados dentro de cualquier paso principal del método ( o incluso de forma diferente), a saber:

- calcular las componentes simétricas, secuencias directa, inversa y homopolar, asociadas a las tensiones compuestas:

$$\begin{bmatrix} U_{CD} \\ U_{CI} \\ U_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{RS} \\ U_{ST} \\ U_{TR} \end{bmatrix}$$

- siendo  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  y

- $U_{CD}$ : tensión compuesta de la secuencia directa;

- $U_{CI}$ : tensión compuesta de la secuencia inversa;

- $U_{CH}$ : tensión compuesta de la secuencia homopolar;

- calcular el ángulo " $\alpha$ " de la secuencia directa y restarle  $\pi/6$ :

- $\alpha = \text{angle}(U_{CD}) - \frac{\pi}{6}$

- siendo:  $\text{angle}(U_{CD}) = \text{atan2}\left(\frac{\text{imag}(U_{CD})}{\text{real}(U_{CD})}\right)$

- girar en sentido antihorario el sistema formado por las tensiones compuestas el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

- $U_{RS}' = |U_{RS}|e^{j[\text{angle}(U_{RS})-\alpha]}$

- $U_{ST}' = |U_{ST}|e^{j[\text{angle}(U_{ST})-\alpha]}$

- $U_{TR}' = |U_{TR}|e^{j[\text{angle}(U_{TR})-\alpha]}$

- calcular las componentes simétricas del sistema de tensiones compuestas girado:

$$\circ \begin{bmatrix} U'_{CD} \\ U'_{CI} \\ U'_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_{RS} \\ U'_{ST} \\ U'_{TR} \end{bmatrix}$$

- obtener las tensiones simples:

5

$$\circ \begin{bmatrix} U'_R \\ U'_S \\ U'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_D \\ U'_I \\ U'_H \end{bmatrix}$$

aprovechando las propiedades:

$$U'_D = U'_{CD} \varepsilon^{-1}$$

$$U'_I = U'_{CI} \varepsilon^{*-1}$$

$$U'_H = U'_I^*$$

siendo:

$$\varepsilon = -\frac{1}{2}(3 + j\sqrt{3}); \varepsilon^* = -\frac{1}{2}(3 - j\sqrt{3}).$$

- 10
- girar en sentido horario el sistema formado por las tensiones compuestas el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

$$\circ U_R = |U'_R| e^{j[\text{angle}(U'_R) - \alpha]}$$

$$\circ U_S = |U'_S| e^{j[\text{angle}(U'_S) - \alpha]}$$

$$\circ U_T = |U'_T| e^{j[\text{angle}(U'_T) - \alpha]}$$

15

## REIVINDICACIONES

1.- Método de equilibrado eléctrico en un sistema trifásico caracterizado porque comprende:

- 5 i) obtener (31) la magnitud y la fase de cada tensión simple de salida (R,S,T) del sistema trifásico formando un sistema de tensiones simples ( $U_R, U_S, U_T$ );
- ii) alinear (32) una primera tensión simple con el eje real ( $U_R$ );
- 10 iii) elegir (33) la primera tensión simple ( $U_R$ ) previamente alienada con el eje real y una segunda tensión simple ( $U_S$ ) seleccionada de entre las dos tensiones simples restantes ( $U_S, U_T$ ); y, añadir una tercera tensión simple ( $U_{S^*}$ ) que sea el complejo conjugado de la mayor ( $U_S$ ) de las dos anteriores ( $U_S, U_T$ );
- 15 iv) calcular (34) la tensión de secuencia directa ( $U_D$ ), la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_H$ ) del sistema de tensiones simples formado por la primera tensión simple, la segunda tensión simple y la tercera tensión simple ( $U_R, U_S, U_{S^*}$ );
- v) añadir (35) tensión de secuencia inversa de signo negativo ( $-U_I$ ) respecto a la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) antes calculada, mediante el giro de un ángulo " $\alpha$ " de la fase de la segunda tensión simple ( $U_S$ ) y mediante el giro en sentido opuesto al anterior de la fase de la tercera tensión simple ( $U_{S^*}$ );
- 20 obteniendo así un nuevo sistema tensiones simples ( $U_R, U_{S'}, U_{S'^*}$ ) formado por la primera tensión simple ( $U_R$ ), una nueva segunda tensión simple ( $U_{S'}$ ) igual en módulo a la segunda tensión simple ( $U_S$ ) pero desfasada un ángulo " $\alpha$ " y una nueva tercera tensión simple ( $U_{S'^*}$ ) igual en módulo a la tercera tensión simple pero contra-desfasada un ángulo fase " $\alpha$ ";
- 25 vi) calcular (36) la tensión de secuencia directa ( $U_{D'}$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_{H'}$ ) del nuevo sistema de tensiones simples ( $U_R, U_{S'}, U_{S'^*}$ );
- vii) añadir (37), de forma respectiva, tensión de secuencia directa (SD) y tensión de secuencia homopolar (SH) a la tensión de secuencia directa ( $U_{D'}$ ) y a la tensión de secuencia homopolar ( $U_{H'}$ ) previamente calculada girando la primera
- 30 tensión simple ( $U_R$ ) un ángulo " $\beta$ " y girando la nueva segunda tensión simple ( $U_{S'}$ ) el mismo ángulo " $\beta$ " en sentido opuesto; obteniendo así una nueva tensión de secuencia directa ( $U_D''$ ) y una nueva tensión de secuencia homopolar ( $U_H''$ );

viii) calcular (38) las nuevas tensiones simples ( $U_R''$ ,  $U_S''$ ,  $U_T''$ ) a partir de la nueva tensión de secuencia directa ( $U_D''$ ) y de la nueva tensión de secuencia homopolar ( $U_H''$ ) con tensión de secuencia inversa igual a cero;

ix) repetir (39) los pasos vii) y viii) hasta que el módulo de la nueva tercera tensión simple ( $U_T''$ ) sea igual al módulo de la tensión simple de salida descartada en el paso iii) ( $U_T$ ); donde en cada iteración se modifica el valor del ángulo "β" como una función de la diferencia entre los módulos de las tensiones anteriores ( $|U_T''| - |U_T|$ ).

10 2.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la tensión de secuencia directa ( $U_D$ ), la tensión de secuencia inversa ( $U_I$ ) y la tensión de secuencia homopolar ( $U_H$ ) de un sistema de tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) se calculan de la siguiente forma:

- $U_D = \frac{1}{3}(U_R + U_S a + U_T a^2)$
- $U_I = \frac{1}{3}(U_R + U_S a^2 + U_T a)$
- $U_H = \frac{1}{3}(U_R + U_S + U_T)$

donde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

3.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la primera tensión simple ( $U_R$ ), la nueva segunda tensión simple ( $U_S'$ ), la nueva tercera tensión simple ( $U_S^{*'}$ ) y el ángulo "α" cumplen la siguiente relación:

$$(U_S' \cos(\alpha) + U_R) \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) = U_S' \sin(\alpha)$$

$$U_S^{*'} = \text{conj}(U_S')$$

4.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque una primera tensión simple ( $U_R$ ), una segunda tensión simple ( $U_S$ ) y una tercera tensión simple ( $U_T$ ) se obtienen a partir de unas tensiones de secuencia directa ( $U_D$ ), inversa ( $U_I$ ) y homopolar ( $U_H$ ):

$$\begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_D \\ U_I \\ U_H \end{bmatrix}$$

donde  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ .

5.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la tensión de secuencia directa (SD) y la tensión de secuencia homopolar (SH) que se añade en el paso vii) se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} U_R + SD_R + SH_R &= U_R'' \\ U_S + SD_S + SH_S &= U_S'' \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned} SD_R &= SD_{RX} + jSD_{RY} \\ SH_R &= SH_S = SH = SH_X + jSH_Y \end{aligned}$$

5 y,

$$\begin{pmatrix} SD_{RX} \\ SD_{RY} \\ SH_X \\ SH_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{real}(U_R) \\ \text{imag}(U_R) \\ \text{real}(U_S') \\ \text{imag}(U_S') \\ \text{real}(U_R'') \\ \text{imag}(U_R'') \\ \text{real}(U_S'') \\ \text{imag}(U_S'') \end{pmatrix}$$

donde

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 1 & 0 \\ -\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{3}\sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) & -\cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix}$$

10 6.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque adicionalmente comprende calcular unas tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) a partir de las tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) mediante la resta de tensiones simples dos a dos:

$$U_{RS} = U_S - U_R;$$

$$U_{ST} = U_T - U_S;$$

15

$$U_{TR} = U_R - U_T;$$

7.- Método según la reivindicación 1, caracterizado porque adicionalmente comprende calcular unas tensiones simples ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ ) a partir de las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ) mediante los siguientes sub-pasos:

- calcular el sistema de tensiones compuestas ( $U_{CD}$ ,  $U_{CI}$ ,  $U_{CH}$ ) formado por la tensión compuesta de secuencia directa ( $U_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U_{CH}$ ), asociadas a las tensiones compuestas ( $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ ):

5

- $$\begin{bmatrix} U_{CD} \\ U_{CI} \\ U_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{RS} \\ U_{ST} \\ U_{TR} \end{bmatrix}$$

- siendo  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

- calcular el ángulo “ $\alpha$ ” de la secuencia directa y restarle  $\pi/6$ :

- $\alpha = \text{angle}(U_{CD}) - \frac{\pi}{6}$

- siendo:  $\text{angle}(U_{CD}) = \text{atan2}\left(\frac{\text{imag}(U_{CD})}{\text{real}(U_{CD})}\right)$

- 10
- girar en sentido antihorario el sistema formado por las tensiones compuestas el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

- $U'_{RS} = |U_{RS}|e^{j[\text{angle}(U_{RS})-\alpha]}$

- $U'_{ST} = |U_{ST}|e^{j[\text{angle}(U_{ST})-\alpha]}$

- $U'_{TR} = |U_{TR}|e^{j[\text{angle}(U_{TR})-\alpha]}$

15

- calcular la tensión compuesta de secuencia directa ( $U'_{CD}$ ), la tensión compuesta de secuencia inversa ( $U'_{CI}$ ) y la tensión compuesta de secuencia homopolar ( $U'_{CH}$ ) del sistema de tensiones compuestas girado:

- $$\begin{bmatrix} U'_{CD} \\ U'_{CI} \\ U'_{CH} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_{RS} \\ U'_{ST} \\ U'_{TR} \end{bmatrix}$$

- 20
- obtener el sistema formado por las tensiones simples ( $U'_R$ ,  $U'_S$ ,  $U'_T$ ) a partir del sistema de tensiones compuestas ( $U'_D$ ,  $U'_I$ ,  $U'_H$ ):

- $$\begin{bmatrix} U'_R \\ U'_S \\ U'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_D \\ U'_I \\ U'_H \end{bmatrix}$$

aprovechando las propiedades:

$$U'_D = U'_{CD}\varepsilon^{-1}$$

$$U'_I = U'_{CI}\varepsilon^{*-1}$$

$$U'_H = U'_I^*$$

siendo:

25

$$\varepsilon = -\frac{1}{2}(3 + j\sqrt{3}); \varepsilon^* = -\frac{1}{2}(3 - j\sqrt{3}).$$

- girar en sentido horario el sistema formado por las tensiones simples el ángulo  $\alpha$  previamente calculado:

$$\circ U_R = |U'_R| e^{j[\text{angle}(U'_R) - \alpha]}$$

$$\circ U_S = |U'_S| e^{j[\text{angle}(U'_S) - \alpha]}$$

$$\circ U_T = |U'_T| e^{j[\text{angle}(U'_T) - \alpha]}$$

5

8.- Sistema trifásico, caracterizado porque comprende:

- una salida de potencia trifásica (R,S,T);
- celdas de potencia (3) conectadas en cascada por cada línea de potencia;
- una tarjeta de control (4) por cada celda de potencia (3), la cual está configurada para medir la tensión suministrada por la celda a la que está asociada y modificar la tensión de la misma;
- un equipo de control (6) conectado con cada tarjeta de control (4) y con la salida de potencia trifásica (R,S,T) para obtener la magnitud y la fase de cada tensión simple ( $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ );

10

15

de tal forma que el equipo de control (6), teniendo medios para llevar a cabo el método de equilibrado eléctrico definido en las reivindicaciones 1 a 7, modifica la magnitud y la fase de la tensión de cada celda mediante cada tarjeta de control hasta que la salida del sistema trifásico alcanza las nuevas tensiones simples ( $U_R''$ ,  $U_S''$ ,  $U_T''$ ).

20

9.- Sistema según la reivindicación 8, caracterizado porque la celda de potencia (3) adicionalmente comprende un circuito de bypass (5), donde el circuito de by-pass se cierra cuando recibe una instrucción de cierre de la tarjeta de control (4).

25

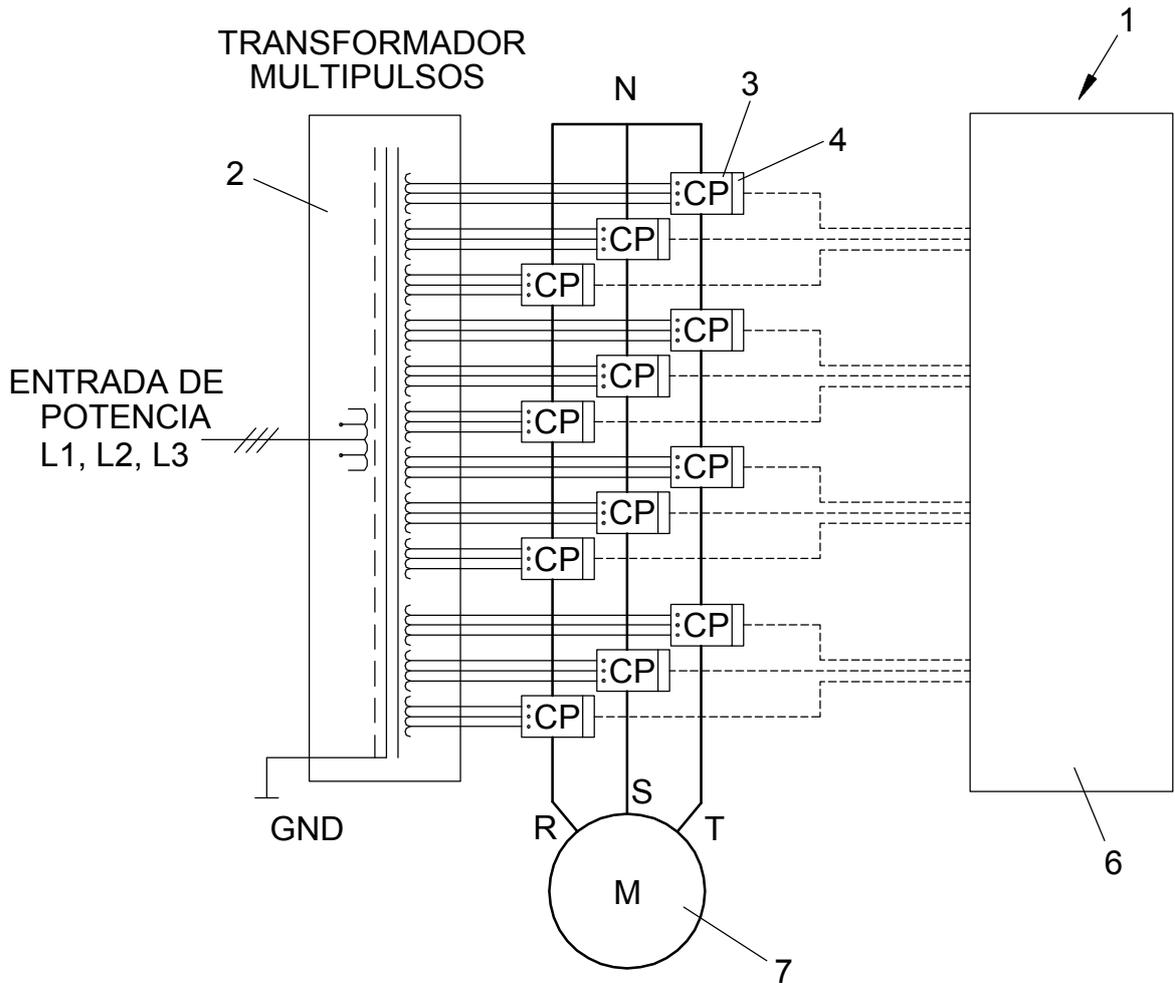


FIG. 1

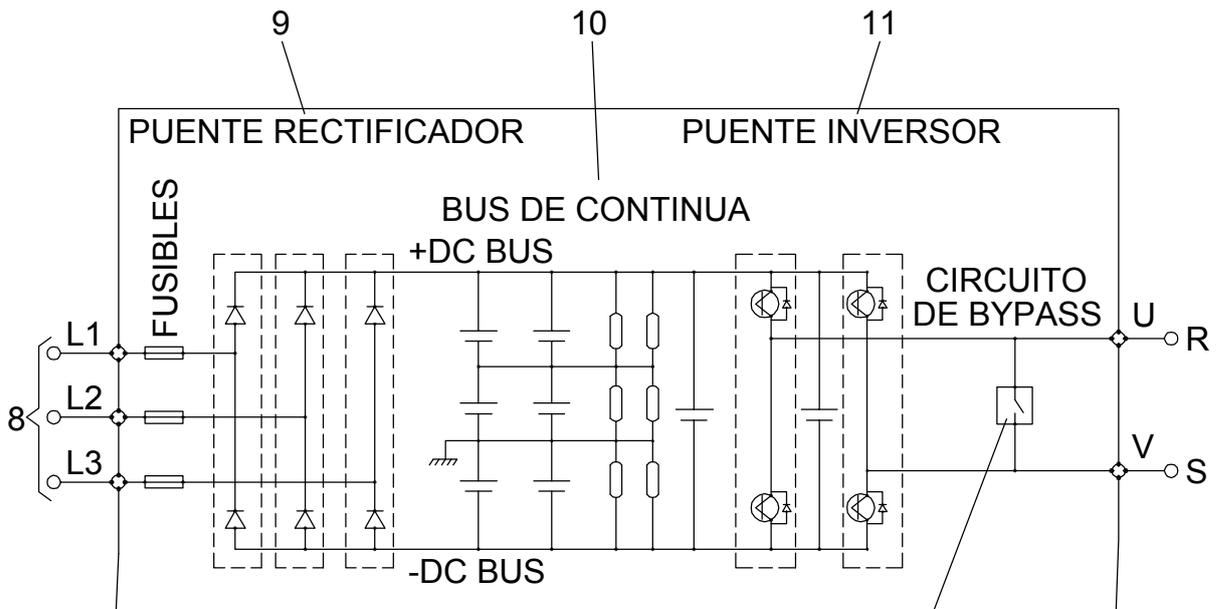


FIG. 2

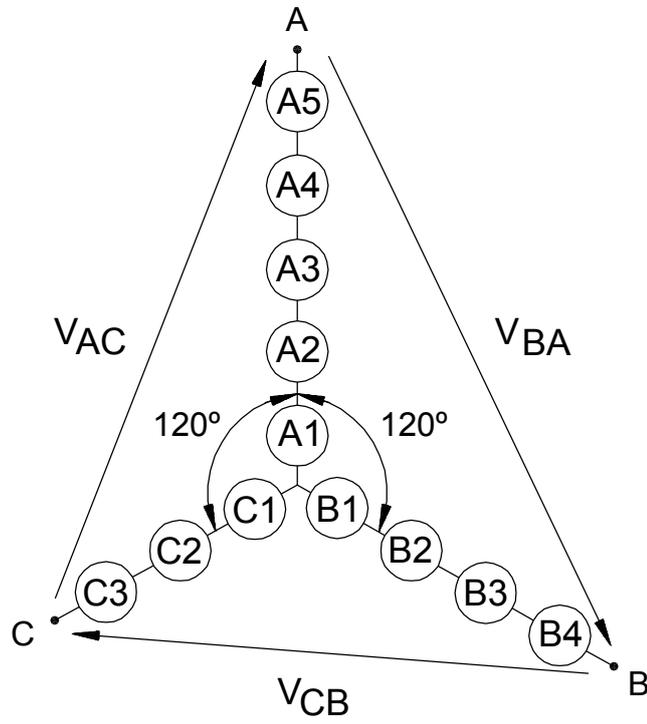


FIG. 3

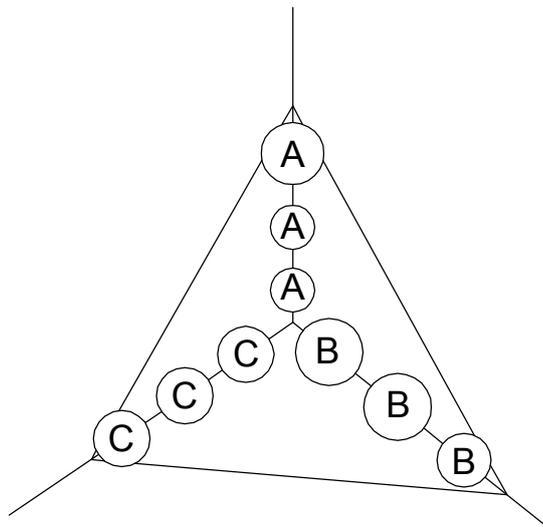


FIG. 4

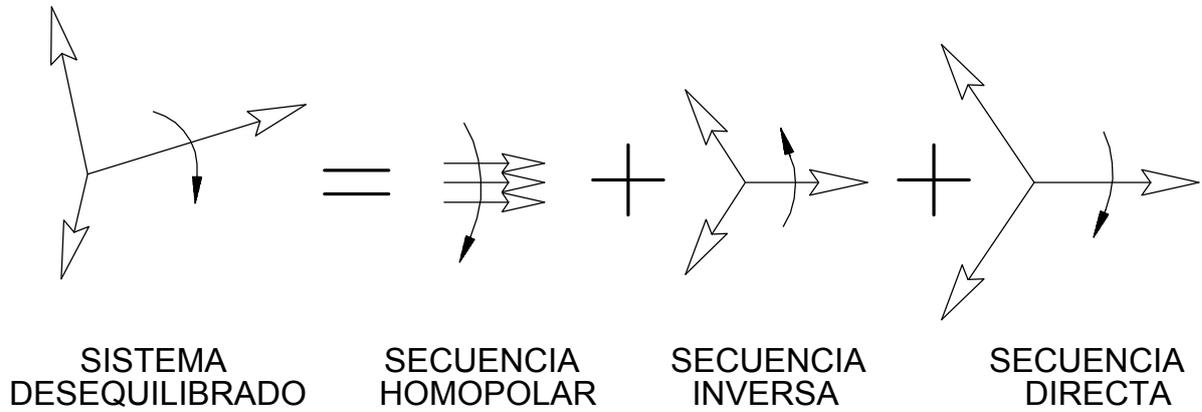


FIG. 5

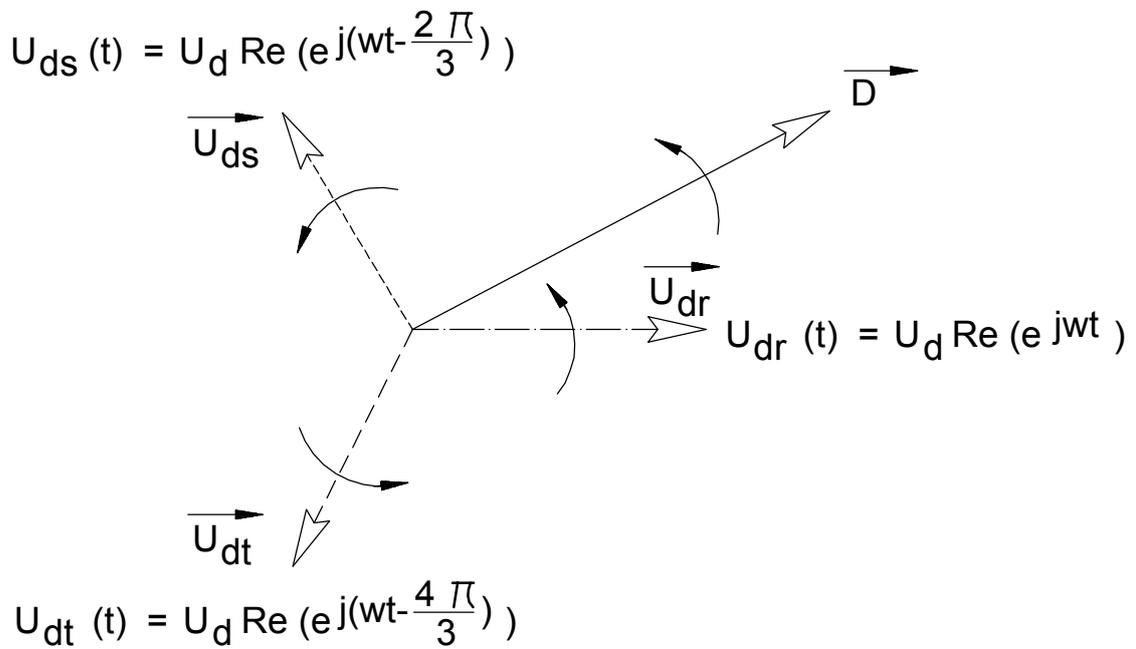


FIG. 6

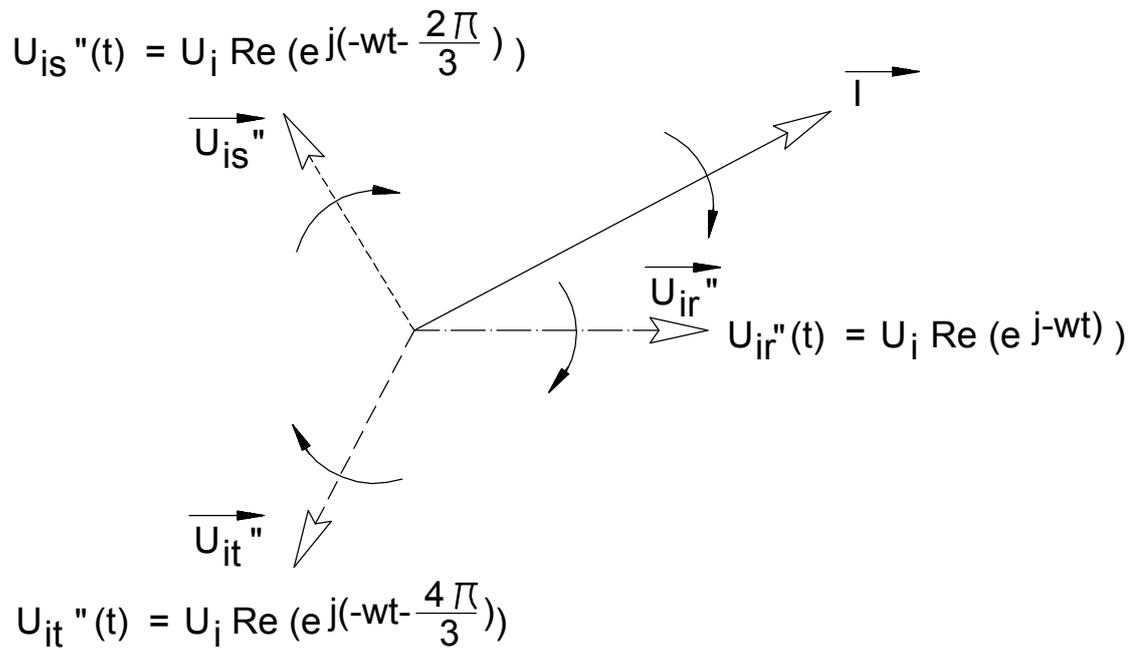


FIG. 7

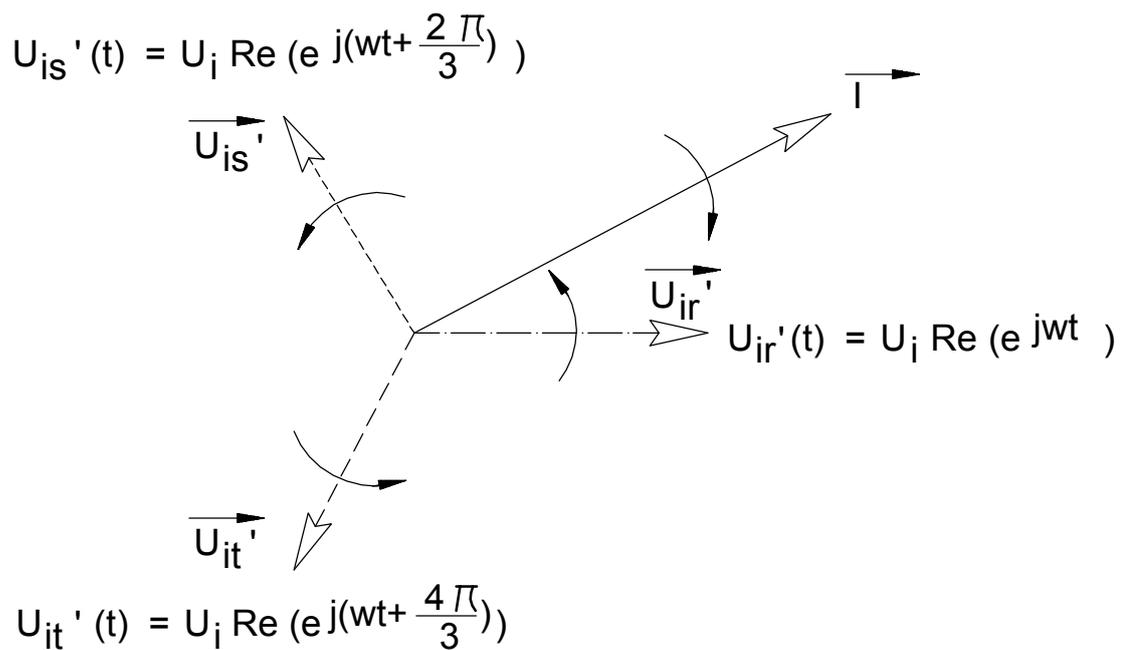


FIG. 8

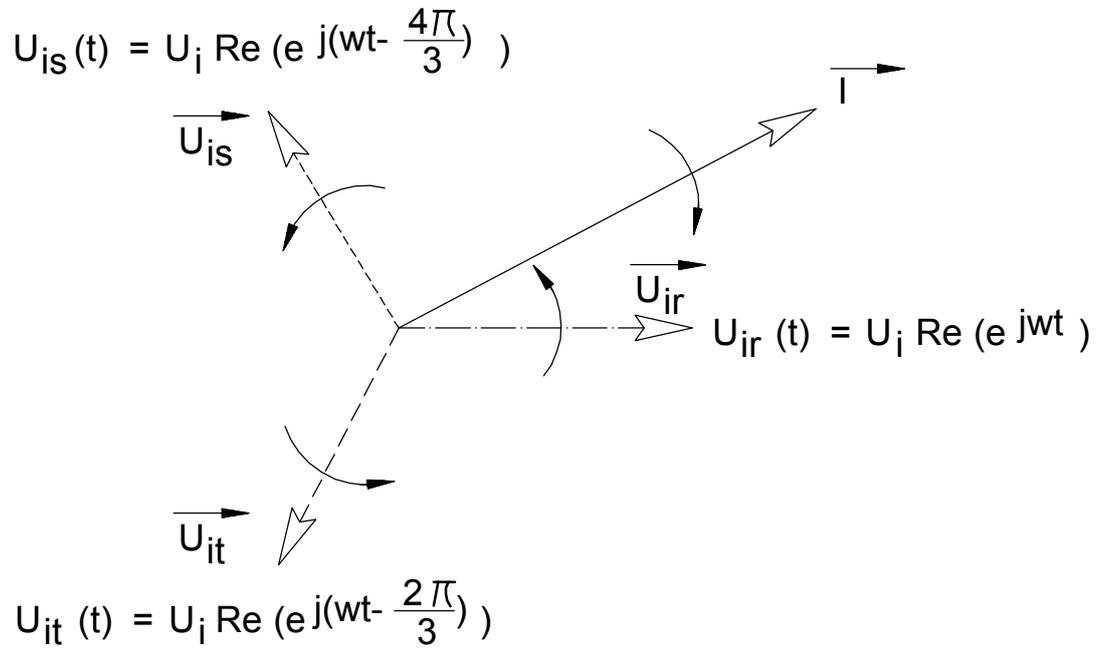


FIG. 9

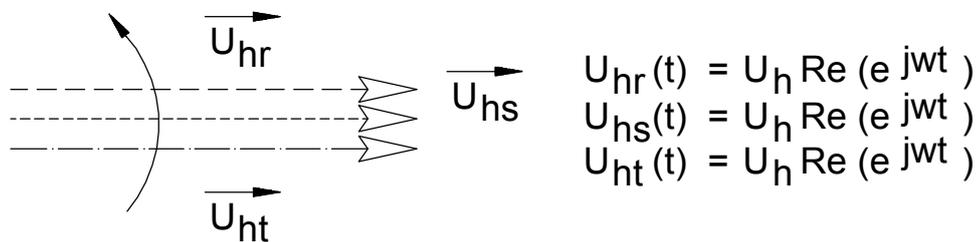


FIG. 10

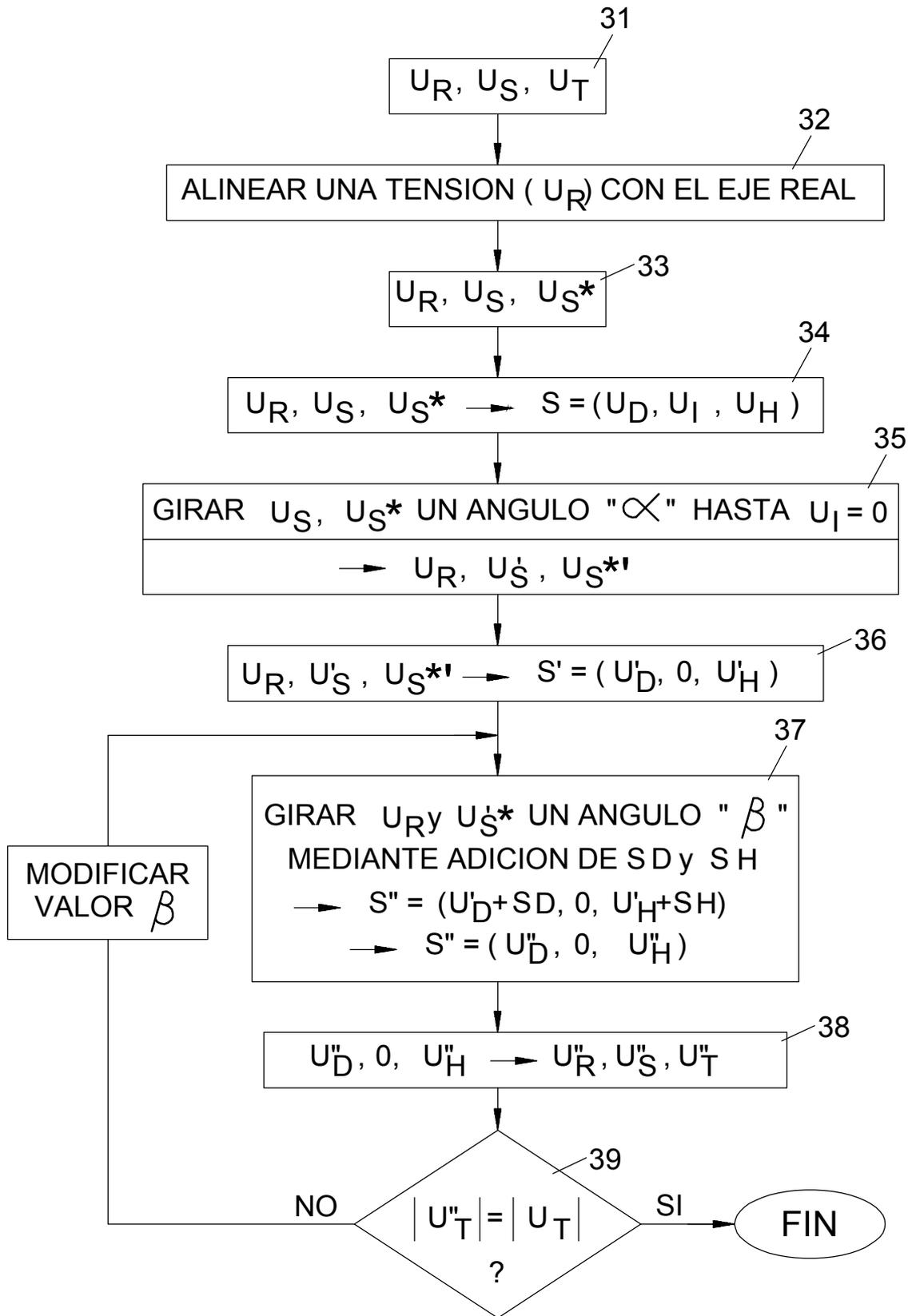


FIG. 11

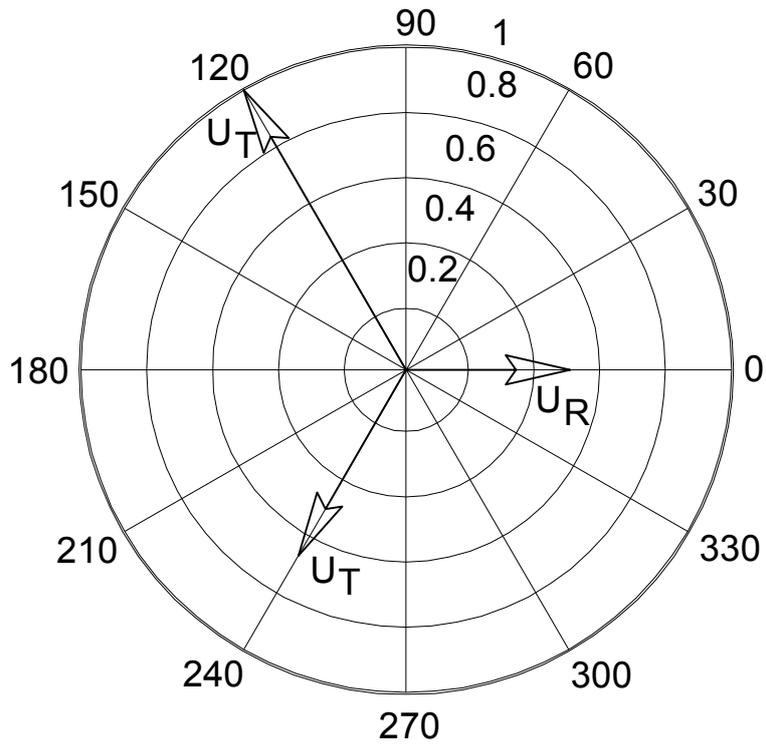


FIG. 12

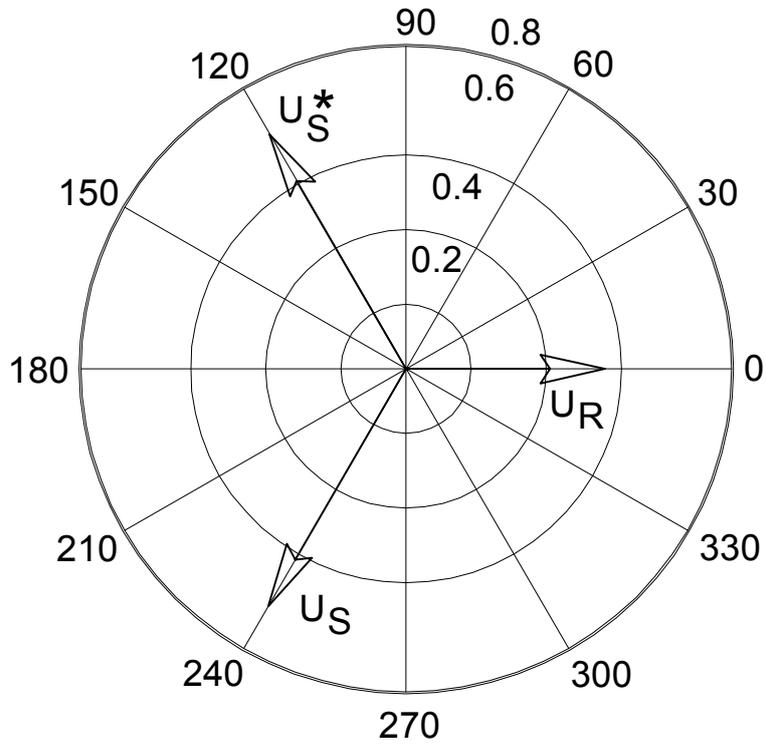


FIG. 13

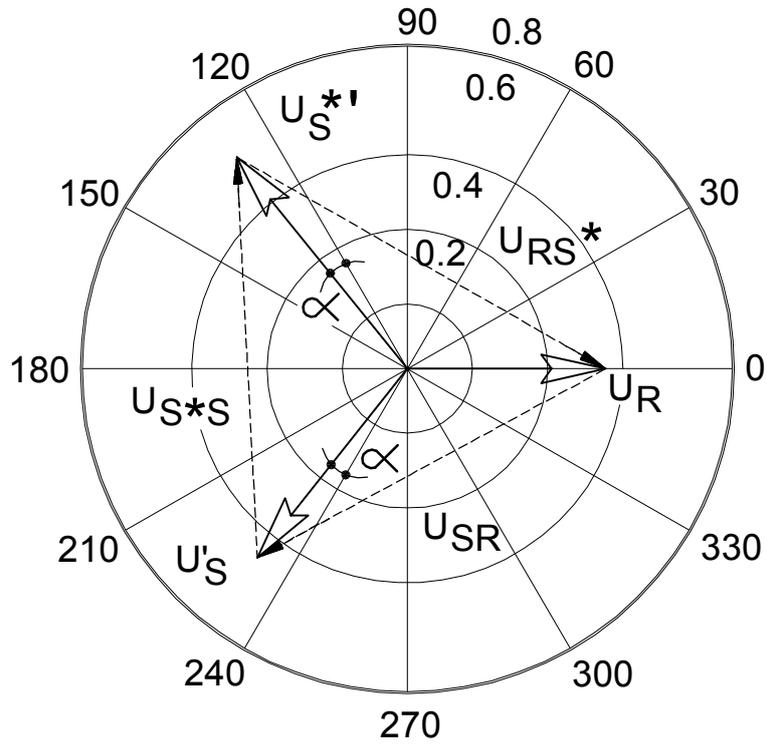


FIG. 14

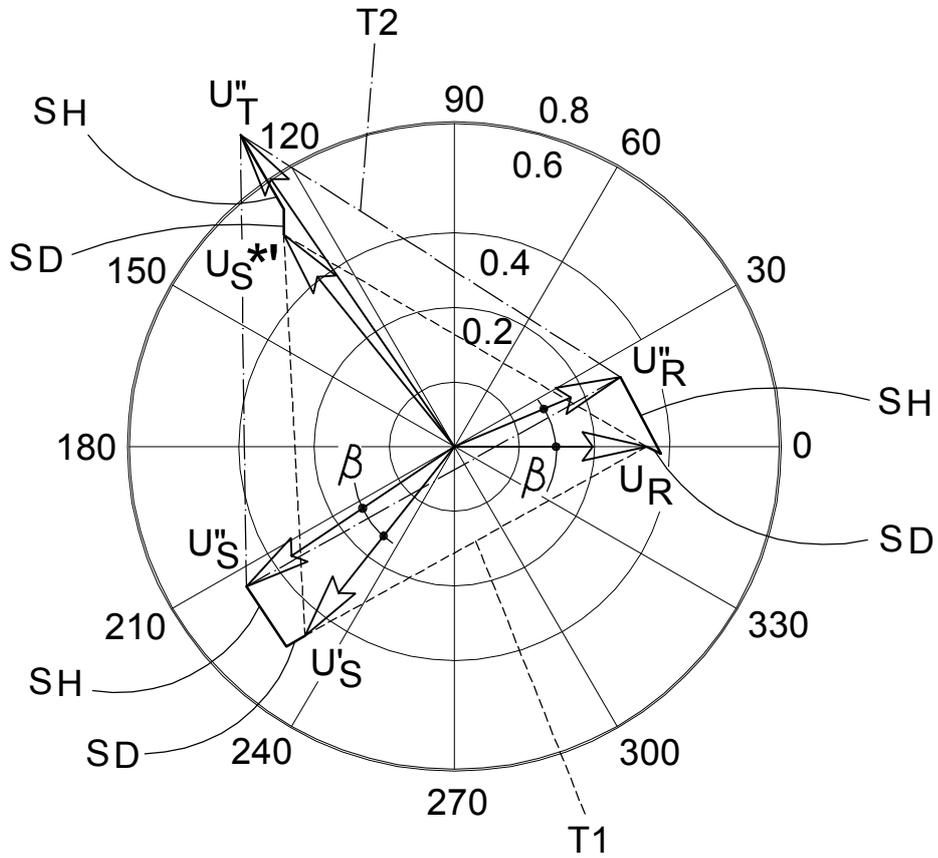


FIG. 15



- ②① N.º solicitud: 201631532  
 ②② Fecha de presentación de la solicitud: 30.11.2016  
 ③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **H02J3/26** (2006.01)  
**G01R29/16** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 2011134669 A1 (YUZURIHARA ITSUO et al.) 09/06/2011, todo el documento.	1-9
X	Kim Seok-Min et al. A MODIFIED LEVEL-SHIFTED PWM STRATEGY FOR FAULT-TOLERANT CASCADED MULTILEVEL INVERTERS WITH IMPROVED POWER DISTRIBUTION. IEEE	8,9
A	TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 20161101 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA. 01/11/2016, Vol. 63, N° 11, Páginas 7264 - 7274 [en línea][Recuperado el 12/02/2018]. ISSN ISSN 0278-0046, <DOI: doi:10.1109/TIE.2016.2547917>; todo el documento.	1-7

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  
15.02.2018

Examinador  
M. d. López Sábater

Página  
1/4

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

H02J, G01R

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, Internet

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 15.02.2018

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-7	<b>SI</b>
	Reivindicaciones 8-9	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-7	<b>SI</b>
	Reivindicaciones 8-9	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 2011134669 A1 (YUZURIHARA ITSUO et al.)	09.06.2011
D02	Kim Seok-Min et al. A MODIFIED LEVEL-SHIFTED PWM STRATEGY FOR FAULT-TOLERANT CASCADED MULTILEVEL INVERTERS WITH IMPROVED POWER DISTRIBUTION. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 20161101 IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, USA. Vol. 63, Nº 11, Páginas 7264 - 7274 [en línea][recuperado el 12/02/2018]. ISSN 0278-0046, <DOI: doi:10.1109/TIE.2016.2547917>	01.11.2016

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

## Reivindicación 1:

El documento del estado de la técnica considerado más cercano a esta primera reivindicación es D01. En dicho documento se utilizan las tensiones de secuencia homopolar y la tensión de secuencia directa como señales que se inyectan en el sistema para obtener un sistema equilibrado de tensiones. Sin embargo, en el documento base se llevan a cabo varios pasos intermedios que no se encuentran divulgados por D01 y pueden influir tanto en el tiempo necesario para llevar a cabo el equilibrado como en la precisión de los resultados obtenidos.

En el estado de la técnica anterior se han encontrado múltiples documentos en los que se detecta y se corrige un desequilibrio de un sistema eléctrico por medio del teorema de Fortescue y de inyecciones de señal. Sin embargo, ninguno de ellos anticipa el método divulgado en esta primera reivindicación, que puede considerarse nueva y con actividad inventiva.

## Reivindicaciones 2 a 7:

Estas reivindicaciones dependientes se consideran nuevas e inventivas por depender de la primera reivindicación.

## Reivindicación 8:

El documento del estado de la técnica más cercano a esta reivindicación independiente de sistema es D02, puesto que en dicho documento se divulga un sistema trifásico que comprende:

- una salida de potencia trifásica;
- celdas de potencia conectadas en cascada por cada línea de potencia;
- una tarjeta de control implícita en cada celda de potencia, la cual está configurada para medir la tensión suministrada por la celda a la que está asociada y modificar la tensión de la misma;
- un equipo de control conectado con cada tarjeta de control y con la salida de potencia trifásica apto para obtener la magnitud y la fase de cada tensión simple; de tal forma que el equipo de control, teniendo medios aptos para llevar a cabo el método de equilibrado eléctrico definido en las reivindicaciones 1 a 7, puede modificar la magnitud y la fase de la tensión de cada celda mediante cada tarjeta de control hasta que la salida del sistema trifásico alcanza nuevas tensiones simples.

A la vista de lo anterior el sistema que se desea proteger y el que se divulga en D02 cuentan con los mismos elementos, por lo que esta reivindicación carece de novedad según el artículo 6 de la Ley de Patentes 11/86

## Reivindicación 9:

Como se puede leer, en D02 cada celda de potencia comprende adicionalmente un circuito de bypass que se cierra cuando recibe una instrucción de cierre de la tarjeta de control. Por lo tanto, esta reivindicación tampoco es nueva.