TEMA 21

SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS

21.1. UTILIZACIÓN DE LOS NÚMEROS COMPLEJOS EN EL ESTUDIO DE SISTEMAS TRIFÁSICOS.

El operador Ā.

En un sistema trifásico equilibrado directo, para pasar del vector **1** al vector **3**, hay que realizar una rotación de **2π/3**. Esta operación representa una multiplicación por un número complejo de módulo **1** y argumento **2π/3**. Este número se representa mediante el operador **Ā**.

$$\bar{A} = 1\angle 2\pi/3 = e^{j2\pi/3} = \cos 2\pi/3 + j.sen 2\pi/3 = -½ + j\sqrt{3}/2 \qquad (21.1)$$

También se define $\bar{A}^2$, como un número complejo de módulo **1** y argumento **4π/3**, mediante el cual se pasa del vector **1** al vector **2**.

$$\bar{A}^2 = 1\angle 4\pi/3 = e^{j4\pi/3} = \cos 4\pi/3 + j.sen 4\pi/3 = -½ - j\sqrt{3}/2 \qquad (21.2)$$

Por último se define $\bar{A}^3$ como un complejo de módulo **1** y argumento **2π**, mediante el cual se pasa del vector **1** al vector **1**.

$$\bar{A}^3 = 1\angle 2\pi = e^{j2\pi} = \cos 2\pi + j.sen 2\pi = 1\angle 0^o \qquad (21.3)$$

Las expresiones (21.1), (21.2) y (21.3) verifican:

$$\bar{A} + \bar{A}^2 + \bar{A}^3 = 0 \qquad (21.4)$$

Se definen otros operadores como:

$$\bar{A}^{-1} = \frac{1}{\bar{A}} = \frac{\bar{A}^3}{\bar{A}} = \frac{1\angle 0^o}{1\angle 2\pi/3} = 1\angle -2\pi/3 = 1\angle 4\pi/3 = \bar{A}^2 \qquad (21.5)$$

$$\bar{A}^{-2} = \frac{1}{\bar{A}^2} = \frac{\bar{A}^3}{\bar{A}^2} = \frac{1\angle 0^o}{1\angle 4\pi/3} = 1\angle -4\pi/3 = 1\angle 2\pi/3 = \bar{A} \qquad (21.6)$$

El operador $\bar{A}$ permite expresar fácilmente un sistema trifásico equilibrado directo:

$$\bar{U}_{1d} = \bar{U}_d \quad ; \quad \bar{U}_{2d} = \bar{U}_{1d}.\bar{A}^2 = \bar{U}_d.\bar{A}^2 \quad ; \quad \bar{U}_{3d} = \bar{U}_1 d.\bar{A} = \bar{U}_d.\bar{A} \qquad (21.7)$$

También permite expresar un sistema trifásico equilibrado inverso:

$$\bar{U}_{1i} = \bar{U}_i \quad ; \quad \bar{U}_{2i} = \bar{U}_{1i}.\bar{A} = \bar{U}_i.\bar{A} \quad ; \quad \bar{U}_{3i} = \bar{U}_{1i}.\bar{A}^2 = \bar{U}_i.\bar{A}^2 \qquad (21.8)$$

21.2. OPERACIONES CON EL OPERADOR Ā.

Es interesante calcular $\mathbf{j.\sqrt{3}}$ y $\mathbf{-j.\sqrt{3}}$, en función de los operadores $\bar{\mathbf{A}}$ y $\bar{\mathbf{A}}^2$, ya que en el sistema equilibrado directo se engendra $\bar{\mathbf{U}}$ a partir de $\bar{\mathbf{U}}'$ mediante un giro de $\mathbf{-90^o}$ y una homotecia de razón $\sqrt{\mathbf{3}}$, lo que equivale a multiplicar por $\mathbf{-j.\sqrt{3}}$, y en el sistema inverso multiplicando por $\mathbf{j.\sqrt{3}}$.

$$\bar{A}^2 - \bar{A} = 1\underline{|4\pi/3} - 1\underline{|2\pi/3} = -½ - j.\sqrt{3}/2 - (-½ + j.\sqrt{3}/2) = -j.\sqrt{3} \qquad (21.9)$$

$$\bar{A} - \bar{A}^2 = 1\underline{|2\pi/3} - 1\underline{|4\pi/3} = -½ + j.\sqrt{3}/2 - (-½ - j.\sqrt{3}/2) = j.\sqrt{3} \qquad (21.10)$$

En consecuencia, el paso de $\bar{\mathbf{U}}'_{\mathbf{d}}$ a $\bar{\mathbf{U}}_{\mathbf{d}}$, en el sistema equilibrado directo se realizará mediante la expresión:

$$\bar{U}_{jd} = \bar{U}'_{jd}\,(\bar{A}^2 - \bar{A})$$
$$j=1,2,3$$

El paso de $\bar{\mathbf{U}}'_{\mathbf{i}}$ a $\bar{\mathbf{U}}_{\mathbf{i}}$, en el sistema equilibrado inverso se realizará mediante la expresión:

$$\bar{U}_{ji} = \bar{U}'_{jd}\,(\bar{A} - \bar{A}^2)$$
$$j=1,2,3$$

21.3. SISTEMAS DESEQUILIBRADOS. COMPONENTES SIMÉTRICAS.

Un sistema desequilibrado de fuerzas electromotrices, tensiones o intensidades, se produce: cuando entre sus magnitudes no existe un desfase de **120º;** cuando los valores eficaces no son iguales; o cuando se dan ambas circunstancias simultáneamente.

En estos casos se recurre al estudio de las *componentes simétricas*.

Las componentes simétricas se clasifican en:

① Sistema homopolar o de secuencia nula.
② Sistema directo o de secuencia positiva.
③ Sistema inverso o de secuencia negativa.

Sistema homopolar o se secuencia nula. Los tres vectores que representan el sistema trifásico están en fase, y sus módulos tienen el mismo valor (Ver Fig.21.1).

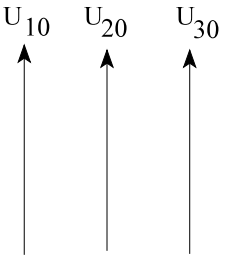


Fig.21.1

Sistema directo o de secuencia positiva. Los tres vectores que representan el sistema trifásico tienen el mismo módulo, forman entre sí **120º,** y giran en el sentido contrario a las agujas del reloj (Ver Fig.21.2).

El orden de sucesión de fases es:

1 - 2 - 3

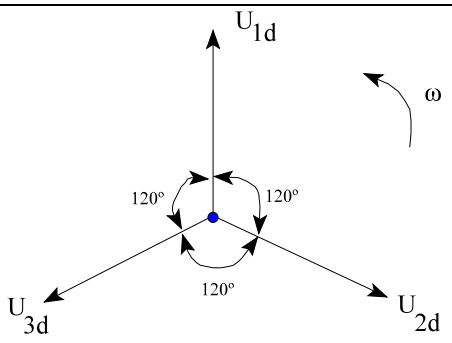


Fig.21.2

Sistema inverso o de secuencia negativa. Los tres vectores que representan el sistema trifásico tienen el mismo módulo, forman entre sí **120º,** y giran en el sentido de las agujas del reloj (Ver Fig. 21.3).

Con objeto de que los dos sistemas se puedan representar con el mismo sentido de giro (contrario a las agujas del reloj), el sistema inverso se puede definir como un sistema de tres vectores del mismo módulo, desfasados **120º** entre sí, y cuyo orden de sucesión de fases sea:

1 - 3 - 2

La representación del sistema equilibrado inverso, aplicando este último criterio, se

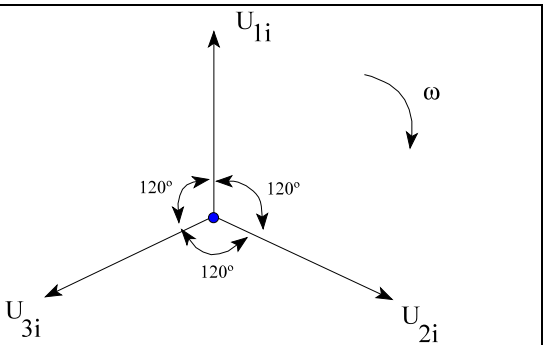


Fig.21.3

corresponde con la Fig. 21.4.

En este caso el orden de sucesión de fases es:

1 - 3 - 2

Como en el caso anterior.

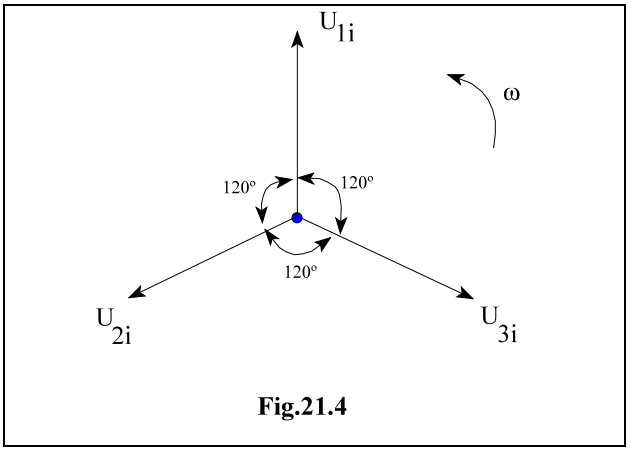


Fig.21.4

21.4 TEOREMA DE FORTESCUE[1].

Un sistema desequilibrado o asimétrico, puede descomponerse en tres sistemas simétricos; uno directo, otro inverso, y un tercero homopolar.

Supongamos un sistema de tensiones de línea desequilibradas $\bar{U}_1$, $\bar{U}_2$ y $\bar{U}_3$. De acuerdo con el teorema de Fortescue, se puede expresar dicho sistema en función de tres sistemas equilibrados de tensiones; homopolar, directo e inverso. En efecto:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{10} + \bar{U}_{1d} + \bar{U}_{1i} = \bar{U}_0 + \bar{U}_d + \bar{U}_i \qquad (21.11)$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_{20} + \bar{U}_{2d} + \bar{U}_{2i} = \bar{U}_0 + \bar{U}_d \cdot \bar{A}^2 + \bar{U}_i \cdot \bar{A} \qquad (21.12)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{U}_{30} + \bar{U}_{3d} + \bar{U}_{3i} = \bar{U}_0 + \bar{U}_d \cdot \bar{A} + \bar{U}_i \cdot \bar{A}^2 \qquad (21.13)$$

[1]Charles LeGeyt Fortescue (1876-1936). Nació en York Factory (hoy Manitoba) donde el río Hayes ingresa en la bahía Hudson. En 1898 recibió el título de ingeniero electricista encontrándose entre los primeros graduados del programas de la universidad canadiense de Queen´s.

Después de la graduación ingreso a la compañía eléctrica Westinghouse Electric & Manufacturing Company donde realizó toda su carrera profesional. En 1901 ingreso en el departamento de transformadores; en esta sección de la empresa trabajó en el área de alta tensión. En 1913 publicó en un artículo de la AIEE *The Application of a Theorem of Electrostatics to Insulator Problems*. En ese mismo año fue coautor de un artículo sobre la medición de disrupción eléctrica entre dos esferas eléctricas (espinterómetro), técnica que es utilizada en los laboratorios de alta tensión en la actualidad.

En otro artículo presentado en 1918 intitulado *Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks* demostró el Teorema de Fortescue, el cual permite sustituir cualquier sistema trifásico desequilibrado como suma de tres sistemas trifásicos equilibrados.

La organización IEEE ofrece un premio con el nombre de Fortescue

El teorema de Fortescue se expresa en forma matricial según (21.14):

$$\begin{pmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{A}^2 & \overline{A} \\ 1 & \overline{A} & \overline{A}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{U}_0 \\ \overline{U}_d \\ \overline{U}_i \end{pmatrix} \qquad (21.14)$$

Los valores de las componentes homopolar (U_0), directa (U_d) e inversa (U_i), se obtiene mediante la expresión:

$$\begin{pmatrix} \overline{U}_0 \\ \overline{U}_d \\ \overline{U}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \overline{A}^2 & \overline{A} \\ 1 & \overline{A} & \overline{A}^2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \end{pmatrix} \qquad (21.15)$$

El sistema de ecuaciones (21.11), (21.12) y (21.13), también permiten determinar $\bar{\mathbf{U}}_0$, $\bar{\mathbf{U}}_d$ e $\bar{\mathbf{U}}_i$, en función de $\bar{\mathbf{U}}_1$, $\bar{\mathbf{U}}_2$ y $\bar{\mathbf{U}}_3$, de la siguiente forma:

1º) Se suman miembro a miembro las ecuaciones: (21.11), (21.12), (21.13):

$$\bar{U}_1+\bar{U}_2+\bar{U}_3 = 3.\bar{U}_0+\bar{U}_d.(1+\bar{A}^2+\bar{A})+\bar{U}_i.(1+\bar{A}+\bar{A}_2) \qquad (21.16)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta (21.4), se verifica:

$$\bar{U}_0 = \tfrac{1}{3}.(\bar{U}_1+\bar{U}_2+\bar{U}_3) \qquad (21.17)$$

2º) Se suman miembro a miembro las ecuaciones: (21.11) , Ā. (21.12) , $\bar{A}^2$. (21.13):

$$\bar{U}_1+\bar{A}.\bar{U}_2+\bar{A}^2.\bar{U}_3 = \bar{U}_0.(1+\bar{A}+\bar{A}^2)+3.\bar{U}_d+\bar{U}_i.(1+\bar{A}^2+\bar{A}) \qquad (21.18)$$

De acuerdo con (21.4), se verifica:

$$\bar{U}_d = \tfrac{1}{3}.(\bar{U}_1+\bar{A}.\bar{U}_2+\bar{A}^2.\bar{U}_3) \qquad (21.19)$$

3º) Se suman miembro a miembro las ecuaciones: (21.11), $\bar{A}^2$. (21.12) , Ā. (21.13):

$$\bar{U}_1+\bar{A}^2.\bar{U}_2+\bar{A}.\bar{U}_3 = \bar{U}_0.(1+\bar{A}^2+\bar{A})+\bar{U}_d.(1+\bar{A}+\bar{A}^2)+3.\bar{U}_i \qquad (21.20)$$

De acuerdo con (21.4), se verifica:

$$\bar{U}_i = \tfrac{1}{3}.(\bar{U}_1+\bar{A}^2.\bar{U}_2+\bar{A}.\bar{U}_3) \qquad (21.21)$$

Las expresiones (21.17), (21.19) y (21.21) definen las componentes simétricas de las tensiones, en función de las componentes asimétricas $\bar{U}_1$, $\bar{U}_2$ y $\bar{U}_3$.

De forma análoga se pueden definir las componentes simétricas de las corrientes $\mathbf{J_1}$, $\mathbf{J_2}$ y $\mathbf{J_3}$, que se corresponden con un triángulo desequilibrado en corriente trifilar, o en una estrella desequilibrada, cuyo punto común estuviese unido al neutro de un circuito de cuatro hilos:

$$\bar{J}_0 = 1/3.(\bar{J}_1 + \bar{J}_2 + \bar{J}_3)$$

$$\bar{J}_d = 1/3.(\bar{J}_1 + \bar{A}.\bar{J}_2 + \bar{A}^2.\bar{J}_3) \qquad (21.22)$$

$$\bar{J}_i = 1/3.(\bar{J}_1 + \bar{A}^2.\bar{J}_2 + \bar{A}.\bar{J}_3)$$

En un circuito trifilar, o en uno tetrafilar en que no exista ninguna unión con el neutro, la componente homopolar de las corrientes en los hilos **R**, **S** y **T** es nula, ya que siempre se verifica:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0$$

Lo mismo sucede con la componente homopolar de las tensiones entre los hilos **R**, **S** y **T,** ya que en este caso se cumple:

$$\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3 = 0$$

En este supuesto, las relaciones generales tomarán una forma más sencilla que servirá para determinar gráficamente las componentes simétricas; directas e inversas.

21.5. CONSTRUCCIÓN GRÁFICA DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS DE TENSIONES.

En un sistema equilibrado directo se verifica:

$$\bar{U}_d = -j.\sqrt{3}.\bar{U}'_d \qquad (21.23)$$

Pero según (21.9):

$$\bar{A}^2 - \bar{A} = -j.\sqrt{3}$$

Por tanto (21.23) se puede expresar de la forma:

$$\bar{U}_d = (\bar{A}^2 - \bar{A}).\bar{U}'_d \qquad (21.24)$$

Según (21.19), se verifica:

$$3.\bar{U}_d = \bar{U}_1 + \bar{A}.\bar{U}_2 + \bar{A}^2.\bar{U}_3 \qquad (21.25)$$

Ahora bien, la suma de las tensiones de línea es nula, por tanto:

$$\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3 = 0 \quad ; \quad \bar{U}_3 = -(\bar{U}_1 + \bar{U}_2) \qquad (21.26)$$

Sustituyendo (21.26) en (21.25) resulta:

$$3.\bar{U}_d = \bar{U}_1+\bar{A}^2.\bar{U}_2-\bar{A}^2.(\bar{U}_1+\bar{U}_2) = \bar{U}_1.(1-\bar{A}^2)+\bar{U}_2.(\bar{A}-\bar{A}^2) \qquad (21.27)$$

Pero:

$$1 - \bar{A}^2 = \bar{A}.(1/\bar{A} - \bar{A}^2/\bar{A}) = \bar{A}.(\bar{A}^2 - \bar{A}) \qquad (21.28)$$

Sustituyendo (21.28) en (21.27), resulta:

$$3.\bar{U}_d = \bar{U}_1.\bar{A}.(\bar{A}^2-\bar{A})-\bar{U}_2.(\bar{A}^2-\bar{A}) = (\bar{A}^2-\bar{A}).(\bar{U}_1.\bar{A}-\bar{U}_2) \qquad (21.29)$$

Si la ecuación (21.24) se multiplica por tres, resulta

$$3.\bar{U}_d = 3.(\bar{A}^2 - \bar{A}).\bar{U}'_d \qquad (21.30)$$

Igualando (21.29) y (21.30), resulta:

$$3.(\bar{A}^2-\bar{A}).\bar{U}'_d = (\bar{A}^2-\bar{A}).(\bar{U}_1.\bar{A}-\bar{U}_2) \quad ; \quad 3.\bar{U}'_d = \bar{U}_1.\bar{A}-\bar{U}_2 \qquad (21.30)$$

En el sistema equilibrado inverso, se verifica:

$$\bar{U}_i = j.\sqrt{3}.\bar{U}'_i \qquad (21.32)$$

Según (21.10):

$$\bar{A} - \bar{A}^2 = j.\sqrt{3}$$

Por tanto (21.32) se puede expresar de la forma:

$$\bar{U}_i = (\bar{A} - \bar{A}^2).\bar{U}'_i \qquad (21.33)$$

Según (21.21), se verifica:

$$3.\bar{U}_i = \bar{U}_1 + \bar{A}^2.\bar{U}_2 + \bar{A}.\bar{U}_3 \qquad (21.34)$$

Ahora bien, la suma de las tensiones de línea es nula, por tanto:

$$\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3 = 0 \quad ; \quad \bar{U}_3 = -(\bar{U}_1 + \bar{U}_2) \qquad (21.35)$$

Sustituyendo (21.35) en (21.34) resulta:

$$3.\bar{U}_i = \bar{U}_1+\bar{A}^2.\bar{U}_2-\bar{A}.(\bar{U}_1+\bar{U}_2) = \bar{U}_1.(1-\bar{A})-\bar{U}_2.(\bar{A}-\bar{A}^2) \qquad (21.36)$$

Pero:

$$1-\bar{A} = \bar{A}^2.(1/\bar{A}^2-\bar{A}/\bar{A}^2) = \bar{A}^2.(\bar{A}-\bar{A}^2) \qquad (21.37)$$

Sustituyendo (21.37) en (21.36), resulta:

$$3.\bar{U}_i = \bar{U}_1.\bar{A}^2.(\bar{A}-\bar{A}^2)-\bar{U}_2.(\bar{A}-\bar{A}^2) = (\bar{A}-\bar{A}^2).(\bar{U}_1.\bar{A}^2-\bar{U}_2) \qquad (21.38)$$

Si la ecuación (21.33) se multiplica por tres, resulta:

$$3.\bar{U}_i = 3.(\bar{A} - \bar{A}^2).\bar{U}'_i \qquad (21.39)$$

Igualando (21.39) y (21.38), resulta:

$$3.(\bar{A}-\bar{A}^2).\bar{U}'_i = (\bar{A}-\bar{A}^2).(\bar{U}_1.\bar{A}^2-\bar{U}_2) \quad ; \quad 3.\bar{U}'_i = \bar{U}_1.\bar{A}^2-\bar{U}_2 \qquad (21.40)$$

Las relaciones (21.31) y (21.40), permiten construir las componentes simétricas directa e inversa del sistema desequilibrado de tensiones de línea $\bar{\mathbf{U}}_1$, $\bar{\mathbf{U}}_2$ y $\bar{\mathbf{U}}_3$.

Consideremos el triángulo $\overset{\triangle}{\mathbf{ABC}}$ de la Fig. 21.5, de tensiones compuestas, y dos triángulos equiláteros, en los cuales la base sea la tensión compuesta $\mathbf{BC} = \bar{\mathbf{U}}_1$.

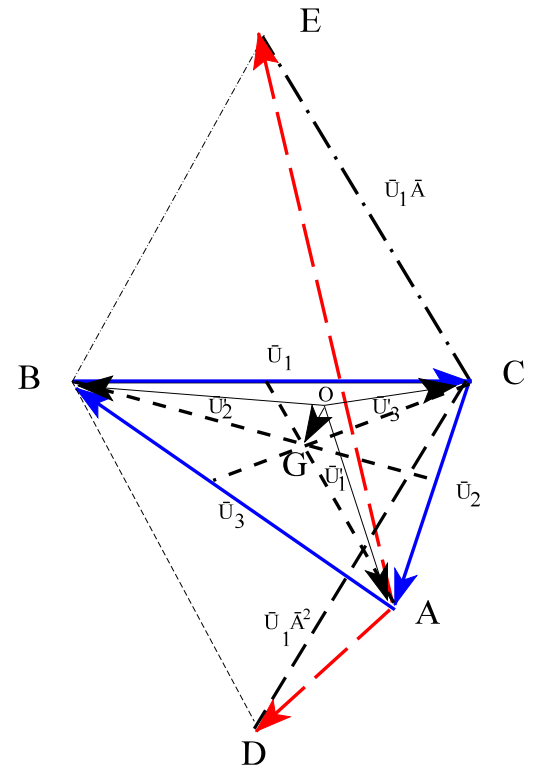


Fig.21.6

De acuerdo con las expresiones (21.31) y (21.40), se obtienen en la Fig. 21.6 los valores de los vectores que definen las componentes simétricas; directa e inversa.

$$\overline{AD} = 3.\bar{U}'_i \quad y \quad \overline{AE} = 3.\bar{U}'_d \qquad (21.41)$$

De la Fig.21.6, se deduce, que todo sistema de vectores $\bar{\mathbf{U}}'_1$, $\bar{\mathbf{U}}'_2$ y $\bar{\mathbf{U}}'_3$, cuyo origen sea un punto **O** cualquiera, y cuyos extremos coincidan con los vértices **A**, **B** y **C** del triángulo que definen las tensiones desequilibradas de línea, tienen las mismas componentes directa e inversa, y sólo difiere en la componente homopolar.

Si el sistema de tensiones compuestas fuese equilibrado directo, el punto **A** coincidiría con el **D**, y la componente inversa sería nula.

Para determinar la componente homopolar, observemos que, por ser **G** el centro de gravedad del triángulo **ABC**, se cumple:

$$\overline{GA} + \overline{GB} + \overline{GC} = 0 \qquad (21.42)$$

Luego, si el centro de la estrella **O**, de tensiones $\bar{U}'_1$, $\bar{U}'_2$ y $\bar{U}'_3$ no coincide con **G**, se tiene:

$$\overline{OA} = \overline{OG} + \overline{GA}$$

$$\overline{OB} = \overline{OG} + \overline{GB} \qquad (21.43)$$

$$\overline{OC} = \overline{OG} + \overline{GC}$$

Sumando (21.43) miembro a miembro, y teniendo en cuenta (21.42), resulta:

$$\overline{OA} + \overline{OB} + \overline{OC} = 3.\overline{OG}$$

Pero según (21.15) se cumple:

$$\bar{U}'_1 + \bar{U}'_2 + \bar{U}'_3 = 3.\bar{U}'_0$$

Por tanto:

$$\overline{OG}=\bar{U}'_0 \qquad (21.44)$$

Así, la distancia **OG**, representa vectorialmente la componente homopolar de la tensión.

21.6. CONSTRUCCIÓN GRÁFICA DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS DE LAS CORRIENTES.

En un sistema trifásico a cuatro hilos, la suma de las tres corrientes de línea:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3$$

será, en general, distinta de cero y se determinarán las componentes simétricas mediante las ecuaciones:

$$\bar{I}_0 = \tfrac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3)$$

$$\bar{I}_d = \tfrac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{A}.\bar{I}_2 + \bar{A}^2.\bar{I}_3) \qquad (21.45)$$

$$\bar{I}_i = \tfrac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{A}^2.\bar{I}_2 + \bar{A}.\bar{I}_3)$$

En un sistema con tres hilos se puede considerar para las corrientes la misma transformación que con las tensiones compuestas, teniendo en cuenta que:

$$\bar{I}_d = -j.\sqrt{3}.\bar{J}_d = (\bar{A}^2-\bar{A}).\bar{J}_d$$

$$\bar{I}_i = -j.\sqrt{3}.\bar{J}_i = (\bar{A}-\bar{A}^2).\bar{J}_i \qquad (21.46)$$

Siguiendo un razonamiento análogo al que se ha seguido con las tensiones, y teniendo en cuenta las expresiones (21.46), se obtiene:

$$3.\bar{J}_d = \bar{I}_1.\bar{A} - \bar{I}_2$$

$$3.\bar{J}_i = \bar{I}_1.\bar{A}^2 - \bar{I}_2 \qquad (21.47)$$

Δ

Designando ahora, por **ABC** el triángulo de corrientes en la línea, será válida la misma construcción de la Fig.21.6, de tensiones y se tendrá la Fig. 21.7

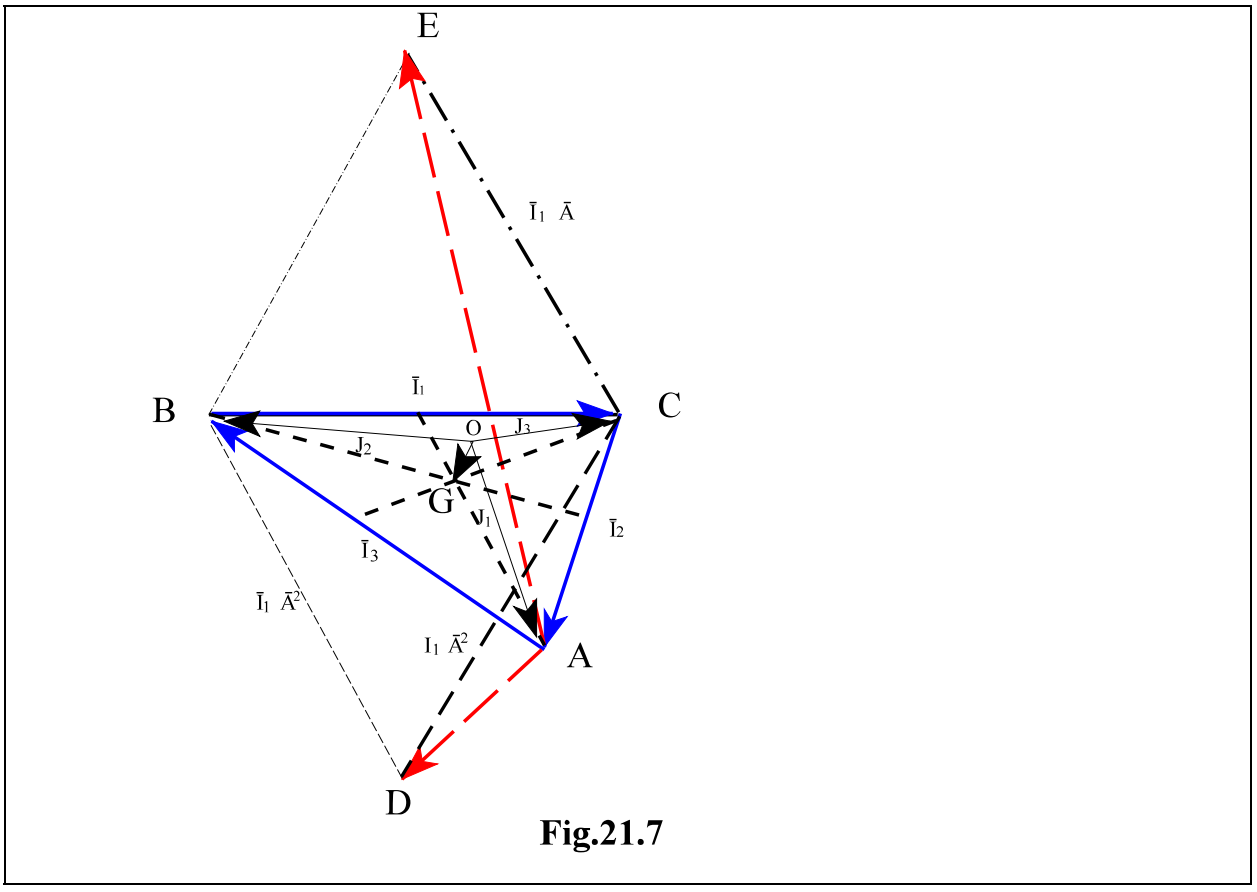


Fig.21.7

Razonando de forma análoga a las tensiones, las componentes simétricas de las corrientes a partir de la Fig.21.7, son:

$$3.\bar{J}_d=\overline{AE} \quad ; \quad 3.\bar{J}_i=\overline{AD} \tag{21.48}$$

También:

$$\overline{OG} = \bar{J}_0 \tag{21.49}$$

21.7. DESEQUILIBRIO DE UNA RED.[2]

Si se parte de una red cuyas tensiones forman un sistema directo, se caracteriza el desequilibrio en tensión por las expresiones:

$$\varepsilon_0 = \frac{U_0}{U_d}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{U_i}{U_d} \tag{21.50}$$

Y el desequilibrio en corrientes por:

$$\gamma_0 = \frac{J_0}{J_d}$$

$$\gamma_1 = \frac{J_i}{J_d} \tag{21.51}$$

[2] Físicamente, en un sistema trifásico, un conjunto de corrientes positivas produce un campo rotatorio normal (contrario al giro de las agujas del reloj), un conjunto de secuencias negativas produce un campo con rotación opuesta (según el giro de las agujas del reloj) y la secuencia cero produce un campo que oscila pero no gira. Desde que estos efectos fueron detectados físicamente, la herramienta matemática ha sido la base para el diseño de los relevadores de protección, también conocidos como *relays*, los cuales usan voltajes y corrientes de secuencia negativa como un indicador fiable de condiciones de fallo. Dichos relevadores deben ser usados para activar los interruptores automáticos (*breakers*) o para proteger sistemas eléctricos. La técnica analítica fue adoptada y mejorada por ingenieros de la General Electric y Westinghouse. Después de la Segunda Guerra Mundial, el método fue aceptado para el análisis de sistemas asimétricos.