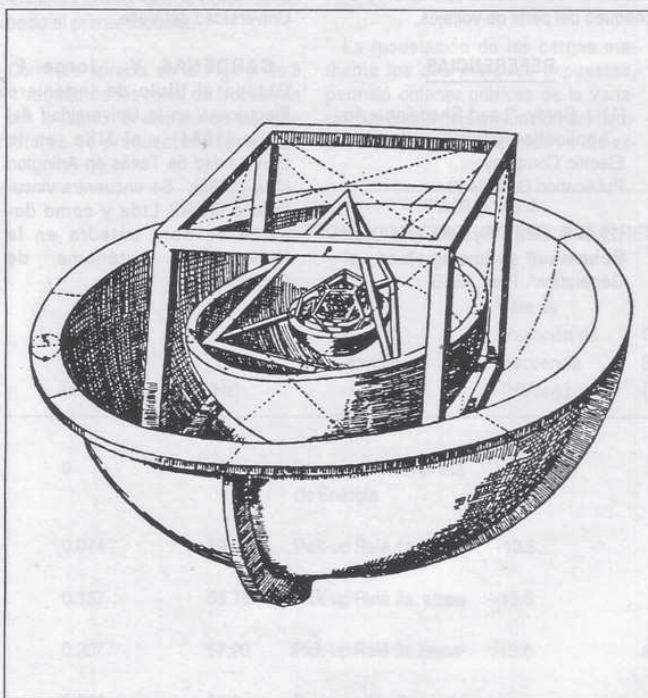


Determinación de las Componentes Simétricas del Sistema Asimétrico de Voltaje y Corriente.



□ JORGE E. PATIÑO M., Ph.D.
Profesor Asociado
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

1. RESUMEN

Con la aplicación del método matemático de Componentes Simétricas se pueden estudiar los problemas de la asimetría en las redes polifásicas lineales con el auxilio del principio de superposición. Con la adecuada aplicación del método se pueden determinar las diferentes secuencias de voltaje y corriente y, con el producto correspondiente de éstas, la potencia. La impedancia de

acuerdo con sus correspondientes relaciones. Algunos equipos utilizados en la Técnica de Protecciones con Relés, utilizan los llamados "Filtros de Componentes Simétricas", para la detección de éstas. En este artículo no se tratarán los equipos electrónicos de medición de componentes simétricas.

En este estudio se exponen los siguientes métodos para la determinación de las componentes simétricas de un sistema trifásico de voltaje y corriente:

- Medición Directa: En este caso se requieren instrumentos y aparatos especiales.

- Medición de Magnitudes de Fase y Línea: Con los valores de la medición obtenemos el punto de partida para la determinación de las componentes, por medio del cálculo o por construcción gráfica, mediante el correspondiente programa de computador.

2. INTRODUCCION

En 1918 Fortescue C.L. trabajó el método Componentes Simétricas; sin embargo, fueron necesarios aproximadamente 10 años, para que Wagner C.F. y Evans R.D. desarrollaran el método para ser utilizado satisfactoriamente en la práctica.

Con el método de Componentes Simétricas se introdujo la transformación de Componentes Simétricas en el estudio de la Teoría Generalizada de Máquinas Eléctricas y también se

facilitó el estudio de la asimetría en los sistemas eléctricos polifásicos. El análisis de los efectos de la asimetría eléctrica en las máquinas eléctricas es de suma importancia, pues dependiendo del grado o nivel de asimetría, así mismo se ve afectado el funcionamiento en estado estacionario y transitorio y, el grado de explotación de la máquina eléctrica.

De lo anterior podemos concluir, que además de tener el conocimiento para la realización de cálculos matemáticos, se hace necesario la comprensión física de lo que significa el método de Componentes Simétricas con el ánimo de lograr su mayor aprovechamiento en el análisis de problemas reales, ocasionados por la asimetría del sistema de voltaje y corriente e incluso, el ocasionado por los armónicos temporales del sistema.

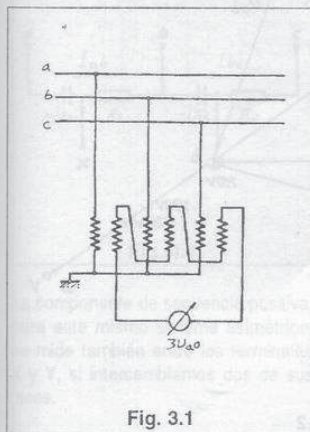
3. MEDICIÓN DIRECTA

3.1 Medición Directa de Secuencias de Voltaje

Secuencia Cero

$$\bar{U}_{a0} = 1/3 (\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c)$$

Esta medición se realiza mediante la conexión en delta-abierto del secundario del transformador de potencial. Ver fig. 3.1

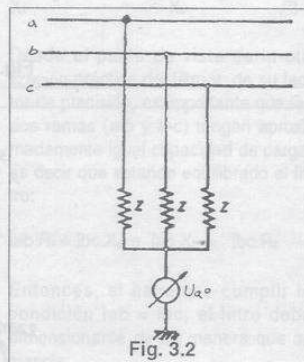


Energía y Computación, No.3. Primer Semestre 1992.

El punto de estrella debe ser conectado a tierra para garantizar el voltaje de fase correspondiente a cada columna del transformador.

Estos transformadores de medición, de secuencia cero, son de cinco columnas, para evitar que su impedancia varíe considerablemente.

Si en el sitio de la red, donde deseamos conocer el voltaje de secuencia cero, conectamos una estrella compuesta de autoimpedancias simétricas, entonces en el punto común de la estrella se presenta dicho voltaje. Ver fig. 3.2



Secuencia Positiva y Negativa. En principio la medición de estas componentes se realiza con base a las siguientes ecuaciones:

$$\bar{U}_a (+) = 1/3 (\bar{U}_a + a \bar{U}_b + a^2 \bar{U}_c)$$

$$\bar{U}_a (-) = 1/3 (\bar{U}_a + a^2 \bar{U}_b + a \bar{U}_c);$$

Ver fig. 3.3

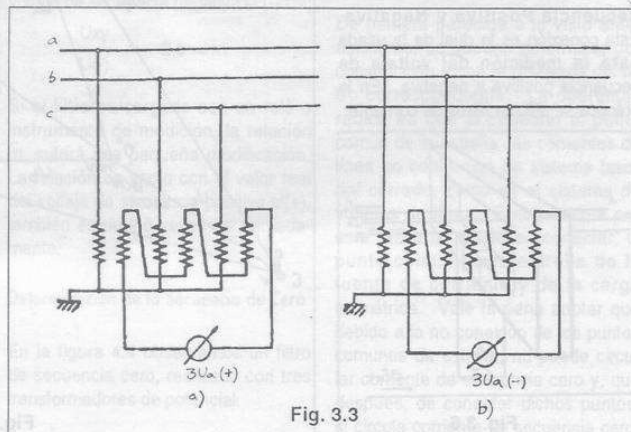
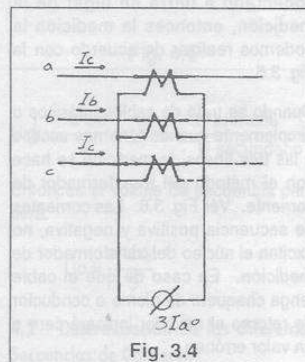
En la práctica la medición no se realiza de esta manera, sino con la conexión de diferentes circuitos de filtros. Más adelante los trataremos.

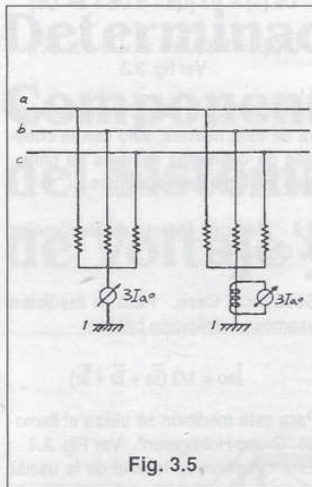
3.2 Medición Directa de Secuencias de Corriente

Secuencia Cero. Para la medición usamos su definición básica:

$$\bar{I}_{a0} = 1/3 (\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c)$$

Para esta medición se utiliza el llamado "Grupo Holmgreen". Ver Fig. 3.4. Esta conexión es la dual de la usada para la medición del voltaje de secuencia cero.

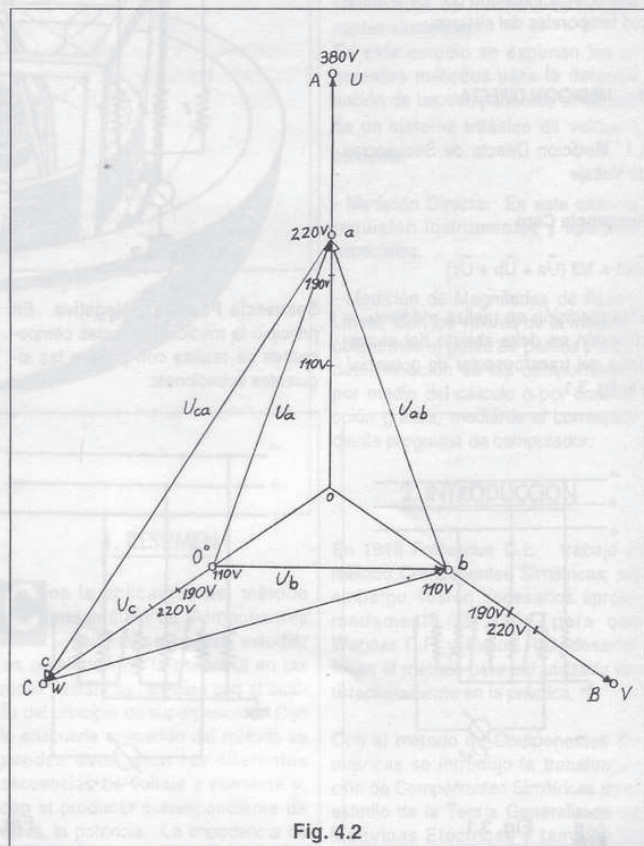
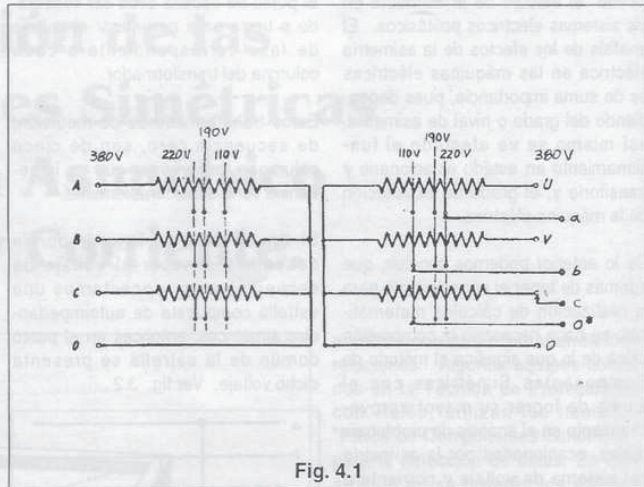
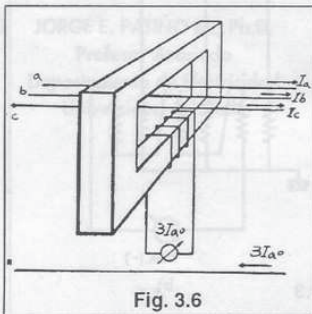




En caso de existir el punto de estrella conectado a tierra en lugar de la medición, entonces la medición la podemos realizar de acuerdo con la Fig. 3.5

Cuando se trata de cables trifásicos o simplemente cuando tenemos acceso a las tres líneas, la medición se hace con el método del transformador de corriente. Ver Fig. 3.6. Las corrientes de secuencia positiva y negativa, no excitan el núcleo del transformador de medición. En caso de que el cable tenga chaqueta de plomo o conductor de retorno el medidor indicará cero o un valor erróneo.

Secuencia Positiva y Negativa. Esta conexión es la dual de la usada para la medición del voltaje de secuencia positiva y negativa. En la práctica se utilizan filtros de corriente.



4. MEDICIÓN DE MAGNITUDES DE FASE Y LINEA

4.1 Determinación de las Diferentes Secuencias de voltaje

Podemos establecer un sistema asimétrico de voltaje con un transformador de múltiples terminales. Ver Fig. 4.1.

El diagrama fasorial del sistema asimétrico establecido se muestra en la Figura 4.2

Con el auxilio del fasímetro y la medición de los voltajes de fase elaboramos el diagrama de la figura anterior. A partir de este diagrama y con el método clásico, ya conocido, se pueden determinar las componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

Determinación de la Secuencia Positiva y Negativa con el Auxilio del Filtro.

Con la correcta selección de los valores de las resistencias y capacitancias, del filtro que se muestra en la Figura 4.6 y, conectando el sistema asimétrico de voltaje con los terminales a, b y c, obtenemos el voltaje proporcional a la secuencia negativa del sistema, entre los terminales X y Y.

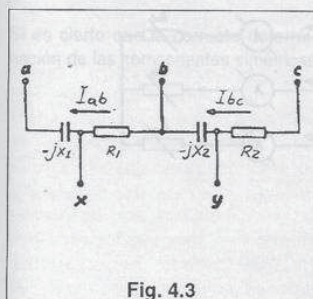


Fig. 4.3

La componente de secuencia positiva, para este mismo sistema asimétrico, se mide también entre los terminales X y Y, si intercambiamos dos de sus fases.

Si el voltaje medido entre los terminales X y Y, es realmente proporcional con el voltaje de secuencia negativa, entonces al conectar un sistema simétrico de voltaje en los terminales a, b y c, no debemos obtener voltaje en los terminales X y Y. Esta es la condición que va a determinar el correcto ajuste del filtro.

El filtro, entonces, se encontrará debidamente equilibrado cuando las resistencias variables R_1 y R_2 han sido ajustadas para $U_{xy} = 0$. Esto ocurre si:

$$\frac{R_1}{X_1} = \tan 60^\circ = \sqrt{3} \quad \text{y} \quad \frac{R_2}{X_2} = \tan 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Desde el punto de vista de la utilización práctica del filtro y, de su factor de precisión, es importante que las dos ramas (a-b y b-c) tengan aproximadamente igual capacidad de carga, es decir que estando equilibrado el filtro:

$$I_{ab} R_1 = I_{bc} X_2 \quad \text{e} \quad I_{ab} X_1 = I_{bc} R_2$$

Entonces, si hacemos cumplir la condición $I_{ab} = I_{bc}$, el filtro debe dimensionarse de tal manera que se cumpla:

$$R_1 = X_2 \quad \text{y} \quad X_1 = R_2$$

Después de examinar el filtro equilibrado obtenemos la relación entre el voltaje medido U_{xy} y valor real del voltaje de secuencia negativa $U(-)$:

$$\frac{U_{xy}}{U(-)} \approx 2,6 = m$$

Si el filtro es cargado con un relé o instrumento de medición, la relación m , sufrirá una pequeña modificación. La relación en vacío con el valor real del voltaje de secuencia positiva $U(+)$, también es de 2,6 veces aproximadamente.

Determinación de la Secuencia de Cero

En la figura 4.4 observamos un filtro de secuencia cero, realizado con tres transformadores de potencial.

Si la conexión del filtro es correcta, cuando conectemos un sistema simétrico de voltaje, el voltímetro conectado en los terminales X-Y indicará cero voltios: $U_{xy} = 0$. Al conectar el sistema asimétrico tendremos que:

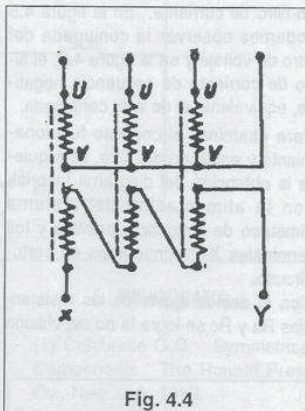


Fig. 4.4

$$U_{xy} = \frac{3 U_0}{a} ; \quad a = \frac{U \text{ primario}}{U \text{ secundario}}$$

Entonces el voltaje de secuencia cero será:

$$U_0 = \frac{a U_{xy}}{3}$$

4.2 Determinación de las Diferentes Secuencias de Corriente

De manera parecida a lo visto anteriormente, se pueden determinar por construcción y con la utilización del filtro correspondiente. La diferencia radica en que al conectar el punto común de la estrella, las corrientes de línea no conforman un sistema fasorial cerrado, como es el sistema de voltajes de línea. Precisamente por esta razón no se deben conectar, el punto común de la estrella de la fuente de corriente y de la carga asimétrica. Vale la pena anotar que debido a la no conexión de los puntos comunes de estrella, no puede circular corriente de secuencia cero y, que después, de conectar dichos puntos, sí circula corriente de secuencia cero,

entonces las otras dos componentes también cambiarán.

Determinación de la Secuencia Positiva y Negativa con el Auxilio del Filtro

Basados en el principio de la dualidad, el filtro de voltaje se transforma en filtro de corriente. En la figura 4.5 podemos observar la conjugada del filtro de voltaje y en la figura 4.6, el filtro de corriente de secuencia negativa, equivalente al de esta conjugada.

Para examinar el correcto funcionamiento y equilibrio del filtro, se requiere la obtención del diagrama fasorial, con la alimentación del sistema simétrico de secuencia positiva y los terminales X-Y conectados en cortocircuito.

Con el debido ajuste de las resistencias R_a y R_c se logra la no circulación

de corriente entre los terminales X-Y ($I_r = 0$). Con este ajuste se obtiene en el nodo X: $I_b + I_{Xa} + I_{Xc} = 0$.

$$I_{Xa} = \sqrt{3} \cdot I_{Xa} \text{ e } I_{Xc} = \sqrt{3} \cdot I_{Xc}$$

Si se conecta al filtro, así equilibrado, un sistema simétrico de secuencia negativa obtenemos la siguiente relación entre el valor medido $I_r = I_{Xy}$, y el valor real de la componente de secuencia negativa $I(-)$:

$$\frac{I_{Xy}}{I(-)} = \frac{3}{2} = m$$

La relación en vacío del filtro de voltaje ($m = 2.6$) corresponde a la relación en cortocircuito del filtro de corriente. Esto se puede comprobar si medimos la corriente que circula entre los terminales en cortocircuito XyY, cuando

conectamos a los terminales a, b, c un sistema simétrico de corriente, de secuencia negativa.

En la Figura 4.7 se muestra el esquema de conexiones para la medición en laboratorio de las componentes de secuencia positiva y negativa.

Determinación de la Secuencia Cero

La componente de secuencia cero es muy utilizada para activar protecciones e indicar fallas a tierra. El filtro de corriente de secuencia cero, el llamado "Grupo Holmgreen", al cual se hizo referencia anteriormente, para su correcto montaje y funcionamiento es necesario conocer los principios y fines del primario y secundario de los

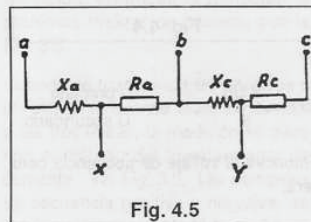


Fig. 4.5

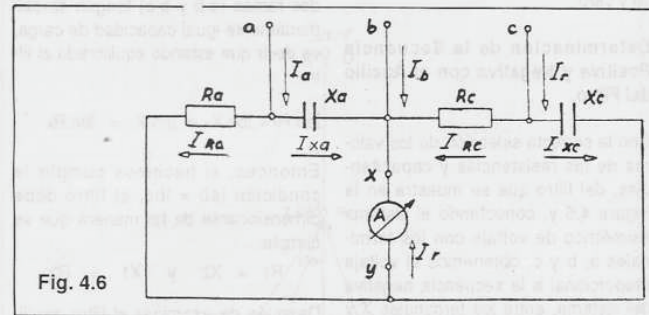


Fig. 4.6

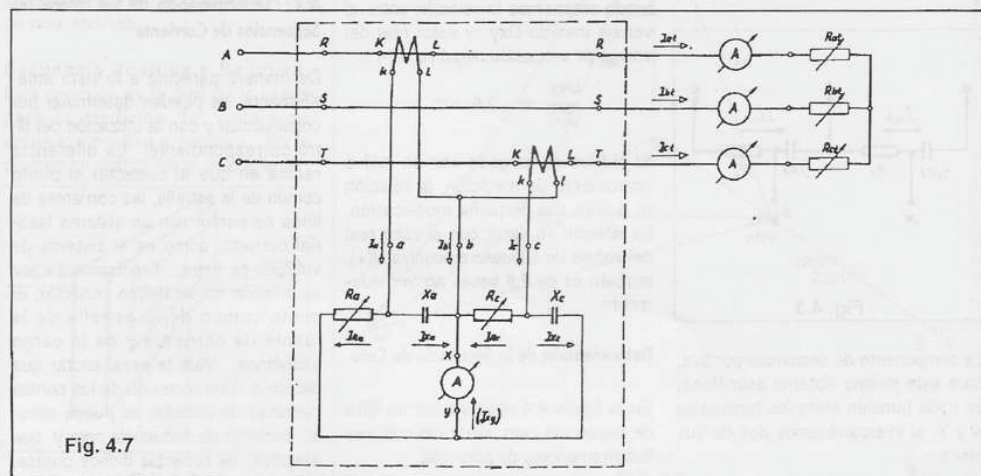


Fig. 4.7

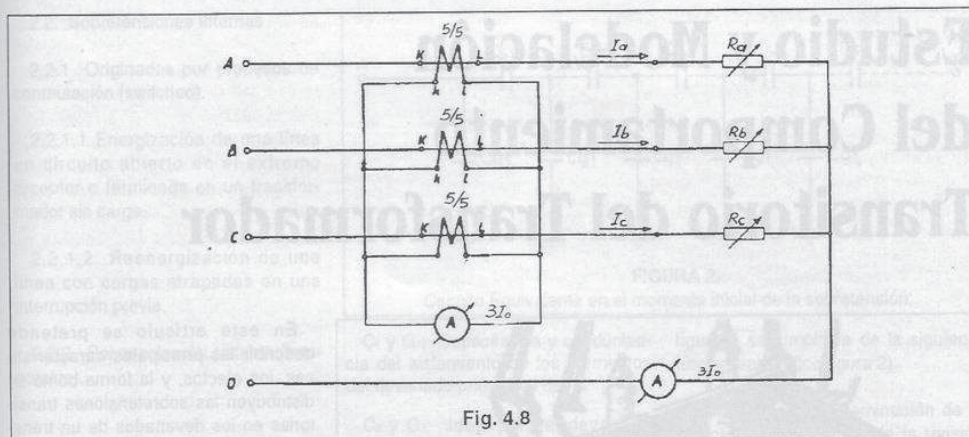


Fig. 4.8

transformadores de corriente utilizados.

En la Figura 4.8 se muestra el esquema de conexiones para la medición en laboratorio, de la componente de secuencia cero. En el esquema se han utilizado 3 transformadores de corriente de relación 5/5.

Existen muchos tipos de circuitos que se han desarrollado para la medición de componentes simétricas, entre ellos el sistema electrónico conformado por amplificadores operacionales.

5. CONCLUSION

Si es cierto que la correcta determinación de las componentes simétricas

de voltaje y corriente no constituyen un problema desconocido en la técnica de las mediciones eléctricas y el cálculo matemático, bien vale la pena, poder determinar con relativa precisión el nivel de asimetría al cual se encuentra trabajando una determinada carga, por ejemplo un motor eléctrico, un transformador etc. En la práctica no es extraño encontrar cargas conectadas a fuentes asimétricas, que a su vez sufren oscilaciones durante ciertos períodos, pudiendo llegar a ser críticas en el funcionamiento de ciertas cargas como son los motores eléctricos instalados a dichas fuentes.

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) Calabrese G.O.: Symmetrical Components. The Ronald Press Co., New York, 1959.
- (2) Protective Relays Application Guide. GEC - U.K., Segunda Edición, 1975.
- (3) Istvánfy Gy: Villamos Muszerek és Mérések. (Trad. "Mediciones e instrumentos de Medición"). Tankönyvkiado, Budapest, 1985.
- (4) Geszti P.O.: Villamos Energia Rendszerek. (Trad. "Sistemas de Energía Eléctrica").Tomo I, III. Tankönyvkiado, Budapest, 1986.