Para el transformador auxiliar:

$$I_{X_{Nom.}} = I_L = 2\,624 \text{ A} \quad *$$

$$V_{X_{Nom}} = V_{o'c} = V_L \cos 30^\circ$$

$$= 220\,(0.866) = 191 \text{ V} \quad *$$

$$V_{H_{Nom.}} = V_{oc} = 1100 \cos 30^\circ = 953 \text{ V} \quad *$$

$$a = \frac{V_H}{V_X} = \frac{953}{191} = 5 \quad *$$

$$I_{H_{Nom.}} = \frac{I_X}{a} = \frac{2\,624}{5} = 524.8 \text{ A} \quad *$$

$$S_{Nom} = 953\,(524.8) = 500 \text{ kVA} \quad *$$

Obsérvese lo siguiente:

$$\text{Factor de Servicio} = \frac{\text{Carga Utilizable}}{\text{Capacidad Instalada}}$$

$$F.S._{\text{conexión "T"}} = \frac{1\,000}{577 + 500} = 0.929$$

Recuérdese que para la conexión Δ abierta:

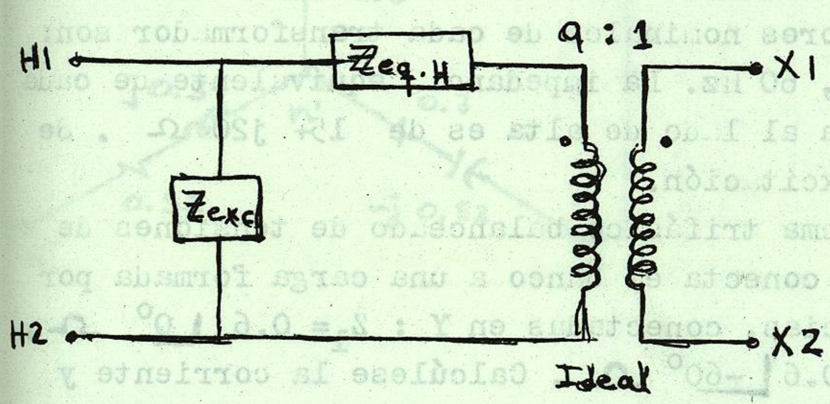
$$F.S. = \frac{58}{67} = 0.866$$

De lo que se concluye que mediante un diseno adecuado, la conexión T puede aprovechar casi la totalidad (92.9 %) de la capacidad de los transformadores, representando esto una ventaja sobre la conexión Δ abierta.

XXX

9.6 TRANSFORMADORES NO IDEALES EN SISTEMAS TRIFASICOS

Para el cálculo de circuitos trifásicos tomando en cuenta las impedancias del transformador, se hace uso del circuito equivalente de la Fig. 23, existiendo uno para cada par de devanados acoplados. Las impedancias pueden referirse al primario o secundario, según convenga, mediante las fórmulas de transformación del Art. 5.4.3. En determinados cálculos suele despreciarse la rama de excitación. Obsérvese que la rama de excitación se coloca directamente frente a los terminales de entrada, despreciando el efecto de la resistencia y reactancia de dispersión del primario sobre ésta. La Fig. 24 ilustra los circuitos equivalentes trifásicos.



$$Z_{exc} = r_c + j\,X_m$$

$$Z_{eq.H} = (R_H + a^2 R_X) + j(X_{LH} + a^2 X_{LX})$$

Fig. 23 Circuito equivalente monofásico.

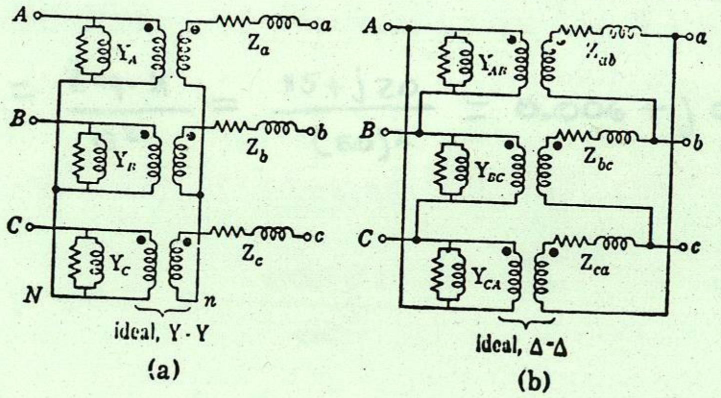


Fig. 24 Circuitos equivalentes trifásicos.

Para el cálculo de circuitos trifásicos desbalanceados sin maquinaria rotativa pueden utilizarse las técnicas convencionales: análisis de mallas, análisis de nodos, transformación de fuentes, etc. Para circuitos desbalanceados con máquinas rotativas (generadores y motores sincrónicos) se utiliza el método de las Componentes simétricas; la demostración y aplicación de este método se posterga a un curso de Análisis de Sistemas de Potencia. Para el cálculo de circuitos trifásicos balanceados se expondrá más adelante un método práctico que evita el análisis de las tres fases a la vez.

Considérese el siguiente ejemplo, que pone de manifiesto la propiedad de "neutro flotante" de la conexión Y-Y no aterrizada.

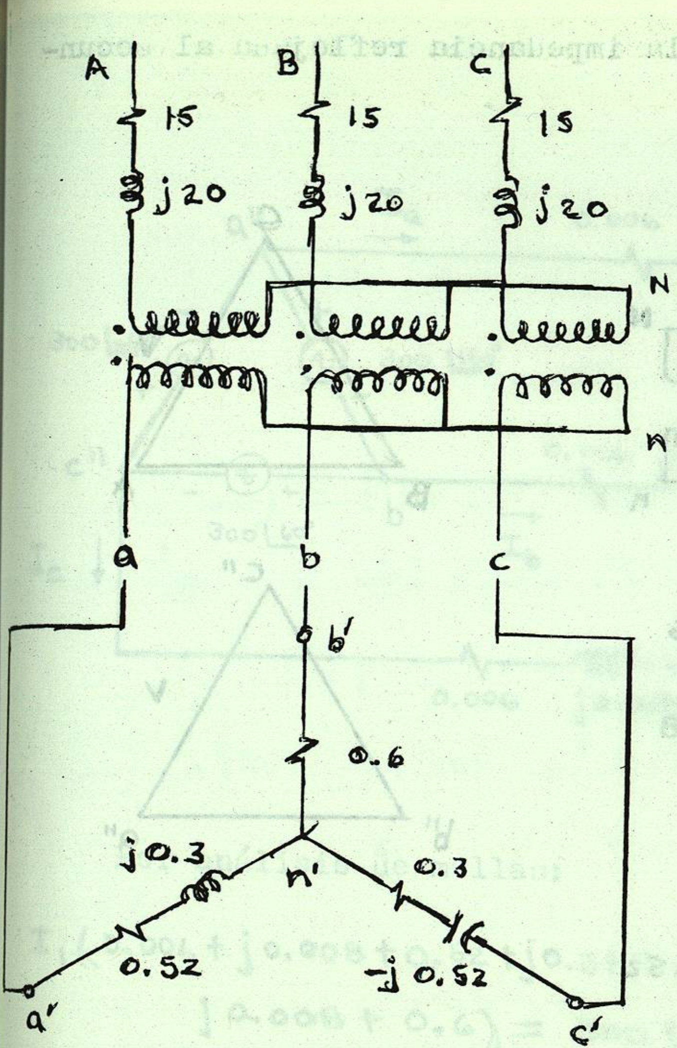
EJEMPLO 11

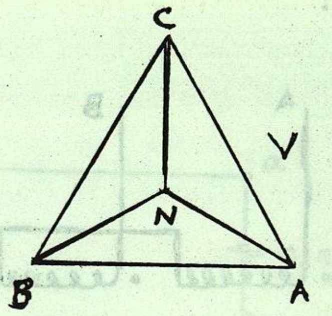
Se conectan tres transformadores idénticos en Y-Y con neutros aislados. Los valores nominales de cada transformador son: 100 KVA, 11 500: 230 V, 60 Hz. La impedancia equivalente de cada transformador, referida al lado de alta es de 15+ j20 Ω . Se desprecia la rama de excitación.

Se aplica un sistema trifásico balanceado de tensiones de línea de 15 000 V y se conecta el banco a una carga formada por las siguientes impedancias, conectadas en Y : $Z_1 = 0.6 \angle 0^{\circ}$ Ω, $Z_2 = 0.6 \angle 30^{\circ}$ Ω, $Z_3 = 0.6 \angle -60^{\circ}$ Ω. Calcúlese la corriente y la tensión en cada rama de la carga. Secuencia ABC.

SOLUCION

Circuito equivalente:



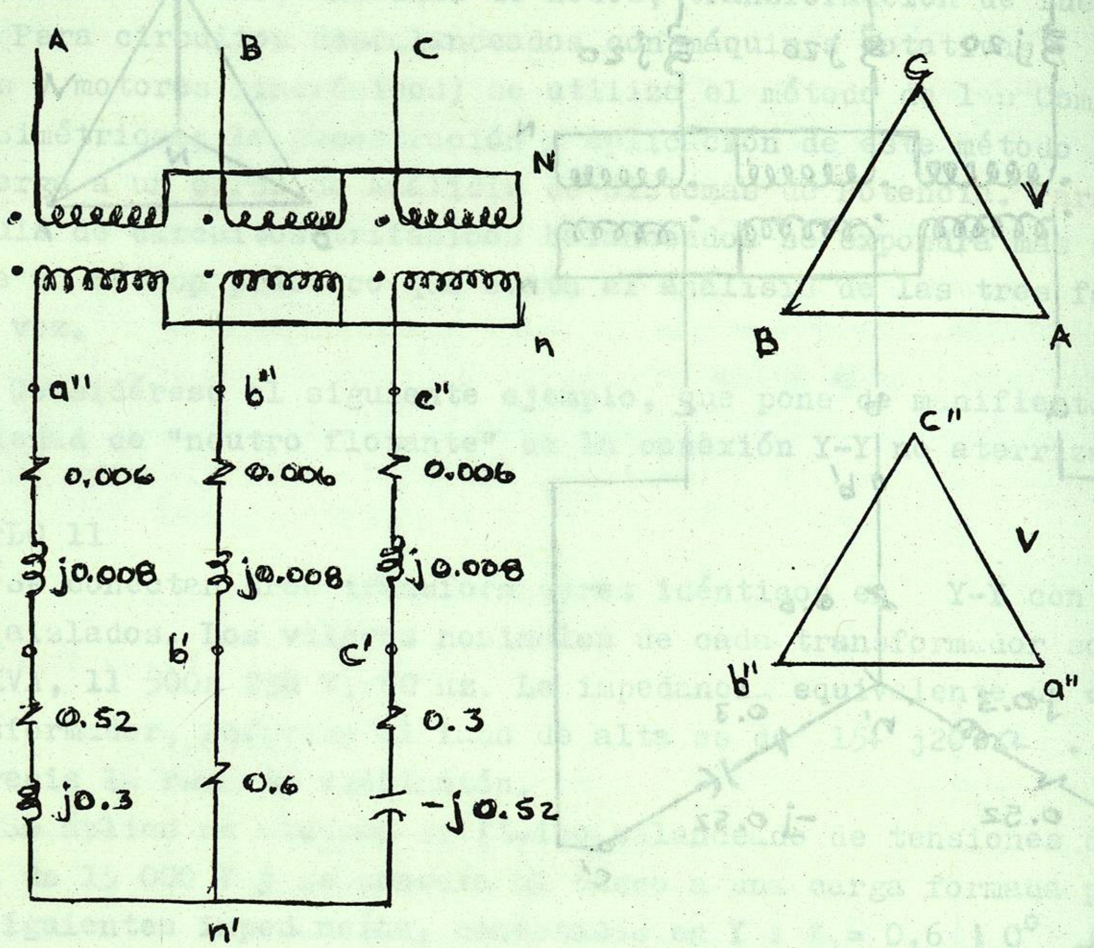


$$a = \frac{V_{H\,Nom.}}{V_{X\,Nom.}} = \frac{11\,500}{230} = 50$$

Impedancia de cada transformador reflejada al lado de B.T.:

$$Z_{eq.x} = \frac{Z_{eq.H}}{a^2} = \frac{15+j20}{(50)^2} = 0.006 + j\,0.008 \ \Omega$$

Circuito equivalente con la impedancia reflejada al secundario:

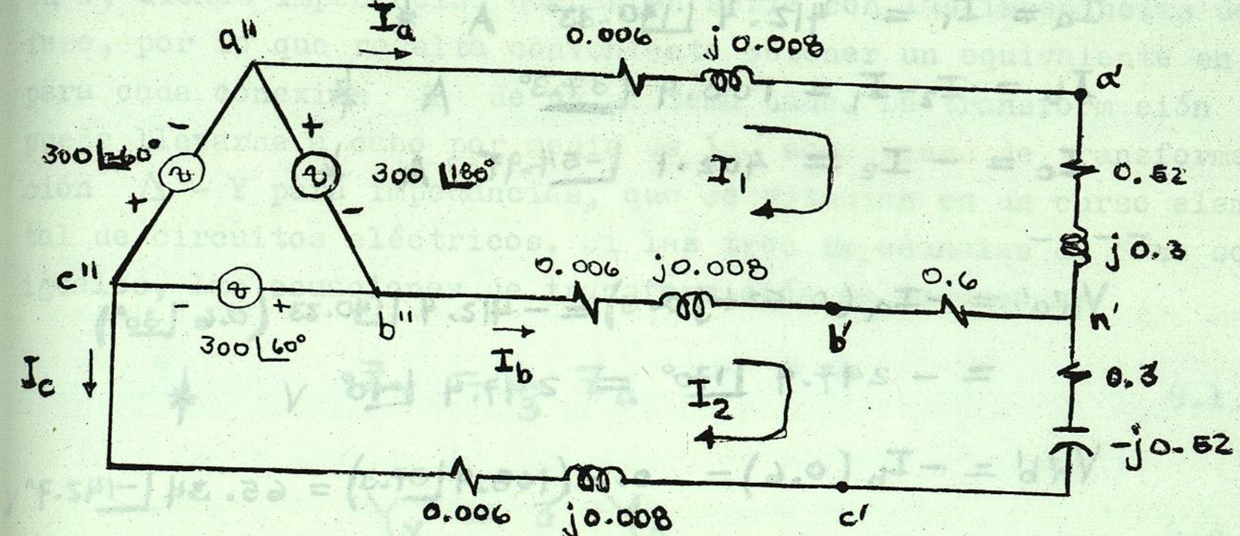


(Se utiliza la doble prima ('') para indicar que son nodos internos al transformador, ya que están situados antes de la impedancia equivalente. Los nodos a, b, c siguen coincidiendo con a', b', c'; pero ya no resulta de utilidad el incluirlos).

El sentido de las tensiones del primario se toma arbitrariamente en el orden AB, BC, CA. Como las tensiones de línea del primario están balanceadas, las tensiones $V_{a''b''}$, $V_{b''c''}$, $V_{c''a''}$ también lo estarán. Substituyéndolas por fuentes de tensión:

$$V_{\text{Línea } X} = \frac{V_{\text{Línea } H}}{a} = \frac{15000}{50} = 300 \text{ V}$$

(Esto es una simple reflexión de tensiones de línea, de primario a secundario).



Por análisis de mallas:

$$I_1(0.006+j0.008+0.52+j0.3+0.006+j0.008+0.6)-I_2(0.006+j0.008+0.6)=300\angle 180^\circ$$

$$I_1(1.132+j0.316)-I_2(0.606+j0.008)=300\angle 180^\circ \qquad (1)$$

$$I_2(0.006+j0.008+0.6+0.3-j0.52+j0.008+0.006)-I_1(0.006+j0.008+0.6)=300\angle 60^\circ$$

$$I_2(0.912-j0.504)-I_1(0.606+j0.008)=300\angle 60^\circ \qquad (2)$$

De la resolución de (1) y (2), se obtiene:

$$I_1 = 412.4\angle 40.33^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = 402.1\angle 125.03^\circ \text{ A}$$

De donde:

$$I_a = I_1 = 412.4 \angle 140.33^\circ \ A \ *$$

$$I_b = I_2 - I_1 = 108.9 \angle 37.3^\circ \ A \ *$$

$$I_c = -I_2 = 402.1 \angle -54.97^\circ \ A \ *$$

$$V_{n'a'} = -I_a(0.52 + j0.3) = -412.4 \angle 140.33 \, (0.6 \angle 30^\circ)$$

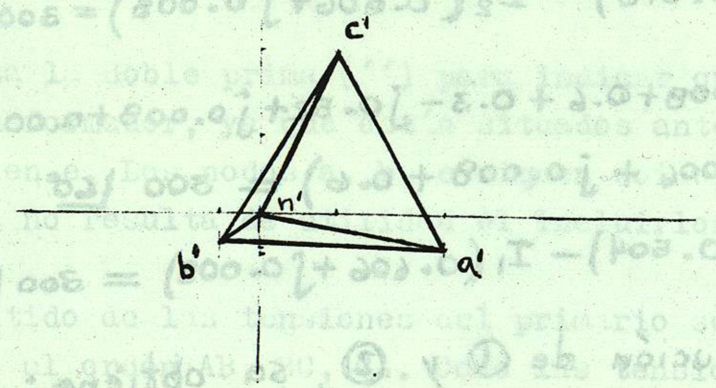
$$= -247.4 \angle 170^\circ = 247.4 \angle -10^\circ \ V \ *$$

$$V_{n'b'} = -I_b(0.6) = -0.6\,(108.9 \angle 37.3) = 65.34 \angle -142.7^\circ \ V$$

$$V_{n'c'} = -I_c(0.3 - j0.52) = -402.1 \angle -54.97^\circ \, (0.6 \angle -60^\circ)$$

$$= 241.3 \angle 65.03^\circ \ V \ *$$

Haciendo un esquema simple de la carga:



Escala:
1 cm = 100 Volts

Quedando manifiesto el sensible desplazamiento del punto neutro.

xxx

A menudo deben incluirse en los cálculos de sistemas de potencia las impedancias de la línea de transmisión. En una conexión en Y, dichas impedancias quedan en serie con las impedancias de fase, por lo que resulta conveniente obtener un equivalente en Y para cada conexión Δ de un sistema dado. La transformación puede llevarse a cabo por medio de las ecuaciones de transformación Δ - Y para impedancias, que se estudian en un curso elemental de circuitos eléctricos. Si las tres impedancias de fase son iguales, las ecuaciones de transformación se reducen a:

$$Z_Y = \frac{1}{3} Z_\Delta \qquad 9.1$$

$$Y_Y = 3\, Y_\Delta \qquad 9.2$$

Los subíndices Y y Δ indican respectivamente que se trata de la impedancia o admitancia de fase de la conexión en Y y de la conexión en Δ. Cuando la transformación se aplica a un banco de transformadores $\Delta - \Delta$, las relaciones de fase de las tensiones de la conexión Y-Y equivalente se conservan; pero cuando la transformación se aplica a un banco Y-Δ o Δ-Y las relaciones de fase de las tensiones no son las mismas en la conexión Y-Y equivalente. Esto se debe a que mientras en las conexiones $\Delta - \Delta$ y Y-Y las tensiones de línea correspondientes de primario y secundario están en fase (véase las Figs. 10 y 12 de este capítulo), en las conexiones Δ-Y o Y-Δ se desfasan en 30° o 150° (Figs. 14 y 16). Sin embargo, las relaciones de magnitudes sí se conservan y usualmente se hace el análisis haciendo caso omiso de la alteración mencionada para calcularlas. Por supuesto, cuando se trata de interrelacionar dos sistemas, como en un emparalelamiento, por ejemplo, deben aplicarse las correcciones pertinentes a fin de evitar posibles corto-circuitos.

Cuando se hace el análisis de circuitos trifásicos BALANCEADOS, las características de tensión y corriente son las mismas para las tres fases, salvo en el desplazamiento angular de 120° entre sí. A fin de simplificar el análisis, usualmente se hace el