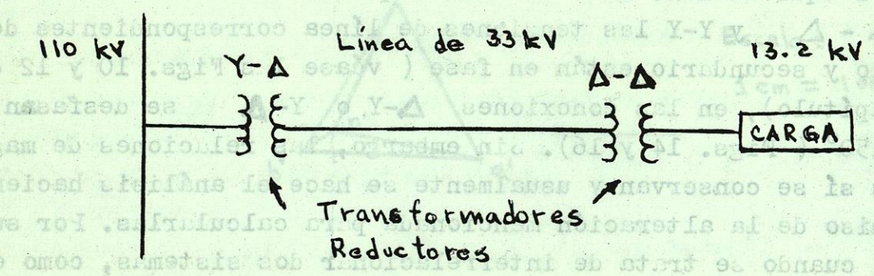
cálculo para una sola fase, con todas las conexiones en Y, de tal forma que las impedancias puedan ser sumadas directamente y se obtengan rápidamente las magnitudes de tensiones, corrientes y potencias en los elementos.

Si un sistema en Y está balanceado (tensiones y cargas equilibradas) todos los puntos neutros de las conexiones Y estarán al mismo potencial y por lo tanto puede suponérseles virtualmente unidos entre sí. Se ve entonces que puede hacerse el análisis para una sola fase de la Y, suponiendo que se cierra el circuito a través de los puntos neutros imaginariamente interconectados. El problema se convierte entonces en un simple análisis de circuitos monofásicos. Debe tomarse en cuenta que el sistema es en realidad trifásico al momento de calcular la potencia de cada elemento, recordando que para un sistema trifásico balanceado la potencia trifásica es igual a tres veces la potencia de fase.

El siguiente es un ejemplo completo del análisis de cargas de un circuito equilibrado.

EJEMPLO 12

Considérese el circuito trifásico representado en el siguiente esquema:



El circuito comprende un banco Δ-Y de tres transformadores monofásicos de 1 000 KVA, 63 500:33 000, conectados por sus primarios a las líneas de 110 000 V de una subestación ($V_{nominal}$ = 110 KV). Los secundarios de este banco entregan potencia a un banco Δ - Δ de tres transformadores de 1 000 KVA, 33 000:13 200 V a través de una línea de transmisión.

Determínese la tensión que se requiere en las barras de 110 KV NOMINALES para mantener la tensión nominal de 13 200 V en la carga, siendo ésta de 3 000 KVA, FP=1, trifásica equilibrada.

La impedancia de la línea de transmisión es de 7.3+j18.2 Ω por fase. La impedancia equivalente de cada uno de los transformadores conectados en Δ - Δ es de 1.71+j9.33 Ω, referida al lado de baja tensión. Su pérdida de núcleo es de 5.6 KW por cada transformador. La potencia reactiva magnetizante es de 51 KVAR, cada transformador.

Para cada transformador del banco Y- Δ se tienen los siguientes valores promedio de las pruebas de corto circuito y de vacío:

Ensayo en circuito abierto:	Ensayo en corto circuito:
V = 33 000 V	V = 2 640 V
I = 1.24 A	I = 30.3 A
P = 5.3 kW	P = 9.81 kW

Realizadas en el lado de baja tensión y a frecuencia nominal.

SOLUCION

Puede parecer poco claro el planteamiento de este problema, ya que se dice que las barras de alimentación trabajan a 110 KV nominales, y luego se pregunta por la tensión en éstas que sostiene 13.2 KV en la carga. Los valores nominales de un dispositivo son los valores de diseño óptimo, y no siempre coinciden con los que se aplican en la práctica, por lo que dicho dispositivo debe ser capaz de tolerar ciertas desviaciones. Los motivos para que esto ocurra son diversos; en el caso de este problema, la tensión de 110 KV aplicada en la línea de muy alta tensión hace aparecer una tensión de 13.2 KV a la salida del segundo banco de transformadores, si no hay carga. Sin embargo, si se aplica la carga, la

caída de tensión por las impedancias internas y de la línea de transmisión hace que la tensión en la carga disminuya. Se pregunta entonces por la tensión que aplicada a los bornes de 110 KV nominales (obviamente mayor de 110 KV) mantiene en la carga los 13.2 KV nominales. (Para otra forma de mantener la tensión aproximadamente constante, véase el artículo 7).

a) Circuito equivalente Y-Y para el banco de transformadores Y-Δ .

Parámetros de cada transformador de acuerdo a las pruebas de vacío y corto circuito:

$$Z_{eq.x} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{2640}{30.3} = 87.13\ \Omega$$

$$R_{eq.x} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} = \frac{9.81\times10^3}{(30.3)^2} = 10.69\ \Omega$$

$$X_{Leq.x} = \sqrt{Z_{eq.x}^2 - R_{eq.x}^2} = \sqrt{(87.13)^2 - (10.69)^2}$$

$$= 86.47\ \Omega$$

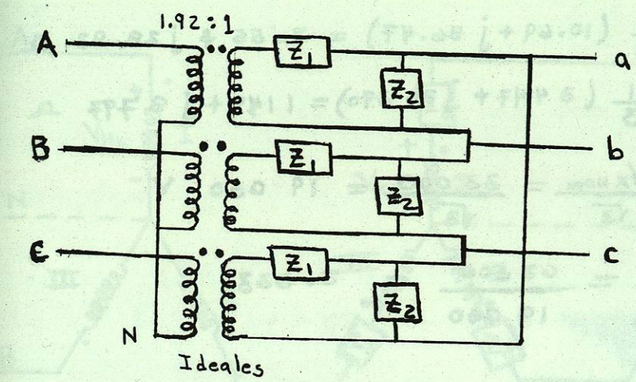
$$r_{cx} = \frac{P_V}{I_V^2} = \frac{5.3\times10^3}{(1.24)^2} = 3447\ \Omega$$

$$X_{Lmx} = \sqrt{\left(\frac{V_V}{I_V}\right)^2 - r_{cx}^2} = \sqrt{\left(\frac{33000}{1.24}\right)^2 - (3447)^2}$$

$$= 26\ 390\ \Omega$$

$$a = \frac{V_{Nom.H}}{V_{Nom.x}} = \frac{63\ 500}{33\ 000} = 1.92$$

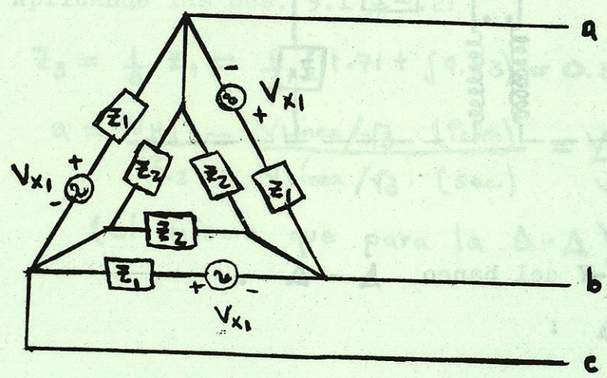
Circuito equivalente Y- Δ :



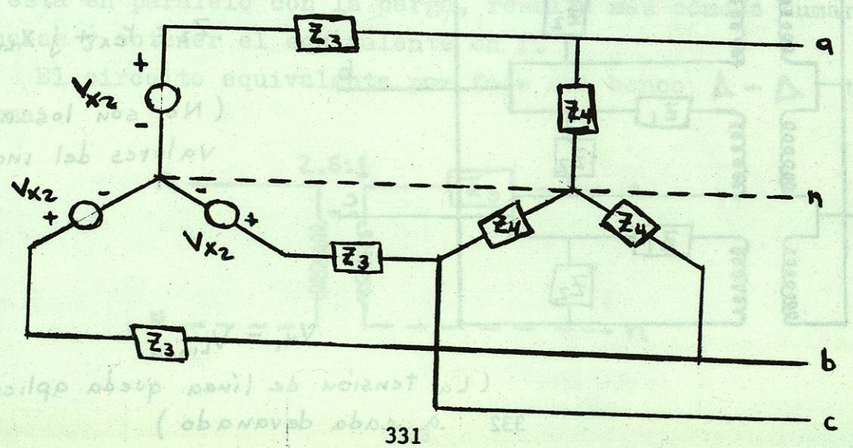
$Z_1 = R_{eq.x} + j\,X_{Leq.x}$

$Z_2 = r_{cx} + j\,X_{Lmx}$

Dibujando únicamente los secundarios, a fin de visualizar mejor las conexiones:



Equivalente conectado en Y:



Aplicando las Ecs. 9.1 y 9.2:

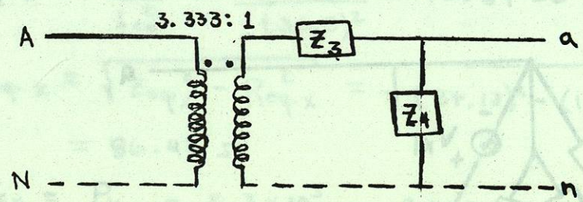
$$Z_3 = \frac{1}{3} Z_1 = \frac{1}{3}(10.69 + j\,86.47) = 3.56 + j\,28.82\ \Omega$$

$$Z_4 = \frac{1}{3} Z_2 = \frac{1}{3}(3\,447 + j\,26\,390) = 1\,149 + j\,8\,797\ \Omega$$

$$V_{X2} = \frac{V_{X1}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{X\,Nom}}{\sqrt{3}} = \frac{33\,000}{\sqrt{3}} = 19\,050\ V$$

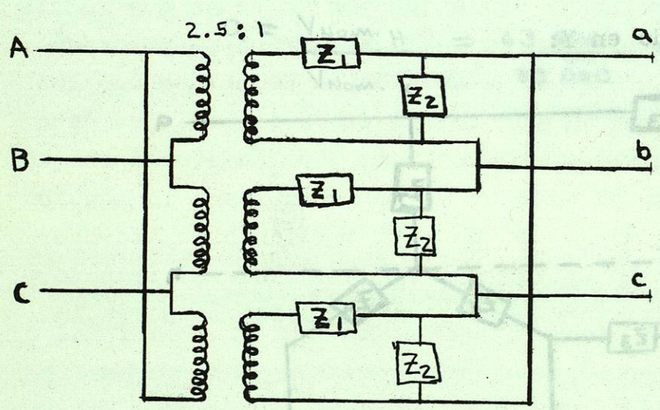
$$\therefore\ a = \frac{V_{H\,Fase}}{V_{X\,Fase}} = \frac{63\,500}{19\,050} = 3.333$$

Quedando el circuito equivalente para una fase:



b) Equivalente Y-Y del banco Δ - Δ .

Circuito Δ - Δ :



$Z_1 = R_{eq_x} + j\,X_{Leq.x}$

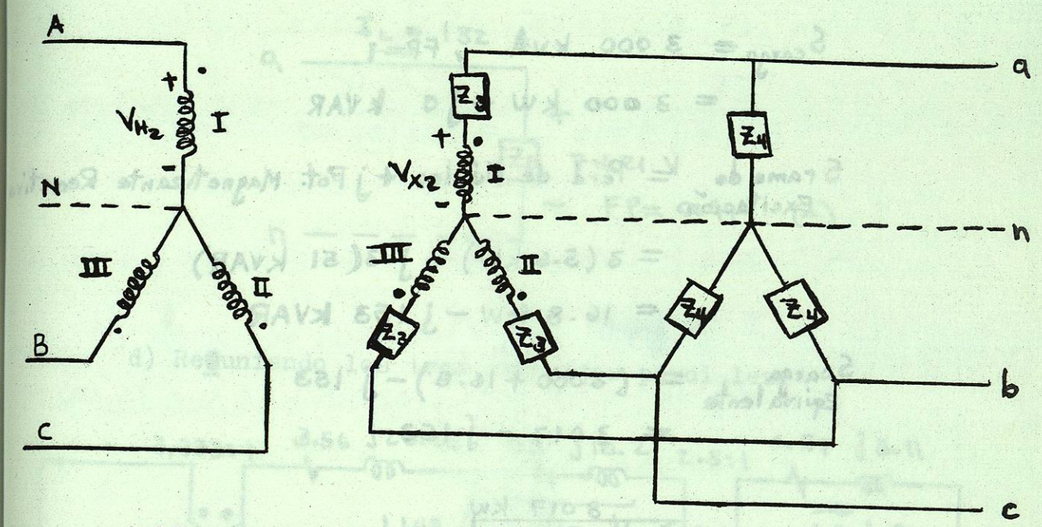
$Z_2 = r_{c_x} + j\,X_{Lm_x}$

(No son los mismos valores del inciso c).

$V_{H_1} = V_{Línea}$

(La tensión de línea queda aplicada a cada devanado)

Circuito equivalente en Y-Y:



Aplicando las Ecs. 9.1 y 9.2:

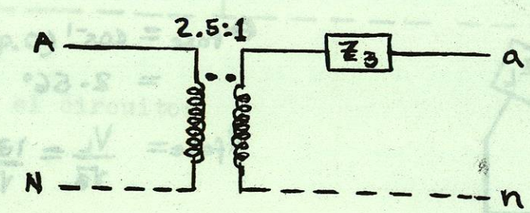
$$Z_3 = \frac{1}{3} Z_1 = \frac{1}{3}(1.71 + j\,9.33) = 0.57 + j\,3.11\ \Omega$$

$$a = \frac{V_{H2}}{V_{X2}} = \frac{V_{Línea}/\sqrt{3}\ (Prim)}{V_{Línea}/\sqrt{3}\ (Sec.)} = \frac{V_{L\,prim}}{V_{L\,sec.}} = 2.5$$

(el mismo que para la Δ-Δ).

Nótese que al conocer la potencia de la Y de excitación, y estando ésta en paralelo con la carga, resulta más cómodo sumar sus potencias y obtener el equivalente en Y.

El circuito equivalente por fase del banco Δ - Δ toma la forma:

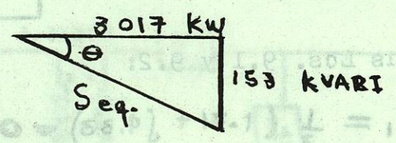


c) Equivalente de la carga más la rama de excitación del secundario del banco $\Delta - \Delta$:

$$S_{carga} = 3\,000 \text{ kVA}, \quad FP = 1$$
$$= 3\,000 \text{ kW} + j0 \text{ kVAR}$$

$$S_{\substack{rama\ de \\ Excitación}} = \text{Pérd. de Núcleo} + j \text{ Pot. Magnetizante Reactiva}$$
$$= 3(5.6 \text{ kW}) - j\,3(51 \text{ kVAR})$$
$$= 16.8 \text{ kW} - j\,153 \text{ kVAR}$$

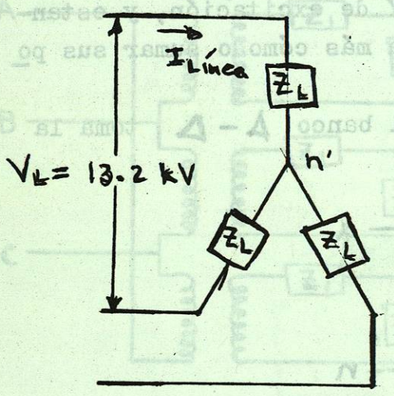
$$S_{\substack{carga \\ Equivalente}} = (3000 + 16.8) - j\,153$$
$$= 3017 - j\,153$$



$$S_{eq.} = \sqrt{(3017)^2 + (153)^2} = 3\,021 \text{ kVA}$$

$$FP = \frac{3017}{3021} = 0.999 \quad (-)$$

Circuito Y equivalente:

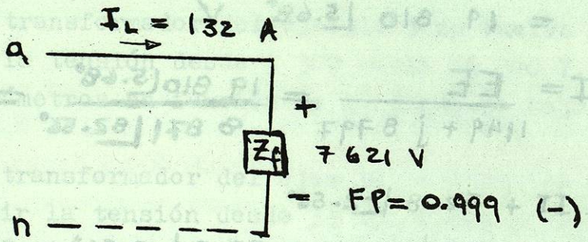


$$I_{Línea} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}\,V_L} = \frac{3\,021}{\sqrt{3}\,(13.2)}$$
$$= 132 \text{ A.}$$

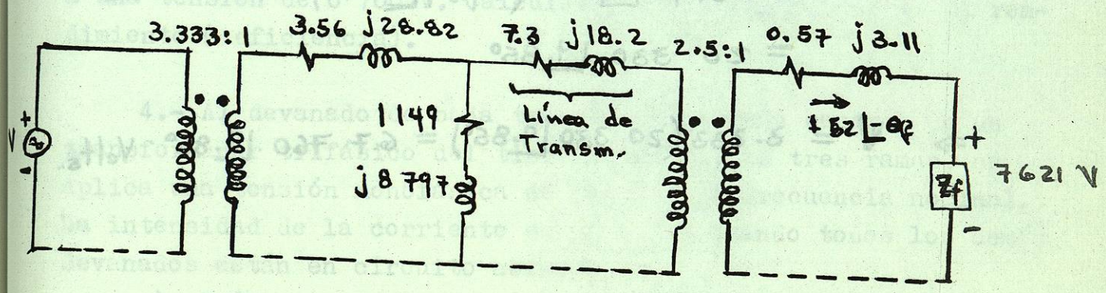
$$\theta_{fase} = \cos^{-1}(0.999)$$
$$= 2.56° \quad (-)$$

$$V_{fase} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{13.2}{\sqrt{3}} = 7.621 \text{ kV}$$

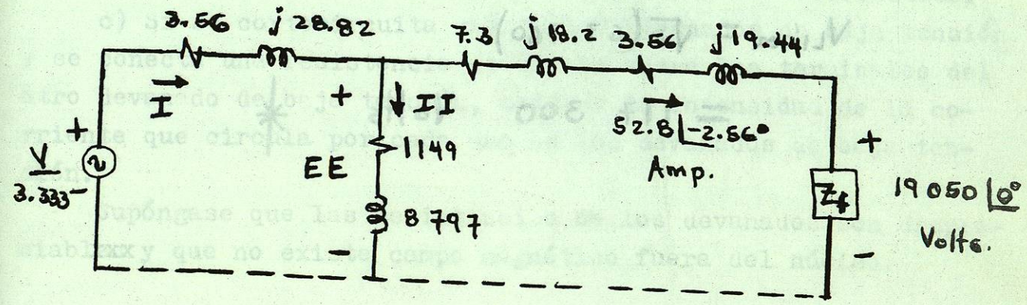
Circuito equivalente para una sola fase:



d) Reuniendo los tres circuitos parciales:



Reflejando las cantidades a la parte central y tomando como referencia fasorial el voltaje en la carga:



Resolviendo el circuito: