CAPITULO 5: TRANSFORMADORES.

5.1. CONSIDERACIONES PRELIMINARES.

Los transformadores son los dispositivos que enlazan los generadores con las líneas de transmisión y éstas con otras que operan a diferentes tensiones. Los transformadores, en un sistema eléctrico de potencia, se pueden clasificar en transformadores de generadores; de transmisión y de control.

Los primeros se utilizan para elevar la tensión, desde el nivel de generación al de transmisión. En el S.I.C. (Sistema Interconectado Central) los valores más empleados en la generación son 12,5; 13,2 y 13,8 [kV].

Los transformadores de transmisión, se emplean para modificar los valores de la tensión entre los distintos niveles normalizados de transmisión. De acuerdo a lo revisado anteriormente, la transmisión en Chile opera en 66; 110; 154; 220 y 500 [kV].

Los transformadores de control, se usan fundamentalmente para regular el flujo de potencias activa y reactiva en las líneas de un sistema.

Con el objeto de resolver problemas específicos, es necesario disponer de modelos adecuados para representar los transformadores trifásicos según sus diversas condiciones de operación. Usualmente los modelos corresponden a circuitos equivalentes que facilitan los cálculos y análisis. En particular interesan los circuitos equivalentes en “tanto por uno” (p.u.) y las redes de secuencia de los transformadores de dos y tres enrollados. En este capítulo, se analizarán los circuitos equivalentes en p.u. y las redes de secuencia se examinarán en forma posterior. En atención a estas consideraciones revisaremos inicialmente el sistema en por unidad.

5.2: EL SISTEMA EN “POR UNIDAD”.

Es un sistema adimensional en el que se expresan las cantidades eléctricas; V; I; Z; S, etc., como una proporción de magnitudes base o referencias apropiadas.

A primera vista, este método de cálculo puede aparecer como una complicación innecesaria, pero en la práctica tiene decididas ventajas como las siguientes:

- Existen menos posibilidades de error por mezclar tensiones fase neutro con tensiones entre fases; potencias monofásicas con potencias trifásicas y tensiones primarias con secundarias en el caso de haber transformadores.
- Simplifica los cálculos cuando hay varios transformadores, puesto que se elimina la necesidad de referir cantidades de un lado al otro de cada transformador. En particular, las impedancias en p.u.; si se expresan en una base adecuada, son idénticas referidas a uno u otro lado de un transformador. Este hecho no se ve afectado por la conexión de los enrollados (Δ, Y; etc.).
- Los valores en p.u. dan información sobre magnitudes relativas que es muy útil. Por ejemplo, las impedancias de los componentes de un SEP, expresadas en p.u.; b.p. (base propia) están circunscritos a un rango bastante estrecho, lo que facilita su verificación y permite usar valores supuestos cuando no se dispone de valores exactos.
- El sistema en p.u. es indispensable para trabajos en el A.R.C.A. (Analizador de Redes de Corriente Alterna) ya que estos son fabricados cubriendo un rango muy específico de impedancias. Esto obliga a trabajar con sistemas escalados en cuanto a las magnitudes de parámetros y variables. Esta última ventaja resulta cada día menos significativa, dado que los computadores digitales se han popularizado grandemente en desmedro de las máquinas analógicas.

5.2.1: Circuitos Monofásicos: Las variables de circuitos; V; I; S; Z; son cantidades relacionadas entre sí, de manera que con fijar dos cantidades base, quedan automáticamente determinados las otras dos. Usualmente se emplea la tensión expresada en [kV] y la potencia aparente en [MVA] como bases de referencia, por lo que las bases de corriente en [A] e impedancia en [Ω] deben expresarse en función de las primeras. Así se tiene:

$$I_B = \frac{S_B}{V_B} = \frac{kVA_B}{kV_B} = \frac{MVA_B}{kV_B} * 10^3 \quad [A] \tag{5.1}$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B} = \frac{kV_B}{I_B} * 10^3 = \frac{(kV)_B^2}{kVA_B} * 10^3 = \frac{(kV)_B^2}{MVA_B} \quad [\Omega] \tag{5.2}$$

Conviene hacer presente que las cantidades base son escalares y por tanto ocurre que:

$$\begin{aligned} R_B &= X_B = Z_B \\ P_B &= Q_B = S_B \end{aligned} \tag{5.3}$$

5.2.1.1: Redes con Transformador: Recordemos que el circuito equivalente de un transformador, despreciando la corriente de excitación, es el que se muestra en la figura siguiente:

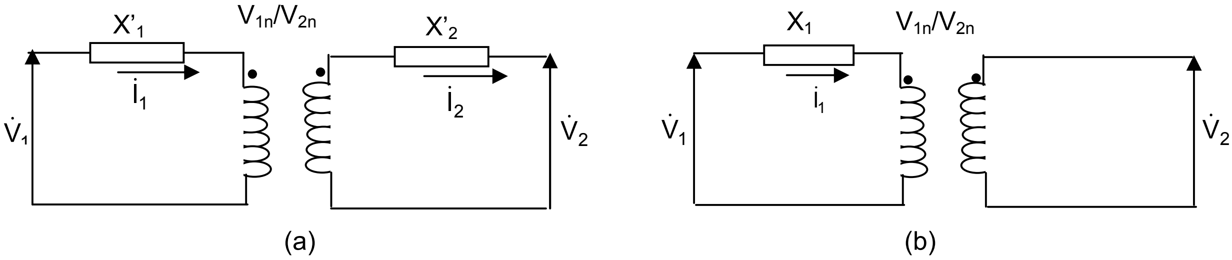


Figura 5.1 a): Circuito Equivalente de un Transformador b): El Mismo Circuito Equivalente Referido al Primario

El estudio normal de un circuito de este tipo presenta el inconveniente de mantener siempre el transformador ideal de razón V_{1n}/V_{2n}, lo que obliga a transferir toda la información desde un lado al otro. La figura 5.1 b) muestra todo el sistema referido al primario, de modo que:

$$X_1 = X'_1 + X'_2\left(\frac{V_{1n}}{V_{2n}}\right)^2 \tag{5.4}$$

Del circuito 5.1 b):

$$\dot{V}_1 - \dot{I}_1\, j\, X1 = \dot{V}_2\left(\frac{V_{1n}}{V_{2n}}\right) \tag{5.5}$$

Si se dividen ambos miembros por V_{1n}, se tiene:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_{1n}} - \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_{1n}}\, j\, \frac{X_1}{\frac{\dot{V}_{1n}}{\dot{I}_{1n}}} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_{2n}} \tag{5.6}$$

Como V_{1n}/I_{1n}, corresponde a la impedancia base del lado primario:

$$\dot{V}_1(pu_1) - j\,\dot{I}_1(pu_1)X_1(pu_1) = \dot{V}_2\,(pu_2) \tag{5.7}$$

Donde los subíndices que acompañan a pu, corresponden al lado correspondiente del transformador tomado como base. Nótese que el transformador ideal ha desaparecido.

Desde el punto de vista de la representación circuital, se tiene:

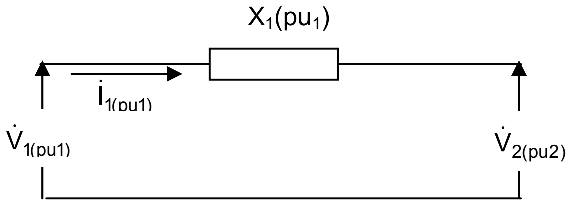


Figura 5.2: Representación Circuital del Transformador en p.u. Referido al Primario

Por otra parte, resulta independiente referir las impedancias del primario al secundario. Consideremos X_1, medida en $[\Omega]$; una reactancia ubicada en el primario. Si se refiere al secundario tendrá un valor:

$$X_2[\Omega] = X_1[\Omega]\left(\frac{V_{2n}}{V_{1n}}\right)^2 \tag{5.8}$$

Expresada en p.u., base secundaria será

$$X_2(pu_2) = \frac{X_2[\Omega]}{\frac{V_{2n}^{\ 2}}{S_n}} = \frac{X_1[\Omega]\left(\frac{V_{2n}}{V_{1n}}\right)^2}{\frac{V_{2n}^{\ 2}}{S_n}} = \frac{X_1[\Omega]}{\frac{V_{1n}^{\ 2}}{S_n}} = X_1(pu_1) \tag{5.9}$$

5.2.1.2: Caso General: La manera de trabajar la situación se explicitará a través del sistema que se muestra en la figura 5.3; con 2 transformadores T_1 y T_2 que conectan 3 redes diferentes: I; II; y III.-

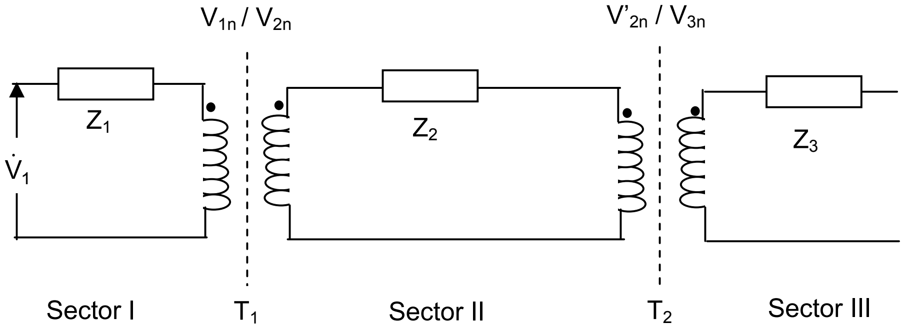


Figura 5.3: Red con Tres Sectores Unidos por Transformadores.

El procedimiento a seguir se ilustra en la siguiente secuencia:

i. Se elige una potencia base común a todo el sistema S_B. Este valor puede ser cualquiera: Un valor común a varios equipos o bien un valor normalizado como por ejemplo 100 [MVA].

ii. Se escoge la tensión base en alguno de los sectores. Ella no tiene porque ser la nominal y se elige de modo de simplificar la elección de las tensiones base de los otros sectores que se hará a continuación.

iii. Las tensiones base, en los otros sectores, deben cumplir las relaciones:

$$\frac{V_{BI}}{V_{BII}} = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \qquad \frac{V_{BII}}{V_{BIII}} = \frac{V_{2'n}}{V_{3n}} \tag{5.10}$$

iv. Teniendo V_B y S_B en cada sector, pueden expresarse las impedancias correspondientes en tanto por unidad. En el caso que alguna de las impedancias ya esté expresada en $[^o/_1]$, en una base distinta (base propia por ejemplo), se debe efectuar el cambio desde la base antigua a la nueva, para lo cual se debe proceder como se muestra a continuación.

Sean todas las cantidades con subíndice "A" referidas a la base antigua y las cantidades con subíndice "N", las correspondientes a la nueva base en la cual se expresará la impedancia. En general, de la definición del sistema por unidad, se tiene:

$$Z(pu) = \frac{Z[\Omega]}{Z_B} \tag{5.11}$$

Así:

$$Z[\Omega] = Z_A(pu)\, Z_{BA} = Z_N(pu)\, Z_{BN} \tag{5.12}$$

Entonces:

$$Z_N(pu) = Z_A(pu)\frac{Z_{BA}}{Z_{BN}} \tag{5.13}$$

De (5.2):

$$Z_N(pu) = Z_A(pu)\frac{\dfrac{(kV_{BA})^2}{MVA_{BA}}}{\dfrac{(kV_{BN})^2}{MVA_{BN}}} = Z_A(pu)\left(\frac{kV_{BA}}{kV_{BN}}\right)^2 \frac{MVA_{BN}}{MVA_{BA}} = Z_A(pu)\left(\frac{V_{BA}}{V_{BN}}\right)^2 \frac{S_{BN}}{S_{BA}} \tag{5.14}$$

v. Una situación especial se presenta cuando, por alguna razón se han definido V_{BI} y V_{BII}, pero en forma tal que no se cumple la relación (5.10); es decir:

$$\frac{V_{BI}}{V_{BII}} \neq \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \tag{5.15}$$

En que V_{1n}/V_{2n}, es la razón de transformación del transformador de unión entre ambos sectores. Por ejemplo, sea $V_{BII} = V_{2n}$ y $V_{BI} \neq V_{1n}$. La figura siguiente a); ilustra el caso general y 5,4 b) la solución que permite la interconexión de ambos sistemas.

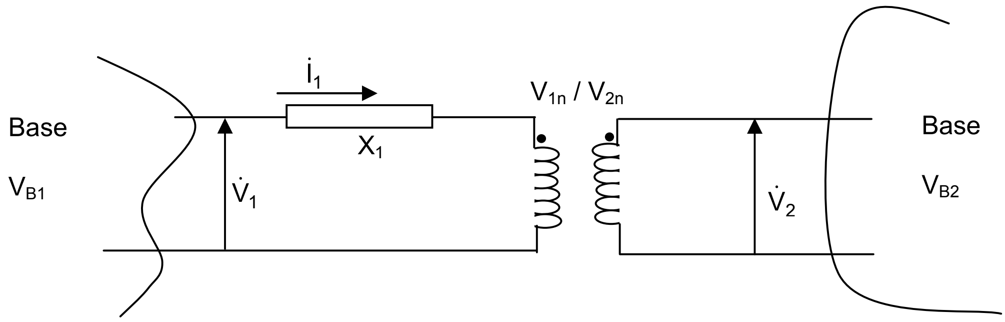


Figura 5.4. a): Sistema General

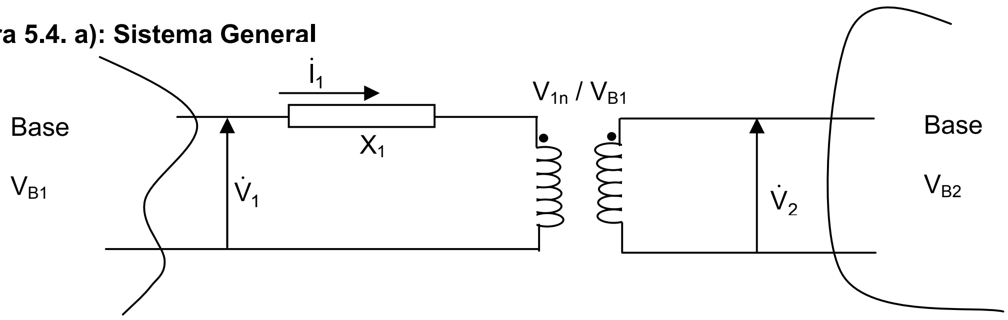


Fig. 5.4. b) Solución Particular.

De la figura. 5.4 a), se tiene:

$$\dot{V}_1 - j\dot{I}_1\, X_1 = \dot{V}_2\, \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \tag{5.16}$$

Dividiendo ambos miembros por V_{BI}, se puede escribir:

$$\frac{\dot{V}_1}{V_{BI}} - j\frac{\dot{I}_1}{I_{BI}}\frac{X_1}{\frac{V_{BI}}{I_{BI}}} = \frac{\dot{V}_2}{V_{2n}}\frac{V_{1n}}{V_{BI}}$$

Por tanto:

$$\dot{V}_1(pu) - j\dot{I}_1(pu)\, X_1(pu) = \dot{V}_2(pu)\frac{V_{1n}}{V_{B1}} \tag{5.17}$$

Es decir, el problema se ha solucionado intercalando un transformador ideal de razón V_{1n}/V_{BI} entre los sectores con bases V_{BI} y V_{BII}.

5.2.2: Circuitos Trifásicos: En la generalidad de los estudios de los SEP, la mayoría de los circuitos trifásicos se analizan como redes monofásicas, tanto en condiciones equilibradas (modelos de líneas por fase) como en condiciones asimétricas (componentes de secuencia). Bajo estas condiciones, todo lo establecido en el apartado anterior tiene completa validez y los valores de tensión corresponden a fase neutro, así como la potencia es monofásica. Sin embargo, lo usual en los cálculos que se presentan en la práctica, es disponer de datos con la tensión entre líneas y la potencia trifásica o total. Para evitar diferencias entre los cálculos en p.u. y las cantidades físicas reales, se ha extendido el uso de las llamadas “bases trifásicas”, en que en realidad se resuelve el mismo circuito monofásico, pero empleando como bases la tensión entre líneas y la potencia trifásica. Esto no constituye ningún problema, e incluso las tensiones, potencias e impedancias resultan numéricamente iguales que en las llamadas bases monofásicas. El único cambio se produce en la corriente base.

Así se tiene:

$$V(pu_{3\phi}) = \frac{V_L}{V_{B3\phi}} = \frac{\sqrt{3}V_{fn}}{\sqrt{3}V_{B1\phi}} = V(pu_{1\phi}) \tag{5.18}$$

$$S(pu_{3\phi}) = \frac{Stotal}{S_{B3\phi}} = \frac{3S_{1\phi}}{3S_{B1\phi}} = S(pu_{1\phi}) \tag{5.19}$$

De (5.18) y (5.19)

$$Z_{B3\phi} = \frac{\left(\frac{kV_{BL}}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{MVA_{B3\phi}}{3}} = \frac{(kV_{B1\phi})^2}{MVA_{B1\phi}} = Z_{B1\phi} \tag{5.20}$$

Para cambiar de base, análogamente a (5.14)

$$Z_N(pu) = Z_A(pu)\left(\frac{V_{BA}}{V_{BN}}\right)^2 \frac{S_{BN}}{S_{BA}} \tag{5.21}$$

La corriente se modifica a:

$$I_{B3\phi} = \frac{VA_{B3\phi}}{\sqrt{3}\, V_{B3\phi\varphi}} = \frac{kVA_{B3\phi}}{\sqrt{3}\, kV_{B3\phi}} = \frac{MVA_{B3\phi}}{\sqrt{3}\, kV_{B3\phi}} * 10^3 \tag{5.22}$$

5.2.2.1: Pérdidas de Potencia: Trabajando en pu, se calculan directamente haciendo el producto RI^2 y no como pudiera pensarse igual a $3RI^2$, como ocurre al trabajar en cantidades físicas. Se tiene:

$$\Delta P(pu)_{3\phi} = \frac{\Delta Ptotal}{S_{B3\phi}} = \frac{3R[\Omega]I^2[A]}{\sqrt{3}V_{B3\phi}\, I_{B3\phi}} \qquad (5.23)$$

Multiplicando y dividiendo el denominador por $I_{B3\phi}$, según (5.22), se puede escribir:

$$\Delta P(pu)_{3\phi} = \frac{3R[\Omega]I^2[A]}{\sqrt{3}V_{B3\phi}\, I_{B3\phi}\,\dfrac{I_{B3\phi}}{\dfrac{VA_{B3\phi}}{\sqrt{3}\,V_{B3\phi}}}} = \frac{R[\Omega]I^2[A]}{\dfrac{(V_{B3\phi})^2}{VA_{B3\phi}}(I_{B3\phi})^2} = \frac{R[\Omega]}{Z_{B3\phi}}\frac{I^2[A]}{(I_{B3\phi})^2} = R(pu)_{3\phi} I^2(pu)_{3\phi} \qquad (5.24)$$

5.2.2.2: Banco de Transformadores: En la práctica, y sobre todo en sistemas de mayor antigüedad, suelen existir transformadores trifásicos formados por la combinación de tres unidades monofásicas. En tal caso, la impedancia en pu base 3ϕ del banco, es numéricamente igual a la impedancia de cada unidad monofásica, en tanto por uno bases monofásicas.

Ejemplo 5.1: El sistema que se muestra en la figura tiene las siguientes tensiones nominales en las barras: 6,9 kV; 66 kV; 12 kV. Las características de los distintos elementos están expresados ya sea en [Ω] o en % base propia. En ciertas condiciones de operación, la tensión en las barras de 12 kV es de solamente 10,8 kV. Trabajando en p.u. base 100 MVA 3 ϕ se pide determinar la tensión que se establecería en dichas barras si el consumo (pasivo) bajara a la mitad.

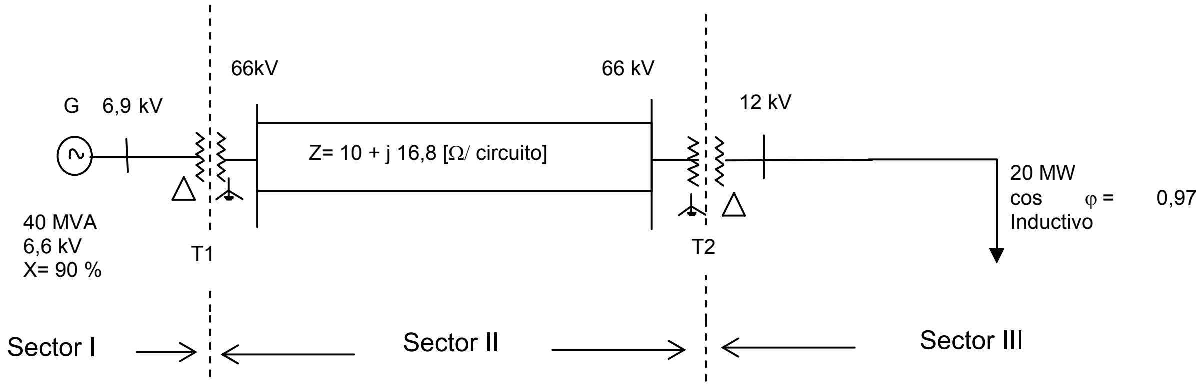


Figura 5.5: Sistema del Ejemplo 5.1

Las características de cada uno de los transformadores T1 y T2, son:
T1: 45 [MVA]; 6,9 / 69 [kV]; X = 12,2 %

T2: Banco de transformadores: 3 x 15 [MVA] 1ϕ; 38,1 / 12 [kV]; X = 9,5 [Ω] en el lado de alta

Solución: El sistema se subdivide en 3 sectores. Escogiendo como base en el sector I, correspondiente al generador, la tensión nominal de éste, se tiene:

$$V_{BI} = 6{,}6\ [kV]$$

Esta elección fija la tensión en el sector II que corresponde a la línea. De acuerdo con (5.10).

$$\frac{V_{BI}}{V_{BII}} = \frac{V_{1n}}{V_{2n}} \Rightarrow V_{BII} = V_{BI}\frac{V_{2n}}{V_{1n}} = 6{,}6 * \frac{69}{6{,}9} = 66\ [kV]$$

Análogamente:

$$\frac{V_{BII}}{V_{BIII}} = \frac{V'_{2n}}{V_{3n}} \Rightarrow V_{BIII} = V_{BII}\,\frac{V_{3n}}{V'_{2n}} = 66 * \frac{12}{\sqrt{3} * 38{,}1} = 12\ [kV]$$

La impedancia base para el sector II será; según (5.2): $Z_B = \frac{66^2}{100} = 43{,}56\ [\Omega]$

A continuación se llevará todo el sistema a tanto por uno base común:

De (5.13): $X_G = 0{,}9 * \frac{100}{40} = 2{,}25$ pu

De (5.14): $X_{T1} = 0{,}122 * \frac{100}{45} * \left(\frac{69}{66}\right)^2 = 0{,}2963$ pu

$$Z_L = \frac{1}{2} * \frac{10 + j16{,}8}{43{,}56} = 0{,}1148 + j\,0{,}1928 = 0{,}2244\ \underline{/59{,}23^{\circ}}\ \text{pu}$$

$$X_{T2} = \frac{9{,}5}{43{,}56} = 0{,}2181\ \text{pu}$$

Así se tiene el siguiente circuito equivalente en pu base común:

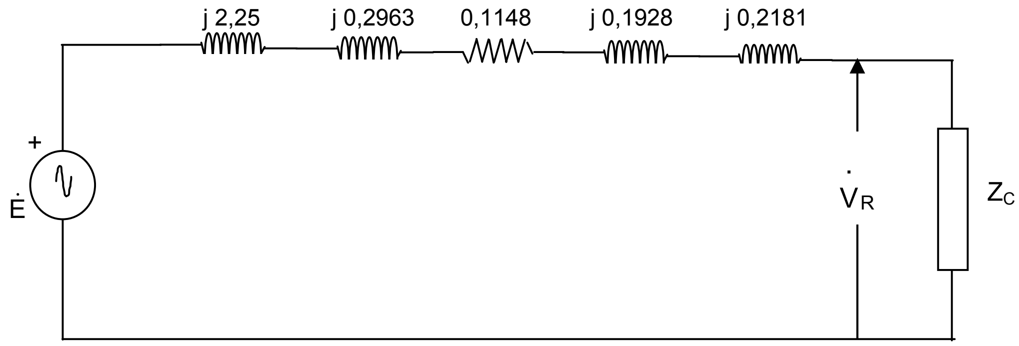


Figura 5.6: Circuito Equivalente en p.u. Base Común.

$$Z_T = 0{,}1148 + j\,2{,}9572 = 2{,}9594\ \underline{/87{,}78^{\circ}}$$

$$V_R = \frac{10{,}8}{12} = 0{,}9\ \text{pu}$$

$$\dot{S}_R = 0{,}2 + j\,0{,}2\text{tg}\,(\cos^{-1}\varphi) = 0{,}2 + j\,0{,}0501 = 0{,}2062\ \underline{/14{,}07^{\circ}}\ \text{pu}$$

Tomando como referencia la tensión en el consumo se tendrá:

$$\dot{S} = \dot{V}\dot{I}^{*} \Rightarrow \dot{I} = \left(\frac{\dot{S}}{\dot{V}}\right)^{*} = \frac{0{,}2062\underline{/-14{,}07^{\circ}}}{0{,}9} = 0{,}2291\ \underline{/-14{,}07^{\circ}}\ \text{pu}$$

$$\dot{E} = \dot{V}_R + \dot{I}\,Z_T = 0{,}9 + 0{,}2291\ \underline{/-14{,}07^{\circ}} * 2{,}9594\ \underline{/87{,}78^{\circ}} =$$

$$= 0{,}9 + 0{,}678\ \underline{/73{,}71^{\circ}} = 1{,}0902 + j\,0{,}6508 = 1{,}2696\ \underline{/30{,}84^{\circ}}\ \text{pu}$$

Como el consumo es pasivo, es posible representarlo por una impedancia equivalente:

$$Z_C = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{0{,}9}{0{,}2291\underline{/-14{,}07^{\circ}}} = 3{,}9284\ \underline{/14{,}07^{\circ}} = 3{,}8108 + j\,0{,}955\ \text{pu}$$

En las condiciones estipuladas el consumo baja a la mitad, entonces

$$Z'_C = 2\ Z_C = 7{,}6216 + j\ 1{,}91 = 7{,}8568\ \underline{/\ 14{,}07º}$$

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{E}}{Z'_T} = \frac{1{,}2967\ /\ \underline{30{,}84º}}{0{,}1184 + j2{,}9572 + 7{,}6216 + j1{,}91} = \frac{1{,}2697\ /\ \underline{30{,}84º}}{9{,}1401\ /\ \underline{32{,}18º}} = 0{,}1389\ \underline{/-1{,}34º\quad pu}$$

$$\dot{V}_R = Z'_C\ \dot{I}'_L = 7{,}8568\ \underline{/14{,}07º} * 0{,}1389\ \underline{/\ -1{,}34º} = 1{,}0914\ \underline{/12{,}73º}\quad pu.$$

$$V_R = 12 * 1{,}0914 = 13{,}0972\ [kV]$$

De acuerdo con las diferentes bases, la corriente en cada sector, expresada en Amperes, será:

$$I_G = I'_L * \frac{100}{\sqrt{3}\ 6{,}6} * 10^3 = 1.215{,}06\ [Amp.]\quad \text{En el generador}$$

$$I_L = I'_L * \frac{100}{\sqrt{3}\ 66} * 10^3 = 121{,}506\ [Amp.]\quad \text{En la línea}$$

$$I_L = I'_L * \frac{100}{\sqrt{3}\ 12} * 10^3 = 668{,}2829\ [Amp.]\quad \text{En la carga.}$$

5.3: CIRCUITOS EQUIVALENTES.

Veremos a continuación, los circuitos equivalentes en tanto por uno. En cuanto a las redes de secuencia, se estudiarán en el próximo curso.

5.3.1: Transformador Trifásico de Dos Enrollados: Antes de establecer en detalle el circuito equivalente en tanto por unidad, se revisará el procedimiento necesario para determinar el circuito equivalente en cantidades reales ya sea referido al primario o secundario.

Como se sabe, es posible determinar el circuito equivalente de un transformador trifásico operando en condiciones balanceadas e independientemente del tipo particular de conexión realizando las pruebas de circuito abierto y cortocircuito (obteniéndose el circuito equivalente por fase). Consideremos la Figura 5.7.

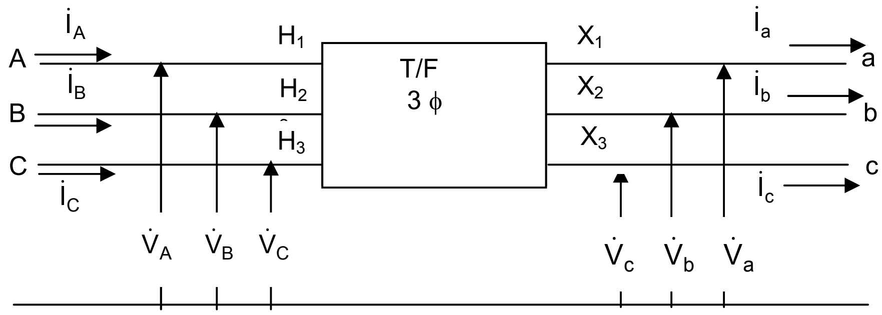


Figura 5.7. Diagrama Esquemático de un Transformador Trifásico de Dos Enrollados

La relación entre las tensiones, primarias aplicadas y medidas en vacío en el secundario, define la relación de transformación que en general será compleja debido al posible desfase entre estas tensiones según sea el tipo particular de conexión. Es decir:

$$\dot{a} = \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}'_a} \tag{5.25}$$

En que $\dot{V}'_a$ es la tensión inducida en el secundario y distinta de $\dot{V}_a$.

La prueba de cortocircuito, se realiza aplicando tensiones simétricas equilibradas al lado de alta tensión, estando el lado de baja en cortocircuito y midiendo las respectivas corrientes en cada fase. La relación entre las tensiones aplicadas y las corrientes determina la impedancia de cortocircuito referida al lado en que se hizo la prueba. Si se supone que el lado de alta corresponde al secundario, la impedancia de cortocircuito (impedancia equivalente) quedará referida al secundario. Es decir:

$$Z_{eq2} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \tag{5.26}$$

Donde V_{CC} es la tensión de cortocircuito por fase, que hace circular la corriente nominal I_{CC}, es decir:

$$V_{cc} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \tag{5.27}$$

De esta forma el circuito equivalente por fase con la impedancia equivalente en el secundario se puede representar como se muestra en la Figura 5.8, en que tanto a como θ dependen de la conexión de los enrollados de alta y baja tensión:

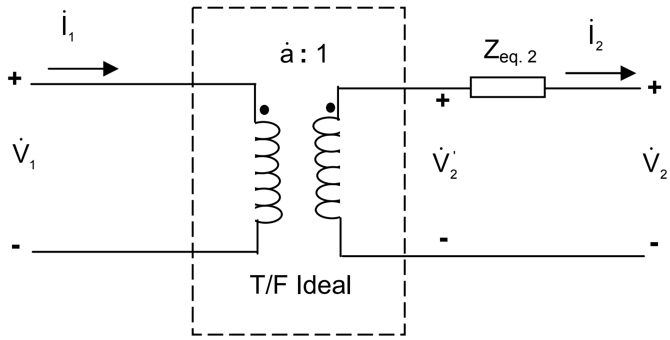


Figura 5.8. Circuito Equivalente por Fase de un T/F con la Impedancia Equivalente en el Secundario

donde:

$$\dot{a} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}'_2} = a \ \underline{/\theta} \tag{5.28}$$

El valor de "a" (módulo de la razón de transformación del transformador trifásico) corresponde a la razón entre el número de espiras de los enrollados cuando las conexiones son las mismas en ambos lados, debiendo dividirse por $\sqrt{3}$ el número de espiras en el lado conectado en Δ en las conexiones Y-Δ y Δ-Y. Por otra parte, según las normas americanas, para designar los terminales H_1 y X_1 en transformadores Y-Δ, se requiere que en secuencia positiva, el voltaje al neutro en H_1 (lado de alta) adelante en 30º al voltaje al neutro en X_1 (lado de baja), independiente de si el devanado en Δ o en Y sea el de alto voltaje. Lo mismo ocurre para los otros terminales (H_2 con X_2 y H_3 con X_3).

Por otra parte, en el transformador ideal de la Figura 5.7. debe cumplirse la invariancia a la potencia compleja, o sea:

$$\dot{V}_1 \overset{*}{I}_1 = \dot{V}'_2 \overset{*}{I}_2 \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{1}{\overset{*}{a}} \tag{5.29}$$

Para determinar el circuito equivalente en tanto por unidad de un transformador trifásico, las cantidades bases deben elegirse de acuerdo a las relaciones siguientes:

$$S_{B1} = S_{B2} = S_B \;; \quad \frac{V_{B1}}{V_{B2}} = a \;; \quad \frac{I_{B1}}{I_{B2}} = \frac{1}{a} \tag{5.30}$$

Por lo que en el circuito equivalente de la Figura 5.7 se cumple que:

$$\dot{V}'_2(pu) = V_1(pu)\,\underline{/\,\theta} \qquad \dot{I}_2(pu) = I_1(pu)\,\underline{/\,-\,\theta} \tag{5.31}$$

$$Z_{eq1}(pu) = Z_{eq2}(pu) = Z(pu) \tag{5.32}$$

A partir de las ecuaciones (5.31) y (5.32) el circuito equivalente en tanto por unidad se puede representar como se muestra en la figura siguiente:

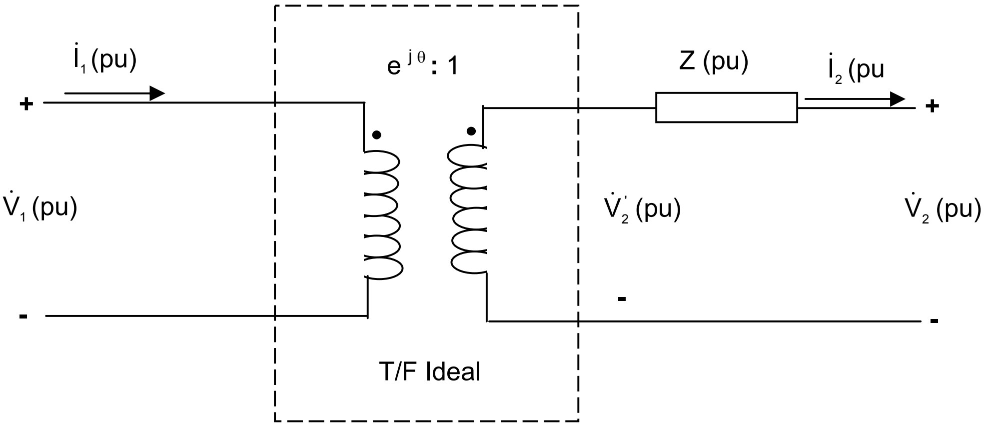


Figura 5.9. Circuito Equivalente en Tanto por Unidad de un Transformador Trifásico.

En particular, para las conexiones Y-Y y Δ-Δ, el circuito equivalente se reduce a la Figura 5.10.

Si las impedancias de cortocircuito de los transformadores de un SEP están expresados en (pu), el valor de Z(pu) que hay que utilizar es independiente del tipo de conexión. Sin embargo, el tipo de conexión determina la relación entre las tensiones bases a ambos lados del transformador.

Por otra parte, cuando se representa la red equivalente de un SEP en cantidades en tanto por unidad, es usual no tomar en cuenta los desfases de tensiones y corrientes entre los lados estrella y delta de los transformadores; es decir, utilizar el circuito equivalente de la Figura 5.9. para todos los tipos de conexiones trifásicas, pero al determinar los valores reales de corriente y tensión, se debe considerar este desfase.

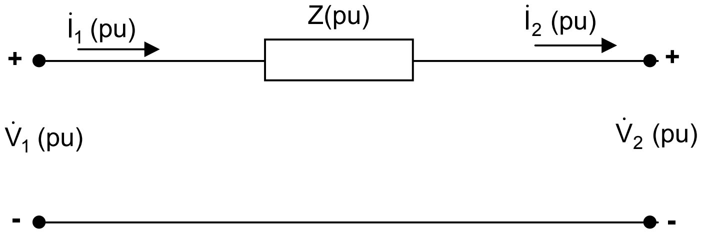


Figura 5.10. Circuito Equivalente en Tanto por Unidad para las Conexiones Y-Y y Δ-Δ

En sistemas radiales, los desfases no son muy importantes, debido a que rara vez se necesita comparar los ángulos de fase de las corrientes en lados opuestos de un transformador, pero esto no significa que los desfases no existan. El sistema radial es un caso especial de un SEP, ya que en general el sistema de transmisión es del tipo red, en el que puede haber una o varias mallas que contengan transformadores con diferentes tipos de conexión, tal como se muestra en la Figura 5.11.

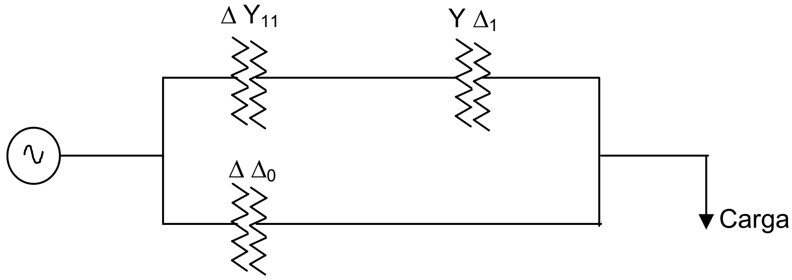


Figura 5.11. Ramas en Paralelo con Transformadores de Distintos Tipos de Conexión

En este caso, la condición necesaria para dibujar la red en (pu) sin introducir transformadores ideales es que los productos de las razones complejas de transformación en ramas paralelas sean iguales. Esta condición no es otra que la necesaria para una correcta conexión de transformadores en paralelo.

5.3.2: Transformador Trifásico de Tres Enrollados: Los devanados primario y secundario de un transformador de dos enrollados tienen la misma potencia nominal, pero los de un transformador de tres devanados pueden tener diferentes capacidades. La impedancia de cada bobinado de un transformador de este tipo se puede expresar en tanto por unidad sobre la base de su propio devanado o bien se pueden hacer pruebas para determinarlas. En cualquier caso; sin embargo, se deben mostrar sobre la misma base de potencia.

Una de las conexiones más empleadas de un transformador trifásico de tres bobinados es la conexión Y-Y y un terciario conectado en Δ. Sin embargo, el análisis que conduce al circuito equivalente en (pu) se aplica a transformadores de tres enrollados en general. Consideremos la representación mediante el circuito equivalente por fase aproximado que se muestra en la Figura 5.12. Los terminales y variables asociadas a los enrollados primario, secundario y terciario se identificarán con subíndice p, s y t, respectivamente. Todas las impedancias y tensiones se suponen referidas al enrollado primario y en cantidades convencionales. Para determinar las impedancias Z_p; Z_s y Z_t, es necesario efectuar tres pruebas independientes de cortocircuito. En cada caso, un enrollado queda en circuito abierto y uno en cortocircuito y por lo tanto se miden:

Z_{ps}: Impedancia de cortocircuito medida en el primario, con el secundario en cortocircuito y el terciario abierto.

Z_{pt}: Impedancia de cortocircuito medida en el primario, con el terciario en cortocircuito y el secundario abierto.

Z_{st}: Impedancia de Cortocircuito medida en el secundario, con el terciario en cortocircuito, el primario abierto y referida al primario.

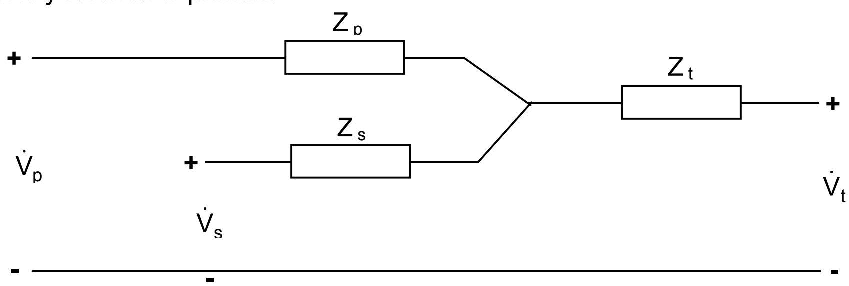


Figura 5.12. Circuito Equivalente por Fase de un Transformador Trifásico de Tres Enrollados

A partir del circuito de la Figura 5.12, se puede escribir:

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned} \tag{5.33}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (5.33) se obtiene:

$$\begin{aligned} Z_p &= \tfrac{1}{2}\,(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= \tfrac{1}{2}\,(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= \tfrac{1}{2}\,(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned} \tag{5.34}$$

Al igual que en el caso de transformadores de dos enrollados, para determinar el circuito equivalente en (pu) de un transformador trifásico de tres enrollados deben elegirse las tensiones bases de manera que ellas queden en relación con las tensiones nominales entre líneas y la potencia base debe ser común para todos los enrollados.

Considerando que el transformador está conectado en Y-Y-Δ y tomando en cuenta las consideraciones relativas al desfase existentes entre las tensiones del lado estrella y las correspondientes del Δ; el circuito equivalente en (pu) es el que se muestra en la Figura 5.13, donde todas las variables y parámetros están en tanto por unidad. En los cálculos usuales, se omite el transformador ideal, por las mismas razones dadas en el caso del transformador de dos enrollados. Conviene tener presente que los Z_p, Z_s y Z_t no son cantidades físicas reales ya que se obtienen a través de una manipulación matemática. Es por ello que pueden resultar negativos (capacitivos) dependiendo de la disposición física relativa de los enrollados. Por ejemplo, en el caso más común en que los enrollados se disponen de menor a mayor tensión a partir del núcleo, resulta que $Z_{pt} \approx Z_{ps} + Z_{st}$. Según sea la aproximación de esta relación, puede resultar $Z_s = 0$; o, incluso, ligeramente negativa. Tampoco se debe olvidar que el punto común de la estrella es ficticio (no representa un neutro) y que el circuito equivalente es monofásico (y no trifásico como se tiende a pensar).

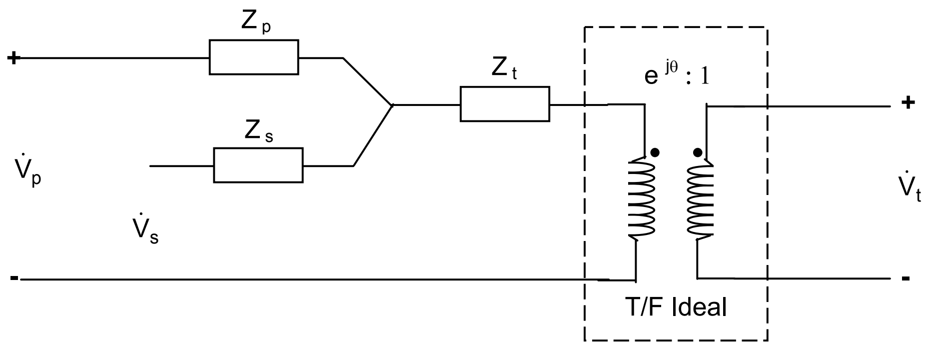


Figura 5.13. Circuito Equivalente en Por Unidad de un Transformador Trifásico de Tres Enrollados

5.3.3: Autotransformador: Se puede interpretar como la conexión eléctrica en serie de dos enrollados situados en un mismo núcleo magnético. La ventaja de esta forma constructiva, respecto a la conexión normal como transformador, radica en la mayor capacidad que es posible conseguir, manteniendo las corrientes por enrollado y con ello, las pérdidas óhmicas.

En efecto; si consideramos la Figura 5.14, que corresponde a un autotransformador reductor y despreciando las pérdidas se tiene:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1 + E_2}{E_1} = \frac{N_1 + N_2}{N_1} = N \tag{5.35}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{N} \qquad \text{con} \qquad N = \frac{a+1}{a} \tag{5.36}$$

Donde “N” corresponde a la razón de transformación del autotransformador y “a” es la razón de transformación del transformador a partir del cual se armó. De modo que se puede demostrar que:

$$\frac{S\,(\text{Autrotransformador})}{S\,(\text{Transformador})} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} \rangle 1 \tag{5.37}$$

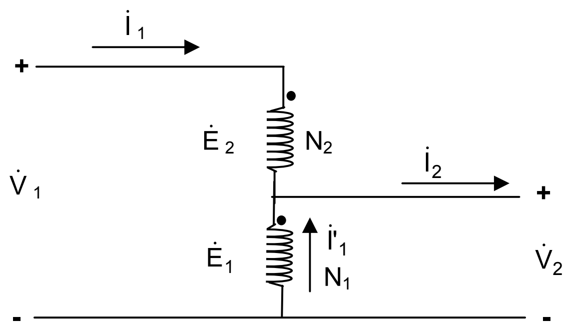


Figura 5.14. Autotransformador Monofásico Armado a Partir de un Transformador

El aumento de capacidad se obtiene a través de la suma de $\dot{I}'_1$, que es la corriente transformada magnéticamente, con la corriente primaria $\dot{I}_1$ que es transferida eléctricamente al circuito secundario.

La impedancia de dispersión o de cortocircuito se puede determinar experimentalmente, aplicando una tensión reducida al lado de alta tensión y midiendo la corriente en el mismo, estando en cortocircuito el otro lado. Por otra parte, también es posible determinarla a partir de la impedancia equivalente del transformador respectivo. Para ello consideremos la Figura 5.14. donde se puede demostrar que:

$$Z_{eq2} \text{ (Autotransformador)} = Z_{eq2} \text{ (Transformador)} \qquad (5.38)$$

$$Z_{eq1} \text{ (Autotransformador)} = (1\text{-}N)^2 \, Z_{eq2} \text{ (Transformador)} \qquad (5.39)$$

Donde: $N = N_1 / (N_1 + N_2) \langle 1$, es la razón de transformación del autotransformador elevador.

Adicionalmente, de (5.39), se deduce que la impedancia equivalente de un autotransformador es menor que la respectiva del transformador a partir del cual se armó. Ello se traduce en un mejor rendimiento y una menor caída de voltaje interno.

Supongamos que se ha determinado la impedancia equivalente referida al lado secundario y por lo tanto, el autotransformador elevador de la Figura 5.15, se puede representar por el circuito equivalente de la Figura 5.16.

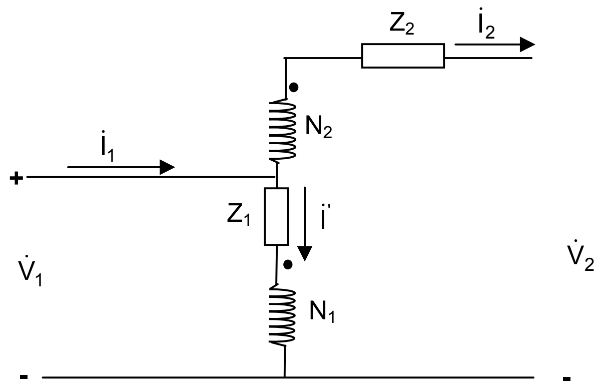


Figura 5.15. Diagrama Esquemático de un Autotransformador Elevador

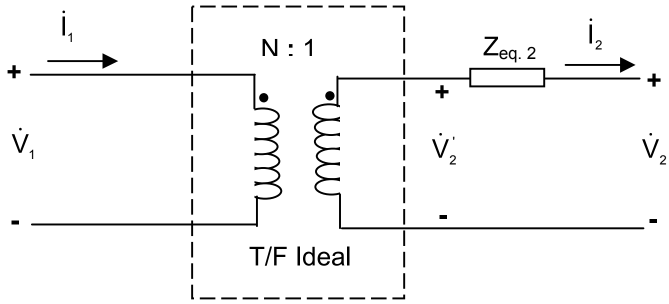


Figura 5.16. Circuito Equivalente de un Autotransformador con su Impedancia en el Secundario

Para determinar el circuito equivalente en tanto por unidad, las cantidades de base se deben elegir de acuerdo a las relaciones siguientes:

$$S_{B1} = S_{B2} = S_B \ ; \qquad \frac{V_{B1}}{V_{B2}} = N; \qquad \frac{I_{B1}}{I_{B2}} = \frac{1}{N} \ ; \qquad Z_{B1} = N^2 Z_{B2} \qquad (5.40)$$

Con lo que en el circuito de la Figura 5.17. se puede escribir:

$$\dot{V}'_2\,(pu) = \dot{V}_1(pu) \ ; \ \dot{I}_2(pu) = \dot{I}_1(pu) \ ; \qquad Z_{eq2}(pu) = Z_{eq1}(pu) = Z(pu) \qquad (5.41)$$

Las ecuaciones (5.40) permiten representar el autotransformador según la Figura 5.17.

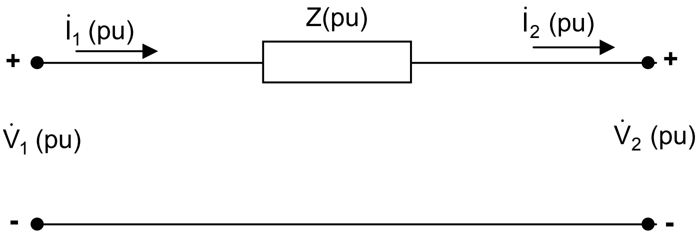


Figura 5.17. Circuito Equivalente en pu de un Autotransformador

Todo lo expuesto para el autotransformador monofásico se puede aplicar directamente al análisis por fase de los autotransformadores trifásicos.

La conexión Y-Y de autotransformadores trifásicos tiene un comportamiento similar al del transformador de igual conexión, particularmente en lo referente a los terceros armónicos. Una falla a tierra en el lado de mayor tensión, repercutirá en tensiones anormalmente altas entre los terminales del lado de menor tensión y tierra. La forma usual de superar estos problemas consiste en agregar un tercer enrollado de estabilización conectado en Δ. La conexión en Δ-Δ es poco usada y su comportamiento es similar al del transformador de igual conexión, sin embargo en este caso las tensiones secundarias quedan desfasadas respecto a las del primario.

5.3.4: Transformadores con Cambio de Derivaciones: Los transformadores con cambio de derivaciones se emplean para regular la tensión en un punto determinado de un SEP, mediante el cambio manual o automático de las derivaciones (TAP) de alguno de sus enrollados. Existen transformadores con cambio de derivaciones en vacío, los que requieren su desconexión del sistema antes de proceder al cambio de TAP, suministrando un método de regulación fija, y transformadores con cambio de derivaciones en carga, que no requieren su desconexión del sistema para realizar la maniobra, permitiendo una regulación casi continua.

En la especificación de un transformador con cambio de derivaciones, se deben tener en cuenta dos aspectos importantes como son: el rango total de variación de la tensión y la magnitud del paso entre derivaciones sucesivas. Atendiendo a razones económicas y calidad de la regulación, se emplean usualmente los siguientes valores para las magnitudes mencionadas:

Rango total de variación: ± 10% ; ± 12% ; ± 15% (como límite)
Magnitud del paso entre derivaciones: 1,25%; 1,5%

5.3.4.1: Circuito Equivalente en (pu) de un Transformador con Cambio de Derivaciones: La teoría de transformadores demuestra que la impedancia de cortocircuito en (pu) de un transformador no varia al cambiar las derivaciones de uno de sus enrollados siempre que las tensiones bases correspondientes a ambos lados estén en la nueva relación del número de espiras. Esto significa que en los cálculos en (pu) debe modificarse la tensión base en el lado donde se produjo el cambio de derivaciones. En los sistemas radiales es siempre posible elegir las tensiones bases de modo que estén en la relación del número de espiras, es decir, se puede tomar en cuenta desde un comienzo el cambio de derivaciones (respecto a la tensión nominal) existente en los transformadores; o bien es posible recalcular todas las impedancias conectadas al lado donde se modifica la tensión base, aunque esto último puede resultar poco práctico, cuando se desea estudiar situaciones con varios cambios de derivaciones.

En sistemas enmallados, la situación es diferente ya que en muchos casos no es posible obviar el empleo de transformadores o un circuito equivalente en la red en (pu) correspondiente al SEP. Esto se ilustra en el ejemplo de la Figura 5.18, en la cual T_2 corresponde a un transformador con cambio de TAP en el lado de 66 [kV], conectado en la derivación 67,98 [kV] (+3%) y donde se supone que los sectores I y II no incluyen otros transformadores.

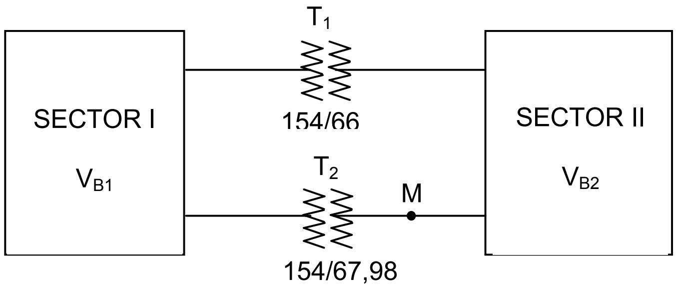


Figura 5.18. Presencia de un Transformador con Cambiador de TAP, en un Sistema Enmallado

De acuerdo con la Figura 5.18,V_{B1} = 154 [kV] y V_{B2} = 66 [kV], pero al punto M le corresponden simultáneamente dos tensiones bases distintas. Aproximándose a M por la derecha le corresponde V_{B2} = 66 [kV] y por la izquierda V'_{B2} = 67,98 [kV] (definida por T_2). Si por ejemplo V_M = 65 [kV], se obtienen para V_M dos valores distintos en pu; 0,9848 por la derecha y 0,9562 por la izquierda, con lo cual el valor de V_M queda indeterminado. Esto se soluciona intercalando en el punto M de la red en pu del sistema, un transformador o autotransformador ideal, tal como se muestra en la Figura 5.19, en que t_2 representa el rango de variación en pu de la tensión en el lado donde se encuentra el cambio de TAP (t_2 para el secundario).

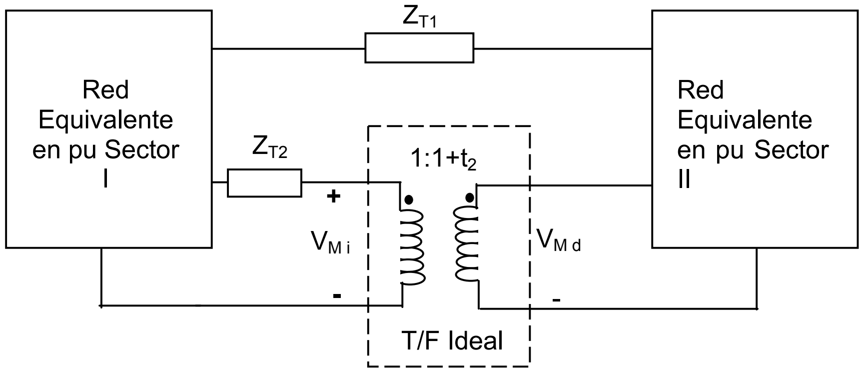


Figura 5.19. Inclusión de un Transformador Ideal para Considerar el Cambio de Base

En algunos casos y, especialmente en el cálculo de Flujos de Potencia, resulta conveniente emplear un circuito equivalente en tanto por unidad que elimine el transformador ideal. Consideremos un transformador con cambio de derivaciones conectado entre las barras 1 y 2 de un SEP, como se muestra en la Figura 5.20 y con el fin de generalizar más el modelo, supongamos que hay cambio de TAP tanto en el primario como en el secundario (en la práctica existe sólo en un lado). Con el fin de tomar en cuenta el cambio de tensión base en ambos lados, es necesario incluir un transformador ideal en el circuito equivalente en tanto por unidad en cada lado, donde t_1 y t_2 representan la variación en tanto por unidad de la tensión base en el lado respectivo.

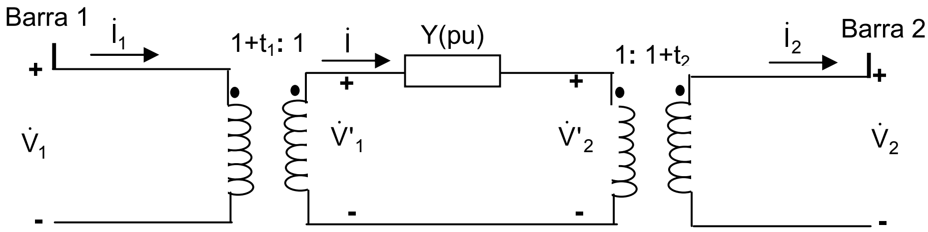


Figura 5.20. Esquema para Deducir el Modelo General de un Transformador con Cambiador de TAP

A partir de la Figura 5.20, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

$$\dot{I}_1 = \left(\frac{Y}{\alpha^2} + \frac{Y}{\alpha\beta}\right)\dot{V}_1 - \frac{Y}{\alpha\beta}\dot{V}_1 - \frac{Y}{\alpha\beta}\dot{V}_2 \tag{5.42}$$

$$-\dot{I}_2 = -\frac{Y}{\alpha\beta}\dot{V}_1 - \frac{Y}{\alpha\beta}\dot{V}_2 + \left(\frac{Y}{\beta^2} + \frac{Y}{\alpha\beta}\right)\dot{V}_2 \tag{5.43}$$

Donde: $\alpha = 1 + t_1$ y $\beta = 1 + t_2$; Y es la admitancia de cortocircuito (recíproco de la impedancia equivalente en pu). De esta forma, si el transformador tiene cambio de TAP sólo en el primario, $t_2 = 0$, $\beta = 1$ y $\alpha = 1 + t_1$. Debe hacerse notar que tanto t_1 como t_2 pueden ser positivos o negativos según corresponda. Las expresiones (5.42) y (5.43) permiten hacer una representación circuital como la indicada en el cuadripolo de la Figura 5.21.

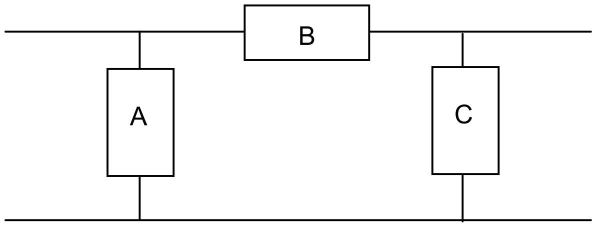


Figura 5.21. Modelo Circuital en Tanto por Unidad de un Transformador con Cambiador de TAP

En la Figura 5.21, se tiene que:

$$A = \frac{Y}{\alpha^2} - \frac{Y}{\alpha\beta} \quad ; \quad B = \frac{Y}{\alpha\beta} \quad ; \quad C = \frac{Y}{\beta^2} - \frac{Y}{\alpha\beta} \tag{5.44}$$

Ejemplo 5.2: Dos transformadores de 110/12 kV, 60 MVA, X = 14,52 Ω, medidos en el lado de alta tensión, operan en paralelo alimentando una carga total de 110 MW, factor de potencia 80 % en atraso, con tensión nominal (12 kV). ¿Cómo se reparte la carga entre estos dos transformadores, si uno de ellos está operando en la derivación central y el otro está en el tap +4?. El cambiador de tap está en el secundario y cada paso es de 1,25 %.

Solución: El Sistema se puede representar como:

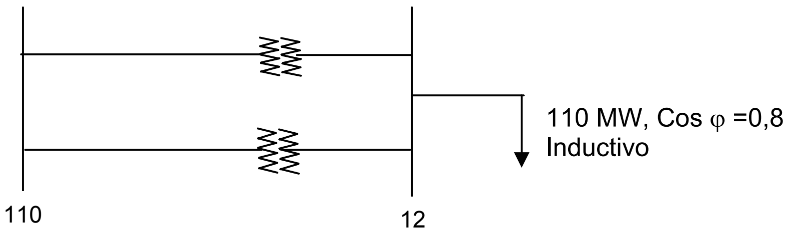


Figura 5.22. Sistema del Ejemplo 5.2

Escogiendo como potencia base, la nominal de los transformadores (60 MVA), y la tensión del lado de alta (110 kV) se tiene:

$$X(pu) = \frac{14{,}52}{\dfrac{110^2}{60}} = 0{,}072$$

El circuito equivalente, se muestra en la figura siguiente:

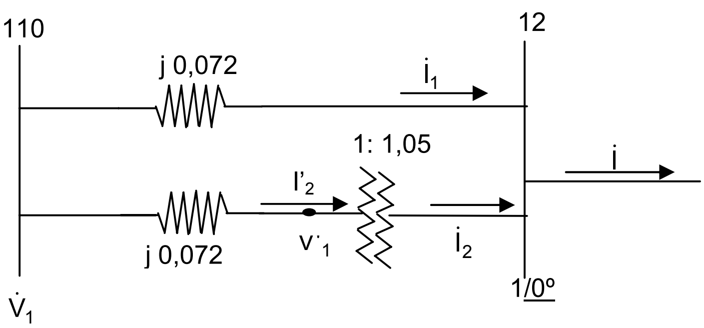


Figura 5.23. Circuito Equivalente con T/F Ideal

Se tiene: $t_2 = \frac{V'_{B2}}{V_{B2}} = \frac{12 * 4 * 0,0125}{12} = 0,05$

Entonces:

$$\frac{V'_1}{1} = \frac{1}{1,05} \Rightarrow V'_1 = 0,9524$$

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{1,05}{1} \Rightarrow I'_2 = 1,05 * I_2$$

$$\dot{V}_1 = 1\,\underline{/0^\circ} + j\,0,072\,\dot{I}_1 = j\,0,072 * 1,05\,\dot{I}_2 + 0,9524 \qquad (*)$$

Pero: $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \Rightarrow \dot{I}_1 = \dot{I} - \dot{I}_2$; entonces, la corriente de carga se puede calcular, directamente en pu, en la barra, como:

$$\dot{I} = \frac{P(pu)}{V(pu) * \cos\varphi}\underline{/-\cos^{-1}\varphi} = \frac{\frac{110}{60}\underline{/-\cos^{-1}0,8}}{1\underline{/0^\circ} * 0,8} = 2,2917\underline{/-36,87^\circ}$$

Por tanto, reemplazando en (*), y expresando esa relación en términos solamente de la corriente 2:

$$1\underline{/0^\circ} + j\,0,072\,(\dot{I} - \dot{I}_2) = j\,0,072 * 1,05\,\dot{I}_2 + 0,9524$$

$$1\underline{/0^\circ} + j\,0,072 * 2,2917\,\underline{/-36,87^\circ} - 0,9524 = (j\,0,072 + j\,0,0756)\,\dot{I}_2$$

$$\dot{I}_2 = \frac{0,1973\,\underline{/42,0^\circ}}{j\,0,1476} = 1,3367\,\underline{/-48,0^\circ}$$

$$\dot{I}_1 = 2,2917\,\underline{/-36,87^\circ} - 1,3367\,\underline{/-48^\circ} = 1,0135\,\underline{/-22,121^\circ}$$

Con ello la carga en cada uno de los T/F, será:

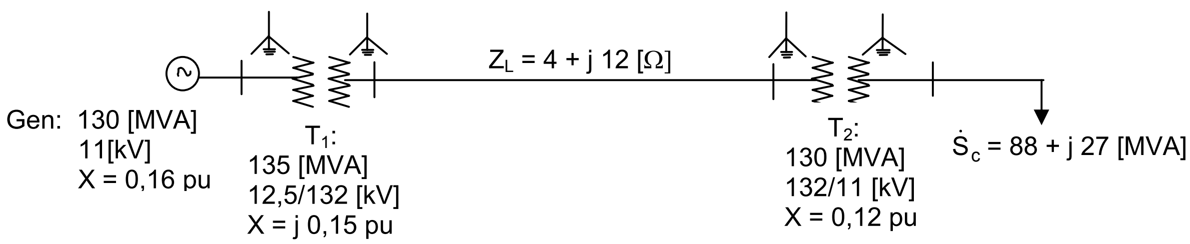
$$\dot{S}_1 = \dot{V}_1 * \overset{*}{I}_1 = 1\,\underline{/0^\circ} * 1,0135\,\underline{/22,121^\circ} * 60 = 60,81\,\underline{/22,121^\circ}\ [MVA]$$

$$\dot{S}_2 = \dot{V}_1 * \overset{*}{I}_2 = 1\,\underline{/0^\circ} * 1,3367\,\underline{/48^\circ} * 60 = 80,202\,\underline{/48^\circ}\ [MVA]$$

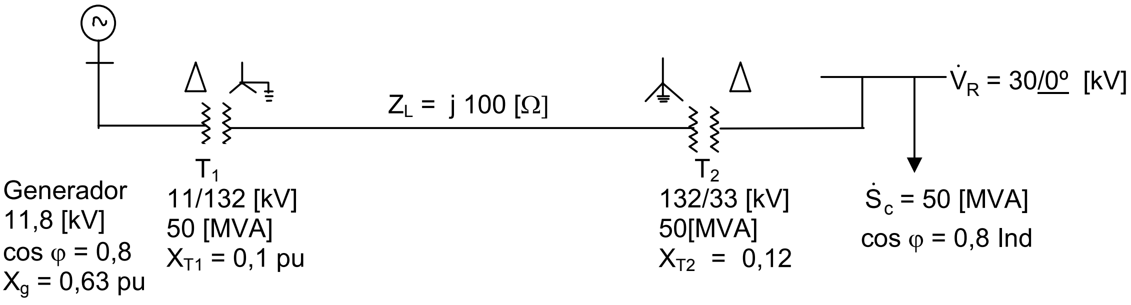
Entonces el T/F, que está operando en el tap + 4 (105 % de su tensión nominal), está sobrecargado en un 33,67 % y el otro transformador está sobrecargado en un 1,35 % de su potencia nominal.

5.4. PROBLEMAS PROPUESTOS.

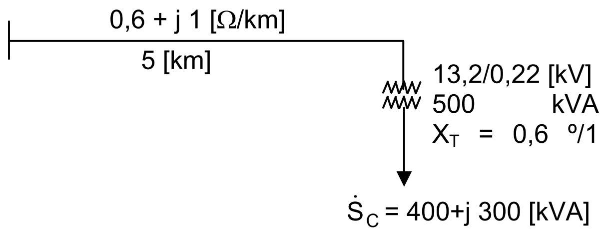
5.1. Dado el diagrama unilineal que se muestra en la figura siguiente y tomando como bases los valores nominales del generador; determine el circuito equivalente en pu, identificando cada uno de los elementos en diagrama. Calcule, además, las corrientes de líneas en [A] en la línea y generador, si la tensión en la carga es de 11 $\underline{/0^\circ}$ [kV]. Las cantidades expresadas en pu están en base propia (b.p).



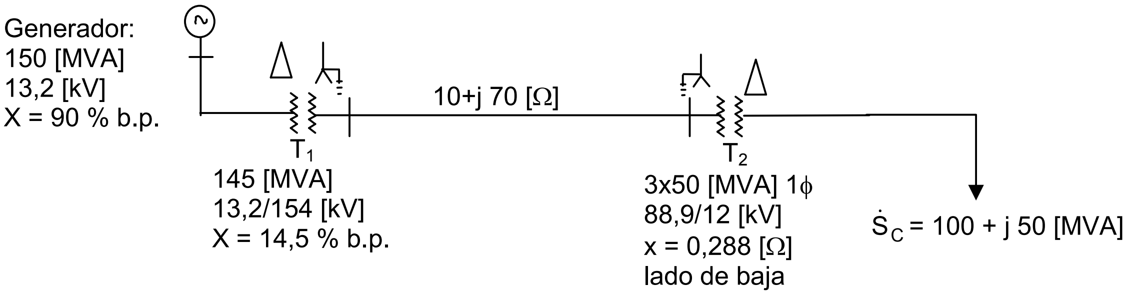
5.2. En relación al unilineal de la figura, se desea mantener la tensión del extremo receptor en 30 /0º [kV]. Determinar la tensión en bornes del generador, necesaria para esa condición de operación. Trabaje en pu, base 100 [MVA]. Todos los valores de impedancia expresados en [º/1], están en base propia.



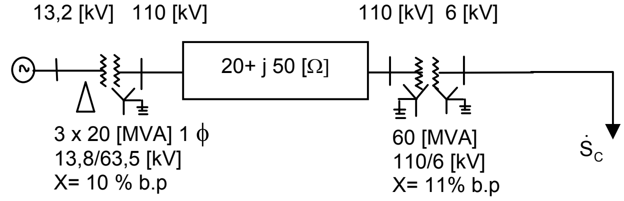
5.3. Para el sistema de la figura determinar el circuito equivalente en pu. Considere como potencia base 1000 [kVA], tensión base 13,3 [kV]. Calcule además la corriente en pu y [A] en la línea y secundario del transformador, considerando que la tensión de la carga es de 220 / 0º Volts.



5.4. En relación al unilineal de la figura, determinar la tensión que debe existir en bornes del generador para servir una carga de 100 + j 50 [MVA] manteniendo en la barra de carga una tensión de 11,4 [kV]. Represente todo el sistema en pu, individualizando cada uno de los elementos que lo forman. Evalúe la corriente de línea en el generador, transformador T_1 y línea de transmisión. Considere como potencia base 100 [MVA] y tensión base, la nominal del generador.



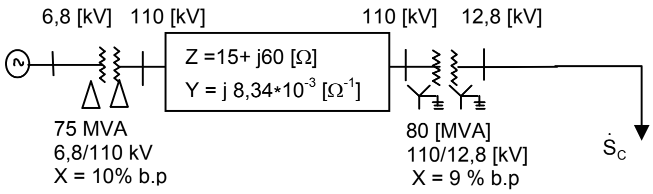
5.5. En relación al unilineal de la figura se desea representarlo como un circuito equivalente en pu individualizando cada uno de los elementos que lo forman.



Características del Generador:
60 MVA
13,2 kV
X= 1 º/1 b.p

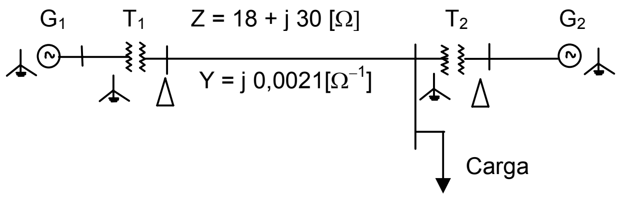
Si bajo ciertas condiciones de operación el generador está entregando en bornes una potencia compleja de 50 + j 10 [MVA], con una tensión de un 105 [%] de la nominal, evaluar la potencia compleja que se está suministrando a la carga y la tensión en la barra de carga. Considere V_B la nominal del generador y potencia base, 100 [MVA]

5.6. En relación al unilineal de la figura, se desea representarlo como un circuito en pu identificando cada uno de los elementos. La línea, es de median longitud.
En una cierta condición de operación el sistema está sirviendo una carga de 60 – j 30 [MVA], con una tensión, en la barra de carga de 110 % de la tensión nominal.
Evalúe la tensión en [kV] y la corriente de línea en bornes del generador para estas condiciones de operación.



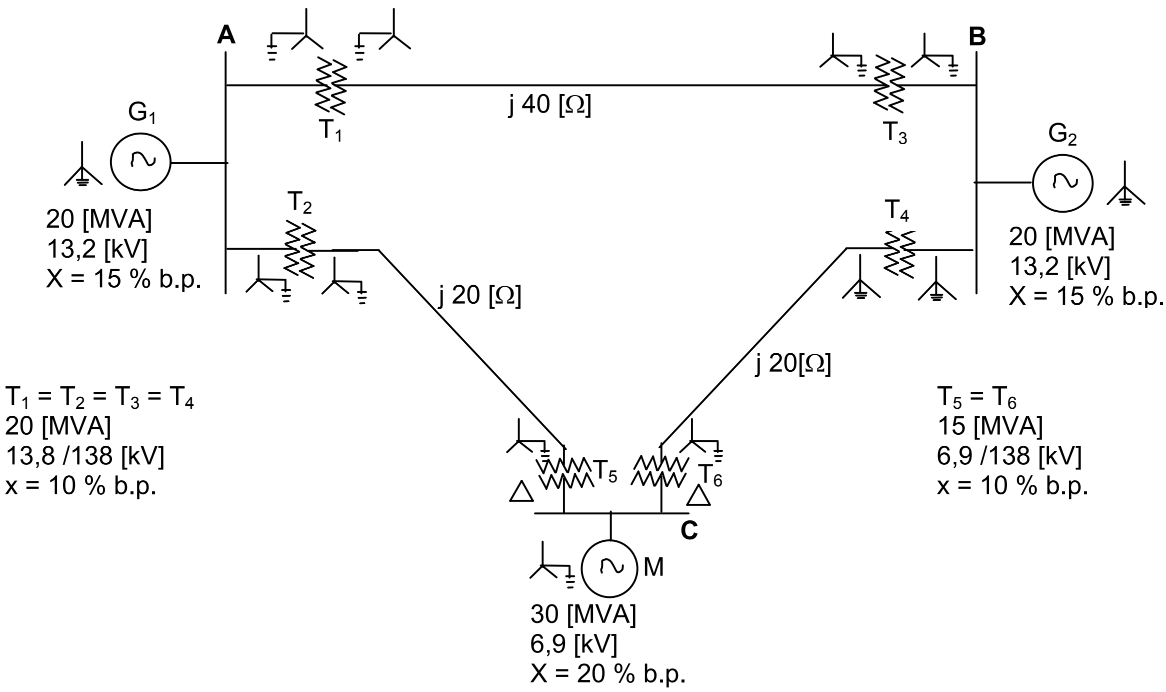
Características del Generador:
75 MVA
6 kV
X = 1 º/1 b.p

5.7. Dado el sistema de la figura, se desea representarlo como un circuito en pu identificando cada uno de los elementos. Calcule la fuerza electromotriz del generador Nº 2 para que el sistema en su conjunto proporcione una potencia de 40 [MW] con cos φ = 0,95 inductivo a la carga. El generador 1 está operando con tensión nominal en sus terminales y está entregando, a la barra de 13,8 [kV] una potencia de 30 [MW] a cos φ = 1. Evalúe además la tensión en la barra de carga. Represente la línea como T nominal. Utilice como tensión base del primer sector, la nominal del generador Nº 1 y potencia base 100 [MVA]



Elemento	Reactancia	Tensión	Potencia
G_1	90 %	13,2 [kV]	90 [MVA]
G_2	100 %	6,4 [kV]	45 [MVA]
T_1	10 %	13,8/154 [kV]	100 [MVA]
T_2	0,1 [Ω] baja	6,4/154 [kV]	40 [MVA]

5.8. Representar el sistema de la figura en pu, base común, usando como valores base, 50 [MVA] y 138 [kV] en la línea corta con impedancia j 40 [Ω]. Si la tensión en la barra C es de 6,6 [kV], cuando el motor síncrono, M, absorbe 24 [MW] con cos φ = 0,8 en adelanto, calcular las tensiones en las barras A y B. Suponer que la contribución de cada generador es la misma.



5.9. Un Transformador Trifásico de Tres Enrollados (TTTE) tiene las siguientes características:
Primario : 6,6 [kV] , 15.000 [kVA], conexión estrella
Secundario : 33 [kV], 10.000 [kVA], conexión estrella
Terciario : 2,2 [kV], 7.500 [kVA], conexión triángulo
Los datos de las pruebas de cortocircuito a corriente nominal son:

V_{cc} [Volts]	P_{cc} [kW]	Lado 1	Lado 2	Lado 3
540	261	I_N	Cortocircuito	Abierto
675	310	I_N	Abierto	Cortocircuito
2.662	110	Abierto	I_N	Cortocircuito

Determinar el circuito equivalente en [Ω], referido al primario y en tanto por unidad.

5.10. Tres TT/FF monofásicos tienen las siguientes características: 100 [kVA], 4.400/220 [V], R_1= 0,85 [Ω], R_2 = 0,002 [Ω], X_1 = 8 [Ω], X_2 = 0,02 [Ω]. Determinar el circuito equivalente en tanto por unidad base propia, cuando se conectan como autotransformador trifásico estrella-estrella con las siguientes razones de transformación: a) 7.620 / 8.000 [V], b) 8.000 / 7.620 [V]

5.11. Si en cada T/F monofásico del problema anterior se conectan en serie los bobinados primario y secundario y luego se forma un autotransformador trifásico en conexión delta-delta, determinar las tensiones primaria y secundaria entre líneas cuando se conecta como reductor y como elevador. En ambos casos determinar también el ángulo de desfase entre las tensiones primaria y secundaria. Considere cada transformador monofásico como ideal.

5.12. Se tiene un Transformador con Cambio de Derivación (TCD) de 200 [MVA], 154/69 + 9 x 1,25% [kV], con una reactancia de cortocircuito del 16%. Determinar el circuito equivalente en pu cuando su característica de funcionamiento es: a) 154/69 - 5 x 1,25%, b) 154/69 + 4 x 1,25%.

5.13. El TCD anterior se conecta en paralelo con un T/F de 150 [MVA], 154/69 [kV], sin cambiador de TAP y con una reactancia del 8%. Si la tensión aplicada es la nominal y el TCD tiene su secundario en el TAP + 6, determinar la potencia suministrada por cada T/F cuando ambos alimentan una carga de 300 [MVA] con factor de potencia 0,8 inductivo.

5.14. Un TTTE de razón 220/60/10 [kV] (P/S/T), de 75/75/25 [MVA], conexión $YY\Delta_1$, con las siguientes reactancias de dispersión:

X_{ps} = 11.5% base 75 [MVA]

X_{st} = 2.5% base 25 [MVA]

X_{pt} = 0.2533 [Ω], medida en el lado de 10 [kV]

Alimenta un consumo de 68 + j35 [MVA], independiente de la tensión en el lado de 60 [kV]. En el terciario está conectado un banco de condensadores estáticos que a tensión nominal 10 [kV] entrega 21 [MVAr]. Calcular las tensiones existentes en el primario y en el terciario del transformador, si la tensión en el consumo es de 61.8 [kV]