

Transformadores – funcionamiento en paralelo

1 Introducción:

1.1 Nomenclatura

- U, I , fasores de tensión y corriente (n° complejo)
- U, I , valores eficaces de tensión y corriente (n° real)
- Z , impedancia (n° complejo)
- a relación de transformación (n° real)

Se estudiará primero el comportamiento de dos transformadores monofásicos funcionando en paralelo.

En el caso de transformadores trifásicos, valen las mismas consideraciones que se realizan para transformadores monofásicos, con las restricciones referentes al grupo de conexión.

A fin de realizar un análisis general se considerarán transformadores de distinta potencia nominal, relación de transformación e impedancia porcentual de cortocircuito.

Para simplificar el estudio se utilizará el modelo L del circuito equivalente (figura 1), con los parámetros reducidos al secundario.

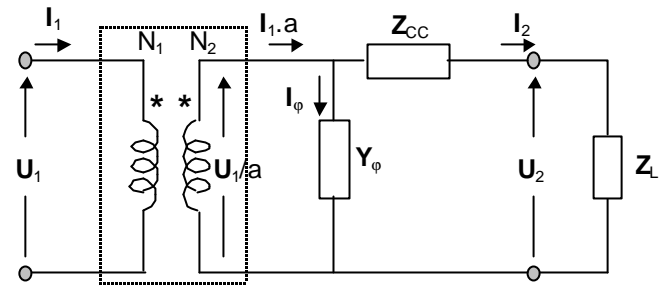


Figura 1

2 Transformadores monofásicos en paralelo:

El diagrama de la figura 2 muestra los circuitos equivalente de los transformadores conectados en paralelo, donde se ha prescindido de las ramas de excitación Y_ϕ y se han reemplazado las nomenclaturas de las impedancias de cortocircuito Z_{CC1} y Z_{CC2} por Z_A y Z_B para simplificar la notación. Nótese en el esquema la correspondencia de los bornes homólogos.

Para poder evaluar la corriente que circula por cada transformador se considerará primero los transformadores sin carga, obteniendo la tensión en vacío (U_{20}) en bornes del secundario y la corriente de circulación entre transformadores a causa de la diferencia entre las relaciones de transformación. Luego, utilizando el equivalente Thévenin, se determina el aporte a la corriente de carga I_L de cada máquina.

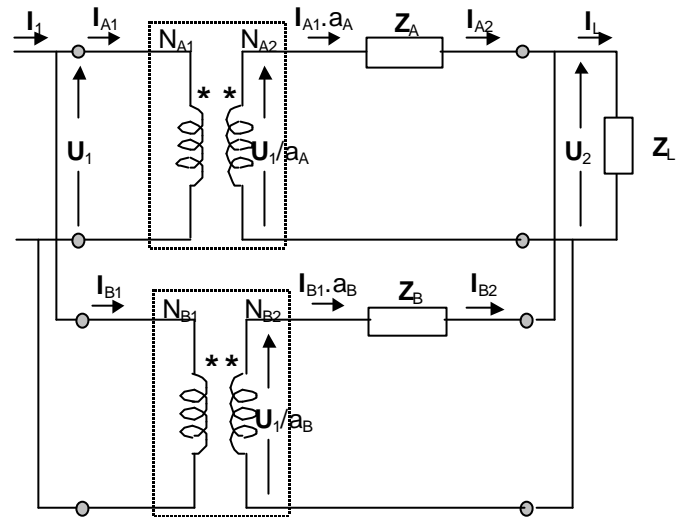


Figura 2

2.1 Corriente de circulación

Se analiza el comportamiento del paralelo en vacío. Suponiendo $a_A < a_B$, la corriente de circulación será:

$$I_C = I_{AC} = -I_{BC} = \frac{1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{U_1}{a_A} - \frac{U_1}{a_B} \right) =$$

$$I_C = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{1}{a_A} - \frac{1}{a_B} \right)$$

y la relación entre el voltaje secundario en vacío y el voltaje primario:

$$U_{20} = \frac{U_1}{a_A} - \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{1}{a_A} - \frac{1}{a_B} \right) Z_A$$

$$U_{20} = U_1 \left[\frac{1}{a_A} - \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \left(\frac{1}{a_A} - \frac{1}{a_B} \right) \right]$$

$$U_{20} = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right)$$

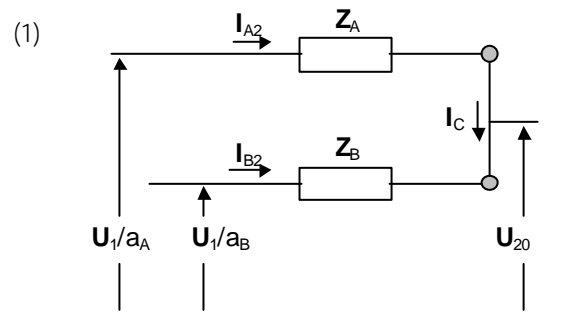


Figura 3

Conclusión: para que no exista corriente de circulación ($I_C = 0$) debe cumplirse que

$$a_A = a_B = a$$

En este caso, de la expresión (2), se ve que $U_{20} = U_1/a$

2.2 Aporte a la corriente de la carga

2.2.1 Condiciones

Si se reemplaza el circuito de la figura 3 por el Thevenin equivalente (figura 4), puede determinarse la relación entre la corriente de carga y las de cada transformador a partir de:

$$I_L \cdot \frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = I_{AL} \cdot Z_A = I_{BL} \cdot Z_B \quad (3)$$

$$I_{AL} = I_L \cdot \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (4)$$

$$I_{BL} = I_L \cdot \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (5)$$

La tensión Thevenin U_{20} será:

$$U_{20} = U_2 + I_L \cdot \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} \right) \quad (6)$$

De la expresión (3), para que ambos transformadores tomen su corriente nominal simultáneamente debe cumplirse que:

$$I_{Anom} \cdot Z_A = I_{Bnom} \cdot Z_B$$

o, igualmente tomando los módulos,

$$I_{Anom} \cdot Z_A = I_{Bnom} \cdot Z_B$$

Multiplicando miembro a miembro por la tensión nominal:

$$S_{Anom} \cdot Z_A = S_{Bnom} \cdot Z_B$$

Dividiendo miembro a miembro por la tensión nominal y tomando como valores base las tensiones ($U_{base} = U_{Anom} = U_{Bnom}$) y corrientes nominales ($I_{Abase} = I_{Anom}$, $I_{Bbase} = I_{Bnom}$) en cada transformador:

$$I_{Abase} \cdot Z_A / U_{base} = I_{Bbase} \cdot Z_B / U_{base}$$

$$Z_A / (U_{base} / I_{Abase}) = Z_B / (U_{base} / I_{Bbase})$$

$$Z_A / Z_{Abase} = Z_B / Z_{Bbase}$$

$$rZ_A = rZ_B$$

Conclusión: para que ambos transformadores tomen su corriente nominal simultáneamente deben ser iguales:

- o los productos de la potencia aparente nominal en [VA] por el valor de la impedancia de cortocircuito en [Ω] respectivas, o
- o los relativos de impedancia de cortocircuito, tomados cada uno en su propia base.

2.2.2 Valor de la tensión primaria con la impedancia de carga y tensión en el secundario como dato:

Como: $I_L = \frac{U_2}{Z_L}$ la ecuación (6) queda:

$$U_{20} = U_2 \left[1 + \frac{1}{Z_L} \cdot \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} \right) \right] \quad (7)$$

Igualando la (2) con la (7):

$$\frac{U_1}{Z_A + Z_B} \cdot \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right) = U_2 \left[1 + \frac{1}{Z_L} \cdot \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} \right) \right]$$

$$U_1 = U_2 \cdot (Z_A + Z_B + Z_A \cdot Z_B / Z_L) \cdot \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{a_A \cdot a_B \cdot (Z_A + Z_B)}{Z_A \cdot a_A + Z_B \cdot a_B} \cdot \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_L} + Z_A + Z_B \right) \quad (8')$$

La corriente en cada transformador se determina reemplazando I_L en las ecuaciones (4) y (5).

2.2.3 Valor de la tensión secundaria y corriente en la carga con la impedancia de carga y tensión en el primario como dato:

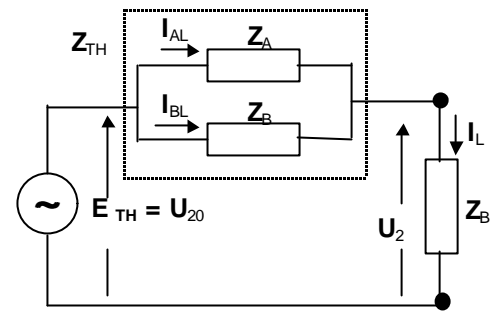


Figura 4

$$U_2 = \frac{U_1}{Z_A + Z_B + Z_A \cdot Z_B / Z_L} \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right) \quad (9)$$

$$I_L = \frac{U_1}{Z_L \cdot (Z_A + Z_B) + Z_A \cdot Z_B} \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right) \quad (10)$$

2.3 Corriente de cada transformador

Sumando las corrientes obtenidas en los puntos 2.1 y 2.2:

$$I_A = I_{AC} + I_{AL} = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{1}{a_A} - \frac{1}{a_B} \right) + I_L \cdot \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \quad (11)$$

$$I_B = I_{BC} + I_{BL} = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left(\frac{1}{a_B} - \frac{1}{a_A} \right) + I_L \cdot \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \quad (12)$$

2.3.1 Corrientes con la impedancia de carga y tensión en el secundario como dato:

Reemplazando (6) y (8) en (11) y (12)

$$I_A = I_{AC} + I_{AL} = U_2 \cdot \left[\frac{a_B - a_A}{Z_A \cdot a_A + Z_B \cdot a_B} \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_L} + Z_A + Z_B \right) + \frac{Z_B}{Z_L \cdot (Z_A + Z_B)} \right] \quad (13)$$

$$I_B = I_{BC} + I_{BL} = U_2 \cdot \left[\frac{a_A - a_B}{Z_A \cdot a_A + Z_B \cdot a_B} \left(\frac{Z_A \cdot Z_B}{Z_L} + Z_A + Z_B \right) + \frac{Z_A}{Z_L \cdot (Z_A + Z_B)} \right] \quad (14)$$

2.3.2 Corrientes con la impedancia de carga y tensión en el primario como dato:

Reemplazando (10) en (11) y (12)

$$I_A = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left[\left(\frac{1}{a_A} - \frac{1}{a_B} \right) + \frac{Z_B}{Z_L \cdot (Z_A + Z_B) + Z_A \cdot Z_B} \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right) \right] \quad (15)$$

$$I_B = \frac{U_1}{Z_A + Z_B} \left[\left(\frac{1}{a_B} - \frac{1}{a_A} \right) + \frac{Z_A}{Z_L \cdot (Z_A + Z_B) + Z_A \cdot Z_B} \left(\frac{Z_B}{a_A} + \frac{Z_A}{a_B} \right) \right] \quad (16)$$

3 Resumen

El correcto funcionamiento en paralelo de transformadores implica los siguientes puntos básicos:

- o El conexionado correcto de sus terminales (correspondencia entre bornes homólogos)
- o La pertenencia al mismo grupo de conexión (transformadores trifásicos)
- o El aprovechamiento total de sus capacidades nominales.

Para el tercer punto deben cumplirse las condiciones definidas en el punto 2.2, a saber:

- o Ausencia de corriente de circulación, es decir los transformadores deben poseer relaciones iguales o con la menor diferencia posible.
- o Los transformadores deben alcanzar su potencia nominal simultáneamente, para lo cual sus valores relativos de impedancia de cortocircuito (tomadas en la base propia) deben ser iguales.