TRANSFORMADORES EN PARALELO

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Condiciones para que varios transformadores se puedan conectar en paralelo

Cuando varios transformadores se conectan en paralelo se unen entre sí todos los primarios, por una parte, y todos los secundarios por otra. Esto obliga a que todos los transformadores en paralelo tengan las mismas tensiones (tanto en módulo como en argumento) primaria y secundaria. De esto se deduce que una condición que se debe exigir siempre para que varios transformadores puedan conectarse en paralelo es que tengan las mismas tensiones nominales en el primario y en el secundario; es decir, la misma relación de transformación.

En el caso de que se trate de transformadores trifásicos conectados en paralelo, no sólo es necesario garantizar que los valores eficaces de las tensiones nominales primaria y secundaria (de línea) de todos los transformadores sean iguales, sino también sus argumentos. Esto indica que las condiciones necesarias para que varios transformadores trifásicos se puedan conectar en paralelo son que tengan la misma relación de transformación de tensiones m_T y el mismo índice horario.

El hecho de que todos los transformadores puestos en paralelo tengan iguales tensiones primaria y secundaria significa que, cuando se reducen los secundarios al primario, en todos los transformadores en paralelo se produce siempre la misma caída de tensión. De esto se puede deducir (como se demuestra en el siguiente apartado de este texto) que para *m* transformadores en paralelo se verifica la siguiente relación:

$$C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_B \cdot \varepsilon_{Bcc} = \ldots = C_M \cdot \varepsilon_{Mcc}$$

Por lo tanto, interesa que las tensiones relativas de cortocircuito ε_{cc} de todos los transformadores sean iguales para que queden igualmente cargados y se verifique siempre que:

$$C_A = C_B = \ldots = C_M$$

Así es posible conseguir que todos puedan llegar a proporcionar simultáneamente su potencia nominal (todos con C = 1) sin sobrecargar ninguno.

En resumen, las condiciones que obligatoriamente deben cumplir los transformadores que se desean conectar en paralelo son éstas:

* Transformadores monofásicos: Iguales relaciones de transformación m.
* Transformadores trifásicos: Iguales relaciones de transformación de tensiones m_T e iguales índices horarios.

Además, es recomendable que los transformadores a conectar en paralelo (mono o trifásicos) también verifiquen la condición de igualdad de tensiones relativas de cortocircuito ε_{cc}.

Ecuación fundamental para transformadores en paralelo

Cuando varios transformadores están en paralelo se conectan entre sí todos los devanados primarios por una parte y todos los devanados secundarios por otra. Esto obliga a que todos los transformadores tengan la misma tensión primaria y también la misma tensión secundaria. En consecuencia, en todos los transformadores puestos en paralelo se produce la misma caída de tensión. De este hecho se van a obtener unas relaciones muy interesantes, como se va a comprobar seguidamente.

Considérense dos transformadores, A y B, conectados en paralelo y, por lo tanto, ambos con las mismas tensiones nominales primaria y secundaria. Reduciendo al primario los secundarios de ambas máquinas y utilizando sus circuitos equivalentes aproximados se obtiene el circuito equivalente de la Fig. 1.

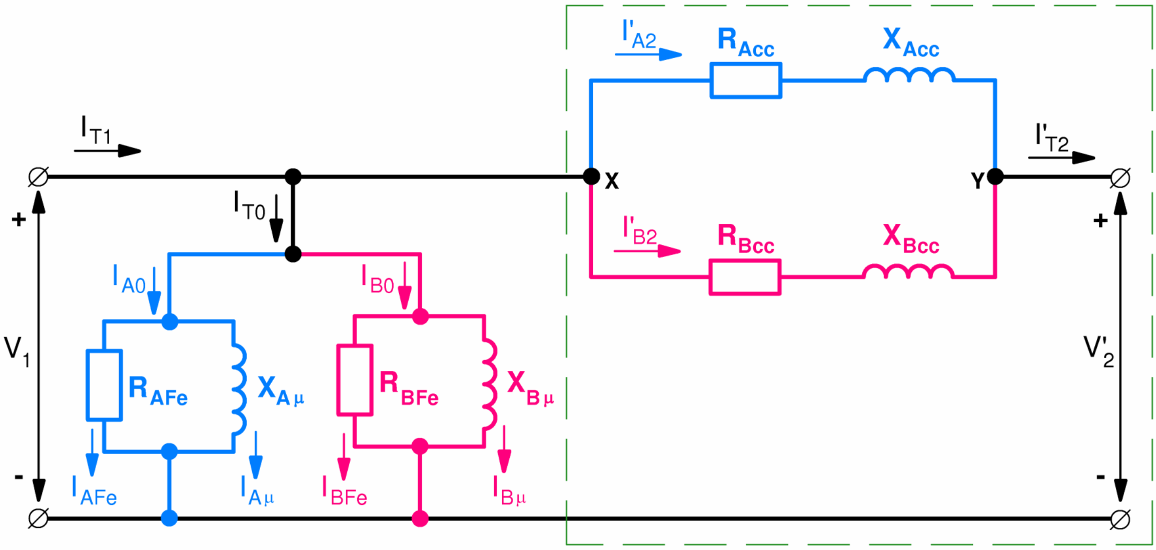

Fig. 1: Circuito equivalente de dos transformadores, A y B, puestos en paralelo

En esta figura se han utilizado los subíndices A y B para designar a las magnitudes de los transformadores A y B, respectivamente, y el subíndice T para las corrientes totales del conjunto de los dos transformadores en paralelo. Las tensiones V_1 y V'_2 son comunes a ambos aparatos.

Para el estudio de la caída de tensión basta con utilizar la parte del circuito equivalente de la Fig. 1 que está encerrada dentro de la línea de trazos. En resumen, se va a trabajar con el circuito equivalente de la Fig. 2.

Por otra parte, en muchas ocasiones, a poco importante que sea la corriente que circula por el secundario, se podrá despreciar la corriente de vacío, I_{T0}, en el circuito equivalente de la Fig. 2. Esto significa el considerar que se verifica que

$$\text{Si } I_{T0} \ll I'_{T2} \quad \rightarrow \quad \bar{I}_{T1} \approx \bar{I}'_{T2}$$

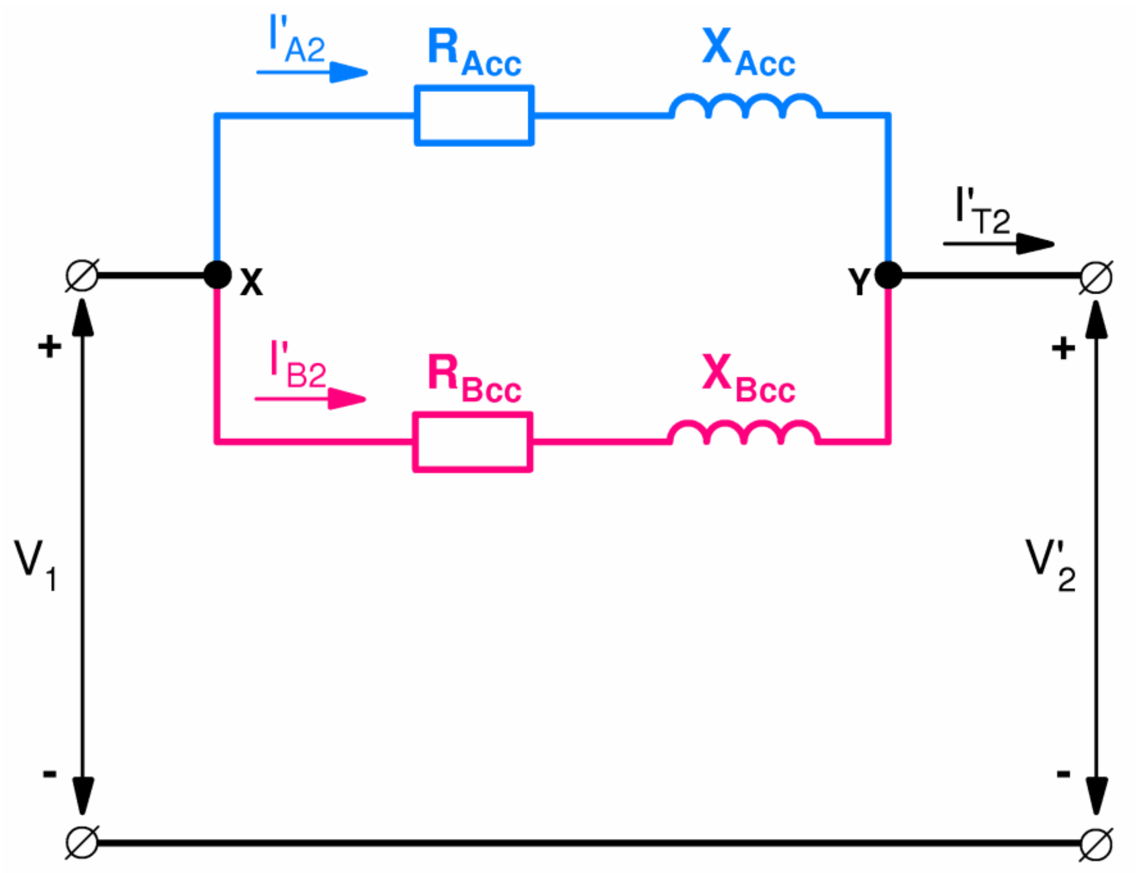

Fig. 2: Circuito equivalente simplificado de dos transformadores, A y B, en paralelo

En la Fig. 2 es fácil comprobar que la caída de tensión entre los nudos X e Y se puede calcular tanto como la caída de tensión en la impedancia de cortocircuito del transformador A como en la del B:

$$\boxed{\overline{V}_{XY} = \overline{V}_1 - \overline{V'}_2 = \overline{Z}_{Acc} \cdot \overline{I'}_{A2} = \overline{Z}_{Bcc} \cdot \overline{I'}_{B2}} \qquad (1)$$

Es sabido que el triángulo de impedancias de cortocircuito de un transformador es el representado en la Fig. 3.

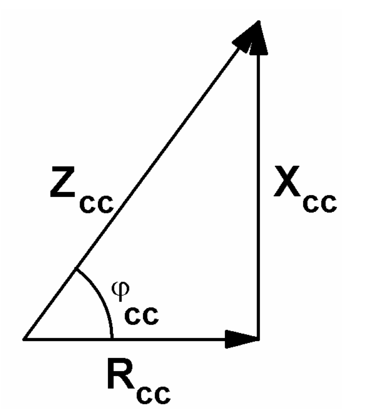

Fig. 3: Triángulo de impedancias de cortocircuito de un transformador

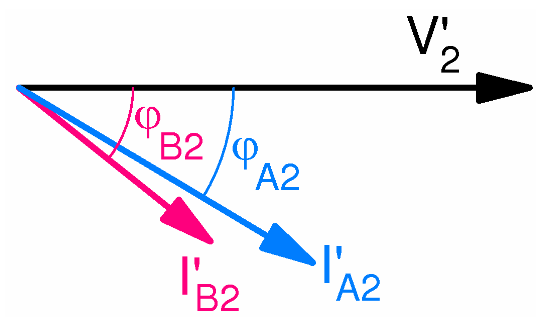

Fig. 4: Diagrama fasorial de dos transformadores en paralelo

Luego, se tiene que:

$$\overline{Z}_{Acc} = Z_{Acc} \underline{|\varphi_{Acc}} ; \qquad \overline{Z}_{Bcc} = Z_{Bcc} \underline{|\varphi_{Bcc}}$$

Por otra parte, si se toma el fasor de tensión secundaria $\overline{V}'_2$ como referencia, se obtiene el diagrama fasorial de la Fig. 4. De este diagrama se deduce lo siguiente:

$$\overline{I}'_{A2} = I'_{A2} \underline{|-\varphi_{A2}} ; \qquad \overline{I}'_{B2} = I'_{B2} \underline{|-\varphi_{B2}}$$

Luego, la expresión (1) se puede poner así:

$$\left(Z_{Acc} \underline{|\varphi_{Acc}}\right) \cdot \left(I'_{A2} \underline{|-\varphi_{A2}}\right) = \left(Z_{Bcc} \underline{|\varphi_{Bcc}}\right) \cdot \left(I'_{B2} \underline{|-\varphi_{B2}}\right) \qquad (2)$$

Trabajando por separado con los módulos y los argumentos de las magnitudes complejas de la ecuación (2) se obtienen las siguientes conclusiones.

* El módulo del producto de dos complejos es igual al producto de sus módulos. Luego, de (2) se deduce que:

$$Z_{Acc} \cdot I'_{A2} = Z_{Bcc} \cdot I'_{B2} \qquad (3)$$

Recuérdese que el índice de carga C verifica lo siguiente

$$C = \frac{I'_2}{I_{1N}} \quad \rightarrow \quad I'_2 = C \cdot I_{1N}$$

y que la tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} es así:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{cc}\, I_{1N}}{V_{1N}} 100 \quad \rightarrow \quad Z_{cc} = \frac{V_{1N}}{I_{1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{cc}}{100}$$

De todo lo anterior, se obtiene que la relación (3) se convierte en

$$\left(\frac{V_{1N}}{I_{A1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{Acc}}{100}\right) \cdot \left(C_A \cdot I_{A1N}\right) = \left(\frac{V_{1N}}{I_{B1N}} \cdot \frac{\varepsilon_{Bcc}}{100}\right) \cdot \left(C_B \cdot I_{B1N}\right)$$

$$\boxed{C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_B \cdot \varepsilon_{Bcc}}$$

<u>El producto $\underline{C \cdot \varepsilon_{cc}}$ toma el mismo valor para todos los transformadores puestos en paralelo</u>. Esta es la ecuación fundamental que permitirá el estudio de transformadores conectados en paralelo.

* Por otra parte, el argumento del producto de dos complejos es igual a la suma de sus argumentos. Luego, de (2) se deduce que:

$$\varphi_{Acc} + (-\varphi_{A2}) = \varphi_{Bcc} + (-\varphi_{B2}) \quad \rightarrow \quad \boxed{\varphi_{B2} - \varphi_{A2} = \varphi_{Bcc} - \varphi_{Acc}} \qquad (4)$$

Potencia máxima total

En el caso de que las tensiones relativas de cortocircuito de los transformadores no sean iguales sucede que:

* Los transformadores están desigualmente cargados. El más cargado (el más "duro"), es decir, el que tiene un índice de carga mayor, es aquel cuya tensión relativa de cortocircuito ε_{cc} es menor. Obviamente interesa que el transformador más cargado sea el de mayor potencia nominal para obtener una mayor potencia máxima total.

* Sea J el transformador más cargado. Si no se desea sobrecargar ninguno de los transformadores, la potencia máxima que debe proporcionar cada transformador se obtendrá cuando el transformador más cargado J proporcione su potencia nominal, es decir, cuando su índice de carga valga la unidad. Luego:

$$\left.\begin{array}{l} C_J = 1 \\ C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = C_J \cdot \varepsilon_{Jcc} \end{array}\right\} C_A \cdot \varepsilon_{Acc} = \varepsilon_{Jcc} \quad \rightarrow \quad C_A = \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}}$$

Es decir, la máxima potencia que debe suministrar el transformador A será:

$$S_A = \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}} S_{AN}$$

Normalmente los transformadores tienen ángulos φ_{cc} muy similares, por lo que de la expresión (4) se deduce lo siguiente:

$$\varphi_{Acc} \approx \varphi_{Bcc} \quad \rightarrow \quad \varphi_{B2} - \varphi_{A2} = \varphi_{Bcc} - \varphi_{Acc} \approx 0$$

$$\boxed{\varphi_{A2} \approx \varphi_{B2}}$$

Se observa, pues, que las corrientes que circulan por los transformadores en paralelo prácticamente están en fase. Por ello no se comete un error apreciable al sumarlas aritméticamente y no geométricamente:

$$I'_{T2} \approx I'_{A2} + I'_{B2} + \ldots + I'_{M2}$$

Luego, también se cumple que:

$$S_T \approx S_A + S_B + \ldots + S_M$$

Por consiguiente, la máxima potencia que pueden proporcionar los transformadores en paralelo sin sobrecargar ninguno de ellos es:

$$S_{TN} \approx \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Acc}} S_{AN} + \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Bcc}} S_{BN} + \ldots + \frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Mcc}} S_{MN}$$

donde J es el transformador más cargado (es decir, el de menor tensión relativa de cortocircuito ε_{cc}).

En el caso de que no se pudiera aceptar que $\varphi_{A2} \approx \varphi_{B2}$ es preciso operar con complejos y la expresión anterior se convierte en

$$S_{TN} \approx \left| \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\bar{\varepsilon}_{Acc}} S_{AN} + \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\bar{\varepsilon}_{Bcc}} S_{BN} + \ldots + \frac{\bar{\varepsilon}_{Jcc}}{\bar{\varepsilon}_{Mcc}} S_{MN} \right|$$

donde | | es la operación de calcular el módulo de un complejo y el parámetro $\bar{\varepsilon}_{cc}$ es:

$$\overline{\varepsilon_{cc}} = \varepsilon_{cc} \underline{| \varphi_{cc}} = \overline{\varepsilon_{Rcc}} + j\, \overline{\varepsilon_{Xcc}} = \frac{I_{1N} \cdot \overline{Z_{cc}}}{V_{1N}} 100$$

Transformador equivalente a varios en paralelo

Un conjunto de M transformadores conectados en paralelo alimentando cargas equilibradas equivale a un transformador de estas características:

* Igual relación de transformación de tensiones m_T e índice horario que todos los transformadores en paralelo (si todos los transformadores no tuvieran los mismos m_T e índice horario no podrían conectarse en paralelo).
* En el caso trifásico la conexión del transformador equivalente puede ser cualquiera. Usualmente se considera que el primario está conectado en estrella.
* La potencia de pérdidas en el hierro del transformador equivalente es igual a la suma de las pérdidas en el hierro de los transformadores puestos en paralelo. Análogamente, la corriente de vacío del transformador equivalente es igual a la suma vectorial de las corrientes de vacío de los transformadores conectados en paralelo.
* La potencia nominal del transformador equivalente es la potencia máxima total S_{TN}.
* La tensión relativa de cortocircuito ε_{Tcc} del transformador equivalente se obtiene partiendo de que las caídas de tensión en todos los transformadores en paralelo y en el transformador equivalente son iguales. Por lo tanto, se cumplirá la siguiente relación entre el transformador equivalente T y el más cargado J:

$$\bar{Z}_{Tcc} \cdot \bar{I}'_{T2} = \bar{Z}_{Jcc} \cdot \bar{I}'_{J2}$$

que se convierte en

$$\varepsilon_{Tcc} \cdot C_T = \varepsilon_{Jcc} \cdot C_J$$

Ahora bien, cuando el transformador más cargado J proporciona la totalidad de su potencia nominal ($C_J = 1$), el conjunto de todos transformadores en paralelo suministra la potencia S_{TN} y $C_T = 1$. En consecuencia,

$$C_J = 1 \;\rightarrow\; C_T = 1 \;\rightarrow\; \boxed{\varepsilon_{Tcc} = \varepsilon_{Jcc}}$$

La tensión relativa de cortocircuito del transformador equivalente a varios en paralelo es igual a la del transformador más cargado (de menor tensión relativa de cortocircuito).

* En el caso de que los ángulos φ_{cc} de todos los transformadores puestos en paralelo sean parecidos, se puede suponer que $\varphi_{Tcc} \approx \varphi_{Jcc}$ y

$$\bar{\varepsilon}_{Tcc} = \varepsilon_{Tcc} \underline{|\ \varphi_{Tcc}} = \varepsilon_{Jcc} \underline{|\ \varphi_{Jcc}} = \bar{\varepsilon}_{Jcc}$$

$$\bar{\varepsilon}_{Tcc} = \bar{\varepsilon}_{Jcc} \quad \rightarrow \quad \boxed{\varepsilon_{TRcc} = \varepsilon_{JRcc} \; ; \; \varepsilon_{TXcc} = \varepsilon_{JXcc}}$$

De todos modos, es más preciso calcular los parámetros ε_{TRcc} y ε_{TXcc} como se indica a continuación.

El valor del parámetro ε_{TRcc} será tal que haga que las pérdidas en el cobre nominales del transformador equivalente sean iguales a la suma de las pérdidas en el cobre del conjunto de los transformadores en paralelo cuando están proporcionando la potencia S_{TN}.

En estas condiciones uno de los transformadores en paralelo, el K, tiene estas pérdidas en el cobre:

$$P_{KCu} = C_K^2 \, P_{KCuN} = \left(\frac{\varepsilon_{Jcc}}{\varepsilon_{Kcc}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{KRcc}}{100} \, S_{KN} \right)$$

Luego:

$$P_{TCuN} = \frac{\varepsilon_{TRcc}}{100} \, S_{TN} = \frac{\varepsilon_{Jcc}^2}{100} \left[\frac{\varepsilon_{ARcc}}{\varepsilon_{Acc}^2} \, S_{AN} + \frac{\varepsilon_{BRcc}}{\varepsilon_{Bcc}^2} \, S_{BN} + \cdots + \frac{\varepsilon_{MRcc}}{\varepsilon_{Mcc}^2} \, S_{MN} \right]$$

Por lo tanto, podemos obtener ε_{TRcc} despejándolo de la siguiente expresión

$$\boxed{\frac{\varepsilon_{TRcc}}{\varepsilon_{Jcc}^2} \, S_{TN} = \frac{\varepsilon_{ARcc}}{\varepsilon_{Acc}^2} \, S_{AN} + \frac{\varepsilon_{BRcc}}{\varepsilon_{Bcc}^2} \, S_{BN} + \cdots + \frac{\varepsilon_{MRcc}}{\varepsilon_{Mcc}^2} \, S_{MN}}$$

Y, teniendo en cuenta que $\varepsilon_{Tcc} = \varepsilon_{Jcc}$, se deduce que

$$\boxed{\varepsilon_{TXcc} = \sqrt{\varepsilon_{Jcc}^2 - \varepsilon_{TRcc}^2}}$$