

TEMA 5: TRANSFORMADORES.

5.1 ¿Qué son? Los transformadores son componentes que permiten modificar la tensión de una línea de corriente alterna con mucha eficiencia. Así pues, un transformador puede ser utilizado para convertir una línea de 220 V en otra de 2 kV, y viceversa. La aplicación más frecuente de un transformador la encontramos en el transporte de la energía eléctrica, puesto que, para que la intensidad de la corriente no sea tan grande y se puedan utilizar

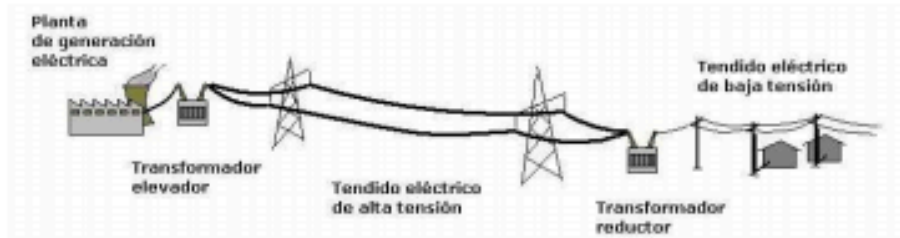


Figura 1 Transporte de la energía eléctrica.

cables de menor sección, es conveniente que el tramo de mayor longitud se realice usando alta tensión¹. Para esto, se utiliza un transformador **elevador** para subir el valor de la tensión en el punto de entrada de la electricidad o en el sitio de producción de la misma, y luego otro transformador **reductor**, al final de la línea, vuelve a convertir la tensión al valor deseado para su distribución final.

5.2 ¿Cómo funcionan? Los transformadores funcionan, por un lado, gracias al campo magnético oscilante que produce una bobina cuando por ella circula una corriente alterna y por el otro: al principio de la inducción de Faraday que permite transformar el campo magnético oscilante en una f.e.m. (también alterna) en el cualquier arrollamiento que se encuentre a lo largo del flujo magnético mencionado.

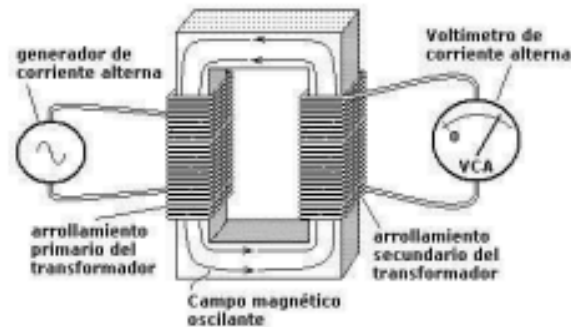


Figura 2 Esquema simplificado de un transformador.

El arrollamiento en donde se conecta el generador recibe el nombre de **primario** del transformador, mientras que cualquier otro que sirva para "recoger" la fuerza electromotriz del campo magnético producido por el primario recibe el nombre de arrollamiento **secundario**. Como es fácil de imaginar, un transformador puede tener más de un bobinado secundario.

5.3 Ecuaciones fundamentales del transformador ideal. En la Figura 3 vemos los dos símbolos usados para el transformador. Allí se han escrito también las relaciones fundamentales que valen para un transformador **ideal**. En primer lugar aparece la relación de transformación **m** y su relación con el número de vueltas, tensión y corrientes en el primario y secundario. Más abajo aparecen las llamadas ecuaciones fundamentales del

¹ $P = V \cos(\varphi)$, por lo que $I = P/[V \cos(\varphi)]$. De modo que, dejando P y $\cos(\varphi)$ constantes, se puede ver que cuánto más grande sea V tanto menor será I .

transformador que establecen que las potencias activa, reactiva y aparente son iguales a ambos lados del transformador.

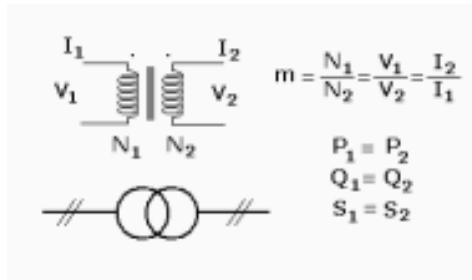


Figura 3. Símbolos del transformador y ecuaciones fundamentales del transformador ideal.

Debe señalarse que el transformador que se muestra en la Figura 3 es un transformador monofásico, puesto que tiene solo dos terminales y puede por lo tanto conectarse a una sola fase. Así mismo, debe notarse que arriba, junto a cada bobina aparecen unos puntos que indican que esos terminales tienen en todo momento la misma polaridad.

Cuando se especifica un transformador, se escriben las **tensiones nominales** del primario y el secundario y la **potencia aparente nominal**. Así, por ejemplo, si se tiene un transformador monofásico de 220/24 V y 5 VA, se quiere decir con esto que, en condiciones normales de trabajo, este transformador tendrá su primario conectado a una tensión (efectiva) de 220 V y el secundario entregará una tensión alterna de 24 V (efectivo), y que tanto el primario como el secundario estarán desarrollando una potencia aparente $S = S_n = 5$ VA.

Debe saberse que a partir de estos valores y usando las ecuaciones del transformador, pueden deducirse las corrientes nominales del primario y secundario, respectivamente. En efecto, $S_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n}$ de modo que $I_{1n} = S_n / V_{1n}$ y $I_{2n} = S_n / V_{2n}$.

Otras características importantes del transformador se derivan de los llamados ensayos en **vacío** y en **cortocircuito** que pasamos a describir a continuación.

5.4 Ensayo en vacío de un transformador real. Si se conecta el primario del transformador **real** a su tensión nominal y se deja abierto el secundario, la potencia activa que consume el transformador en esas condiciones es debido a las pérdidas en el núcleo por histéresis y corrientes parásitas (Foucault) en los núcleos, así pues $P_{\text{vacío}} = P_{Fe}$.

Debe saberse que estando en vacío, es decir son ninguna carga sobre el secundario, la intensidad de la corriente que pasa por el primario no es cero. En estas condiciones, la corriente que pasa por el primario tiene dos contribuciones: una llamada **corriente de magnetización**, porque es la responsable de crear el campo

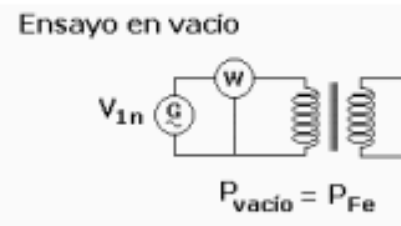


Figura 4

Ensayo en cortocircuito

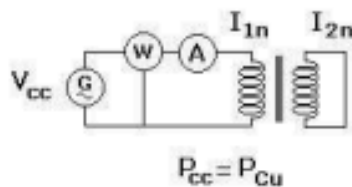


Figura 5

conductores P_{Cu} , es decir $P_{cc} = P_{Cu}$.

Debe notarse que, en el ensayo en cortocircuito, siendo que la corriente del secundario es igual a la nominal, la corriente en el primario será también igual a su valor nominal.

magnético en el núcleo del transformador y tiene un carácter puramente inductivo y otra de carácter resistivo que da cuenta de la pérdida de potencia mencionada anteriormente.

5.5 Ensayo en cortocircuito de un transformador real.

Si se pone en cortocircuito el secundario y se sube la tensión del primario hasta que la intensidad de la corriente del secundario sea igual a la nominal, el valor de esa tensión se llama tensión de cortocircuito V_{cc} . La potencia activa que se consume en estas condiciones P_{cc} es debida fundamentalmente a las pérdidas óhmica en los

La relación entre la tensión de cortocircuito y la nominal del primario es llamada tensión relativa porcentual de cortocircuito $u_{cc} = 100 V_{cc} / V_{1n}$, y el desfase que se tenga en este ensayo recibe el nombre de desfase de cortocircuito ϕ_{cc} . Este último se puede obtener usando la fórmula

$$\cos(\phi_{cc}) = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1n}} = \frac{u_{cc} P_{cc}}{100 S_n} \quad (\text{Ec. 1})$$

5.6 Cálculo de la caída de tensión en función de la carga. Si por el secundario del transformador **real**, es decir **no-ideal**, circula una corriente I_2 (menor que I_{2n}), la tensión es en general diferente que la nominal V_{2n} . Si definimos la caída de tensión porcentual relativa como

$$u = 100 \frac{V_{2n} - V_2}{V_{2n}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Se tiene que

$$u = \beta [u_R \cos(\phi) + u_X \sin(\phi)] \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde ϕ es el desfase entre la tensión y la corriente en el secundario², β es el factor de carga ($\beta = I_2/I_{2n}$), y

$$u_R = u_{cc} \cos(\phi_{cc}) \quad \text{y} \quad u_X = u_{cc} \sin(\phi_{cc}).$$

A partir de la Ec.(3) podremos obtener la tensión del secundario de un transformador real usando la expresión

$$V_2 = V_{2n} (1 - 0.01 u) \quad (\text{Ec. 4})$$

Nótese que u_R y u_X se obtienen de la prueba de cortocircuito y son propias del transformador como lo son las corrientes y tensiones nominales. Mientras que u depende de lo que haya sido conectado al secundario del transformador. Curiosamente, puede verse que u puede ser negativo si el desfase es negativo, y por lo tanto V_2 podría llegar a ser más grande que V_{2n} . Algo que ocurre cuando la carga tiene un fuerte carácter capacitivo (véase la nota al pie de página).

5.7 Corriente de cortocircuito. Lo que se describe a continuación no debe confundirse con el ensayo de cortocircuito, porque en este último caso la tensión en el primario V_{cc} es menor que la nominal V_{1n} . En cambio, la corriente de cortocircuito es la que podría pasar por el secundario cuando se establece un cortocircuito sobre este y la tensión del primario es V_1 (eventualmente igual a V_{1n} y posiblemente mayor que V_{cc}). Esta corriente, que la designamos como I_{cc} , se puede calcular aplicando la regla de tres a partir de los datos del ensayo de cortocircuito. En efecto, vimos que cuando el secundario tiene un cortocircuito y aplicamos sobre el primario una tensión V_{cc} , por el secundario pasa una corriente igual a la nominal I_{2n} . De modo que si aplicamos en el primario una tensión V_1 y el secundario tiene un cortocircuito, por este deberá pasar una corriente igual a

$$I_{cc} = I_{2n} \frac{V_1}{V_{cc}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Aquí se ve, por otra parte, que un valor grande de V_{cc} produce menores corrientes de cortocircuito, mientras que un transformador con una V_{cc} pequeña conlleva valores de I_{cc} mayores.

² El desfase ϕ debe considerarse positivo para el caso inductivo y negativo para el capacitivo.

5.8 El autotransformador. El autotransformador consiste en un transformador de una sola bobina. La Figura 6 muestra de manera esquemática cómo está construido el autotransformador. Tiene un solo arrollamiento con una derivación intermedia y, por lo tanto, uno de los terminales será común al primario y al secundario. En el caso de esta figura uno de los terminales de los extremos es el común. Si los terminales de la izquierda fuesen el primario tendríamos un autotransformador **reductor**, en otro caso tendríamos un **elevador**.

Para un autotransformador **ideal** valen también las ecuaciones fundamentales que aparecen en la Figura 3. La relación de transformación viene dado por el cociente entre los números de vueltas del bobinado primario al del secundario, independientemente de que una parte de ellos sea común. Así mismo, la intensidad de la corriente en la parte común es igual a la diferencia entre las corrientes del primario y la del secundario.

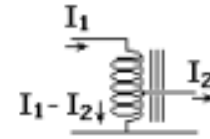


Figura 6

También debe saberse que el autotransformador es en general más económico que un transformador de bobinas separadas por cuanto lleva menos hilos de cobre que este último. Pero, en contrapartida, el autotransformador no desacopla el circuito primario del secundario como lo hace el transformador convencional. Por lo tanto, el autotransformador es menos seguro en términos de accidentes por descargas eléctricas que el transformador convencional.

5.9 El transformador trifásico. Los transformadores para líneas trifásicas, como cualquier otro receptor trifásico, tienen tres pares de terminales primarios y otros tantos de secundarios. Básicamente no son más que tres transformadores monofásicos que, eventualmente pueden estar bobinados sobre el mismo núcleo.

En la Figura 7 vemos la representación esquemática de un transformador trifásico, así como la representación unifilar del mismo. Y en el supuesto de que sean ideales, las ecuaciones fundamentales de la Figura 3 se pueden aplicar a cada uno de esos pares de transformadores.

La dificultad que se agrega en el caso de los transformadores trifásicos, proviene del hecho que el número de conexiones que son posibles en los receptores trifásicos (estrella o triángulo) se multiplica por dos. Así tenemos que los primarios pueden conectarse en estrella o triángulo, y luego los secundarios pueden estar también conectados en estrella o triángulo.

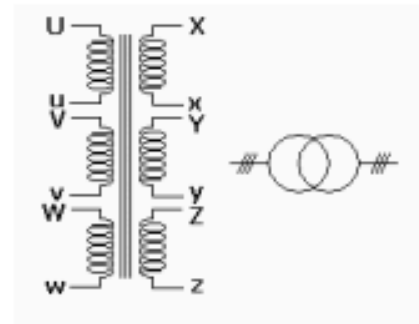


Figura 7

El tipo de conexión utilizado se expresa indicando, para el primario, con una "Y" para estrella y una "D" para triángulo, y para el secundario con las mismas letras en los mismos casos pero en minúsculas. Así, por ejemplo, si se dice que un transformador trifásico tiene una conexión "Yd", esto significa que el primario está conectado en estrella y el secundario en triángulo.

Para saber cuánto vale la tensión de línea del secundario, debe aplicarse primeramente las reglas conocidas para convertir las tensión de línea a las de fase y obtener así la tensión en el primario, luego usar la relación de transformación para obtener la tensión en el secundario y después volver a aplicar las reglas de tensión de fase a línea para obtener la tensión de línea del secundario. Otro tanto vale para las corrientes. En los problemas 7 y 8 se aplican estos conceptos.