

Caracterización de las pérdidas de transformadores de tensión frente a una alimentación desbalanceada

Resumen

El presente trabajo busca identificar el comportamiento de un transformador de tensión en relación con sus pérdidas frente a un sistema trifásico de alimentación que presente distintos grados de desbalance.

Para tal efecto, se contempla la realización de un análisis paramétrico, el cual permite visualizar cuantitativamente el comportamiento de las pérdidas de un transformador en relación con la modificación del factor de desbalance asociado al sistema de alimentación. Cabe mencionar que el factor de desbalance considerado para el presente estudio se encuentra definido a través de la normativa internacional IEC e IEEE por medio de la relación porcentual entre la componente de secuencia negativa y positiva.

Palabras clave

Transformador de tensión. Factor de desbalance. Pérdidas.

Introducción

Cuando se contemplan las pérdidas de un transformador de tensión (TV) alimentado a través de un sistema trifásico desbalanceado, éstas sufren una serie de alteraciones que dependen del grado de desbalance.

Los sistemas trifásicos pueden presentar diferentes grados de desbalance, el cual se produce cuando las tensiones de fase se apartan de su valor nominal y/o

cuando los ángulos de separación entre los fasores que representan la tensión de cada fase se apartan del valor de 120° entre sí.

Considerando la normativa internacional IEC o IEEE, el desbalance en un sistema trifásico se define como la relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa y la magnitud de la componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje. En tal sentido, es objeto del presente trabajo mostrar una forma de cuantificar las pérdidas de un transformador de tensión en función del grado de desbalance de su fuente de alimentación.

Evaluación de las pérdidas frente a un sistema desbalanceado

Los sistemas desbalanceados pueden estudiarse a través de su descomposición en tres sistemas trifásicos, compuestos por un sistema trifásico balanceado de secuencia positiva o directa correspondiente con la secuencia del sistema de distribución en estudio; un sistema trifásico balanceado de secuencia negativa o inversa, el cual posee una secuencia opuesta a la del sistema de distribución en estudio, y una secuencia cero u homopolar, compuesta por una terna de fasores de igual magnitud y fase.

El cálculo de los componentes de secuencias positiva, negativa y homopolar se efectúa a través de la aplicación del teorema de Fortescue y estarán dadas por la



expresión (1).

$$\begin{bmatrix} V_a^{hom} \\ V_a^{pos} \\ V_a^{neg} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Esta última "a" es un operador que genera una rotación de 120° en dirección contraria a la de las agujas de un reloj.

Para el presente trabajo se evalúa el desbalance contemplando la metodología propuesta por la normativa IEC e IEEE, en la cual este se cuantifica a través del factor de desbalance F_{dvn} , que es la relación entre la magnitud del componente de secuencia negativa y la magnitud del componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje (2).

$$F_{dvn} = \frac{|V^{neg}|}{|V^{pos}|} \times 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta lo mencionado, para cuantificar las pérdidas de un transformador trifásico frente a un sistema de tensiones con un grado de desbalance, se analiza la dependencia de sus pérdidas con la variación de la secuencia negativa. Para esto, se alimentará el transformador en estudio con un sistema trifásico de tensiones nominales de secuencia positiva pura (figura 1, donde los fasores de las tensiones de fase se nombran como A, B y C), el cual estará afectado de diferentes sistemas trifásicos de secuencia negativa (figura 1, fasores An, Cn y Bn).

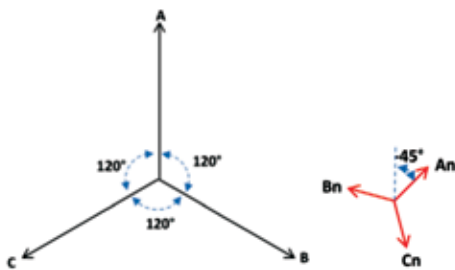


Figura 1. Sistema trifásico de tensiones de secuencia positiva y negativa.

A modo de ejemplo y para mostrar la composición de uno de los sistemas de alimentación al transformador en estudio, se observa un sistema de secuencia negativa, que sumado al sistema de secuencia positiva da como resultado el sistema de la figura 2, cuyos fasores resultantes se denominan como At, Bt y Ct.

Cabe mencionar que para caracterizar las pérdidas del TV se efectúan simulaciones con diferentes alimentaciones, que surgen de variar en módulo y ángulo el sistema de secuencia negativa, teniendo en cuenta que las tensiones de fase resultantes At, Bt y Ct (figura 2) en ningún caso superen los rangos establecidos para el módulo de la tensión, contemplado en la reglamentación vigente ($\pm 8\%$ del valor nominal).

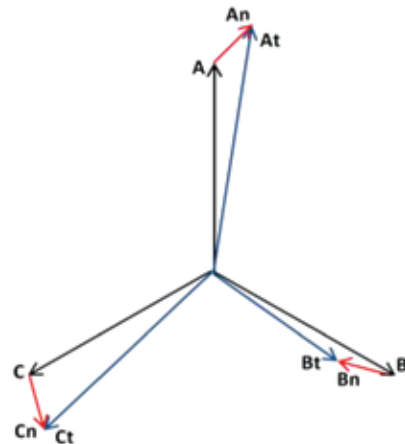


Figura 2. Composición de uno de los sistemas de alimentación al TV.

En virtud de lo ya mencionado, la variación sobre el sistema de secuencia negativa se realiza modificando el módulo de sus fasores An, Bn y Cn, en un rango que va de -8% del módulo de la tensión nominal al 8% de dicho módulo. Además, para cada valor del módulo de tensión considerado en la secuencia inversa, se efectúa una variación en su ángulo, que se encontrará entre 0 y 360°.

Modelado del transformador

El modelado del transformador en baja frecuencia,

hasta 3 kHz, comprende el modelado de los arrollamientos y el núcleo de material ferromagnético. En esta división, el modelo de los arrollamientos determina la respuesta al cortocircuito del transformador, mientras que el modelo del núcleo determina el comportamiento del transformador en vacío, su balance de flujos y los acoplamientos entre fases.

En la mayoría de los estudios transitorios, el modelo del transformador no incluye una representación detallada de su estructura magnética. Sin embargo, el modelado del núcleo resulta fundamental en el caso de simular la operación en régimen desbalanceado y no lineal en redes trifásicas, lo cual es el objeto del presente trabajo.

El modelo de transformador para bajas frecuencias propuesto por Bruce Mork y otros está basado en una topología híbrida donde los acoplamientos inductivos pueden derivarse a partir de medidas de cortocircuito en sus terminales, y un bobinado ficticio se usa como punto de conexión entre la matriz de admitancias acopladas y un equivalente dual que representa el núcleo (figura 3).

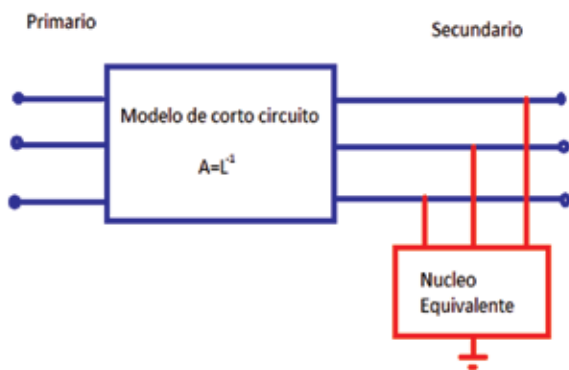


Figura 3. Combinación de la matriz inversa de inductancia con el agregado del núcleo en un transformador de dos arrollamientos.

El abordaje híbrido asume un desacoplamiento de los comportamientos del transformador en cortocircuito y vacío. El comportamiento en cortocircuito queda garantizado por la matriz de admitancias acopladas y la adecuada representación topológica del núcleo es alcanzada por medio de un modelo eléctrico equivalente simplificado.

La filosofía establecida en el modelo híbrido del transformador se usa en la aplicación TOPMAG, incluida en el software EMTP RV, la cual fue utilizada para calcular la reactancia de secuencia homopolar L_0 de 5 mH (figura 7), que representa el flujo de secuencia cero que se cierra por el aire.

Dado que aproximadamente el 90% de los transformadores utilizados en distribución posee un núcleo de tres columnas, este tipo de transformador fue seleccionado como objeto del estudio paramétrico de desbalance de secuencia inversa.

Las complicaciones asociadas al modelado en bajas frecuencias del transformador son consecuencia de las características no lineales del núcleo magnético. Los principales efectos no lineales a ser considerados en el modelado del inductor con núcleo ferromagnético son la saturación, pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.

El modelo convencional de una inductancia no lineal en paralelo con una resistencia lineal mantiene un precisión del 5% en un rango de frecuencias hasta 3 kHz.

Mediante ensayos de cada columna del transformador, se pueden obtener las curvas de saturación y pérdidas en el núcleo. La característica no lineal se extrae a partir de un ensayo en vacío a frecuencia nominal relevando valores eficaces de tensión y corriente. La característica resultante luego es linealizada por tramos para ser ingresada como dato de entrada al software de simulación (figura 4).

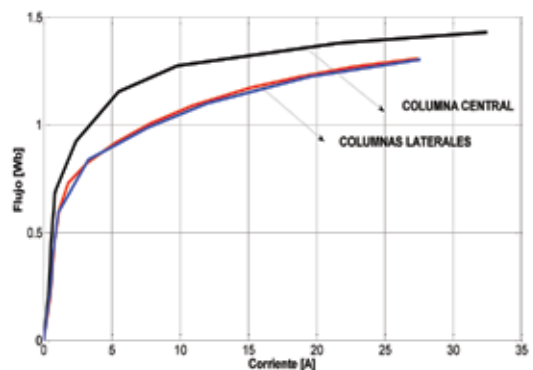


Figura 4. Características magnéticas para cada columna del transformador en estudio.



El uso de una resistencia lineal para modelar las pérdidas en el hierro está basado en una descripción semiempírica con sustento en la contribución de las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en las pérdidas totales. Con el objeto de lograr un mejor ajuste a los datos de ensayo, se utilizaron tres niveles discretos de resistencias seleccionados por rango de tensión. Corresponde el valor $R_{nominal}$ para variaciones de tensión de $\pm 10\%$ y valores R_{max} y R_{min} para valores de tensión fuera de este rango.

El transformador de tres columnas objeto de estudio se muestra en la figura 5. En las tablas, se muestran los datos de placa de la unidad, las dimensiones del núcleo magnético, los resultados de los ensayos de vacío y en cortocircuito, y finalmente las mediciones de resistencia de los bobinados.

El modelo del transformador implementado en el EMTP RV se muestra en la figura 6.



Figura 5. Transformador objeto de estudio.

Potencia (kVA)	Relación (V/V)	Conexión
78,7	380/225	YD

Datos de placa del transformador.

Sección (cm ²)		Longitud (cm)	
Columna	Culata	Columna	Culata
285	217,5	59,5	51

Datos del núcleo.

Po (W)	Vo (V)	Io (A)
462	218,3	6,03

Ensayo de vacío.

Pcc (W)	Vcc (V)	Icc (A)
133	1,79	46

Ensayo de cortocircuito.

R1 (Ω)	R2 (Ω)	N1 (vueltas)	N2 (vueltas)
0,0110	0,0112	90	92

Resistencias de los bobinados.

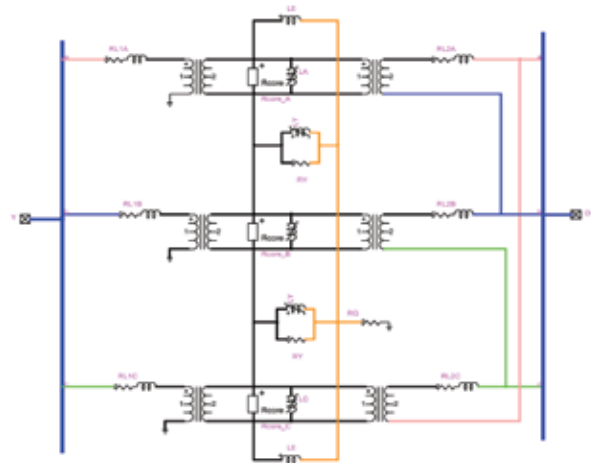


Figura 6. Modelo de TV implementado en el EMTP RV.

Debido al gran número de simulaciones que se deben realizar, se justifica una metodología automática para correr y extraer los valores de las variables de cada simulación. De esta manera, se elaboraron varios *scripts* en Phyton, Matlab y JavaScript, los cuales permiten correr automáticamente las simulaciones en el ámbito del programa para posteriormente extraer los valores de las variables de salida de interés y realizar el posprocesamiento correspondiente.

Interpretación de los resultados

Los valores de pérdidas obtenidos de las simulacio-

nes, contemplando la metodología planteada en el ítem 2, se vuelcan en la figura 7. Allí se muestran las pérdidas en el hierro del TV en función del módulo y ángulo del componente de secuencia negativa.

En la citada figura se puede apreciar que al variar el módulo y ángulo del componente de secuencia negativa (la cual se suma a la secuencia directa para dar la terna resultante de alimentación al TV), se producen variaciones de las pérdidas.

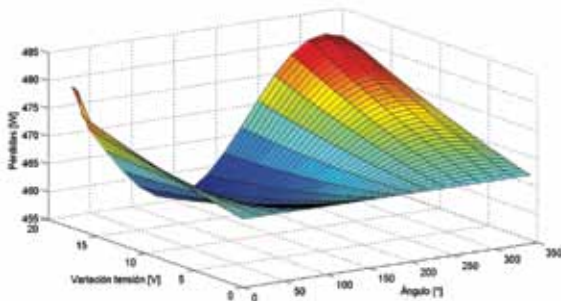


Figura 7. Pérdidas del TV en función del módulo y ángulo de la secuencia negativa del sistema de alimentación.

Además, de la figura 7 se desprende que las pérdidas del transformador en estudio aumentan y disminuyen su valor en relación con su valor de pérdida nominal. Particularmente, se aprecia que el valor mínimo se presenta cuando el módulo de secuencia negativa es máximo y su ángulo se corresponde con 120°. La citada condición implica que la tensión aplicada al bobinado de la columna central (Bt) es la máxima (figura 8).

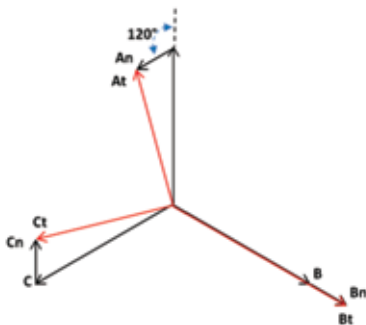


Figura 8. Sistema de alimentación al TV, con el componente de secuencia negativa en 120°.

El valor máximo de pérdidas se presenta cuando el módulo de secuencia negativa es máximo y su ángulo es de 300°. Esta condición implica que la tensión aplicada al bobinado de la columna central es la mínima (figura 9).

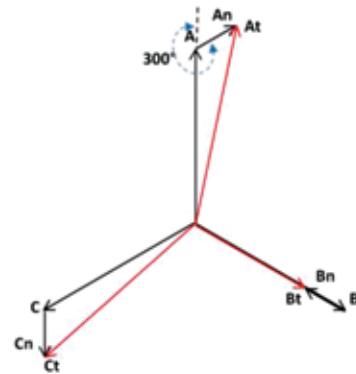


Figura 9. Sistema de alimentación al TV, con el componente de secuencia negativa en 300°.

Evaluando el factor de desbalance F_{dvn} de acuerdo con la expresión (2), de la figura 7 es posible afirmar que para un mismo F_{dvn} aparecen varios valores de pérdidas diferentes en el TV como se muestra con mayor detalle en la figura 10. Esto muestra claramente que para evaluar el efecto que ocasiona un sistema de alimentación desbalanceado sobre un equipo, como en este caso un transformador de tensión, no es suficiente considerar solo el F_{dvn} establecido por las normas, ya que este no tiene en cuenta el ángulo del componente de secuencia negativa. Esto puede tener una influencia importante en el equipo sometido a análisis.

Conclusión

Teniendo en cuenta la forma de evaluar el desbalance por IEC e IEEE, la metodología presentada para cuantificar las pérdidas en un transformador de tensión frente a un sistema de alimentación desbalanceado permite hacerlo en forma apropiada y completa.

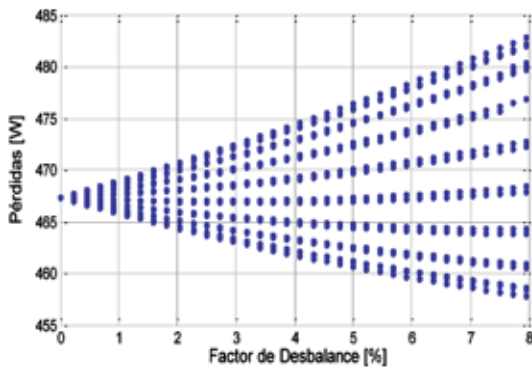
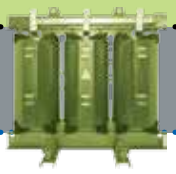


Figura 10. Pérdidas en función del factor de desbalance F_{dvn} .

En virtud de los resultados arrojados por el estudio paramétrico realizado y mostrados en la figura 7, es posible inferir que las pérdidas de un transformador de tensión pueden aumentar o disminuir en relación con sus pérdidas nominales en virtud del módulo y ángulo de los componentes de secuencia negativa presentes en el sistema trifásico de su alimentación. ■

Referencias

Nota del editor: la nota técnica aquí publicada está respaldada por una extensa bibliografía cuyas referencias no se publican por normas editoriales. Por consultas de esta índole, o cualquier otra acerca de la temática tratada, consultar a los autores.

Nota del editor: la nota aquí reproducida fue originalmente presentada por los autores como artículo de investigación en Cidel Argentina 2014.

Contactos

Héctor O. Pascual: opascual@frlp.utn.edu.ar

Luis D. Bellomo: lbellomo@frlp.utn.edu.ar

Ariel A. Albanese: albanese@frlp.utn.edu.ar

Omar A. Fata: ofata@frlp.utn.edu.ar

Por **Héctor O. Pascual, Luis D. Bellomo, Ariel A.**

Albanese y Omar A. Fata

Grupo de investigación y desarrollo sobre tratamiento de señales en sistemas eléctricos

Universidad Tecnológica Nacional regional La Plata