



## CARACTERIZACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE TRANSFORMADORES DE TENSIÓN FRENTE A UNA ALIMENTACIÓN DESBALANCEADA.

Héctor O. Pascual<sup>(\*)</sup>  
[opascual@frlp.utn.edu.ar](mailto:opascual@frlp.utn.edu.ar)

Luis D. Bellomo<sup>(\*)</sup>  
[lbellomo@frlp.utn.edu.ar](mailto:lbellomo@frlp.utn.edu.ar)

Omar A. Fata<sup>(\*)</sup>  
[oafata@frlp.utn.edu.ar](mailto:oafata@frlp.utn.edu.ar)

Ariel A. Albanese<sup>(\*)</sup>  
[albanese@frlp.utn.edu.ar](mailto:albanese@frlp.utn.edu.ar)

<sup>(\*)</sup> Grupo de I+D sobre Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE)  
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Dirección: 60 y 124,  
La Plata, CP (1900), Buenos Aires, Argentina. Tel: 0221-412-4300

### 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 del mismo. 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 claves:** Transformador de Tensión, Factor de Desbalance, Pérdidas.

## 1- 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 [1], 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 [2] o IEEE [3], 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.

## 2- 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 al del sistema de distribución en estudio y una *secuencia cero o homopolar*, compuesta por una terna de fasores de igual magnitud y fase.

El cálculo de las componentes de secuencias positiva, negativa y homopolar se efectúa a través de la aplicación del teorema de Fortescue [4] y estarán dadas por la expresión (1).

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

En esta última "a" es un operador que genera una rotación de 120° en la 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 [2] e IEEE [3], en la cual éste se cuantifica a través del *factor de desbalance*  $F_{dvn}$ , que es la relación entre la magnitud de la componente de secuencia negativa y la magnitud de la componente de secuencia positiva, expresada como porcentaje (2).

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

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 lo cual se alimentará el transformador en estudio con un sistemas trifásico de tensiones nominales de secuencia positiva pura (Fig. 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 (Fig. 1, fasores **An**, **Cn** y **Bn**).

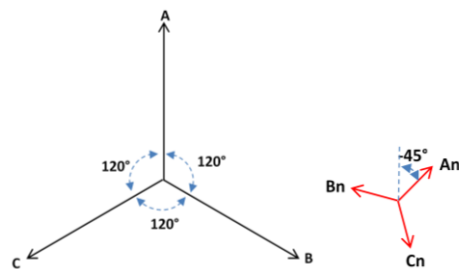


Fig. 1: Sistemas trifásico de tensiones de secuencia positiva y negativa.

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 Fig. 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** (Fig. 2) en ningún caso superen los rangos establecidos para el módulo de la tensión, contemplado en la reglamentación vigente [5] ( $\pm 8,0 \%$  del valor nominal).

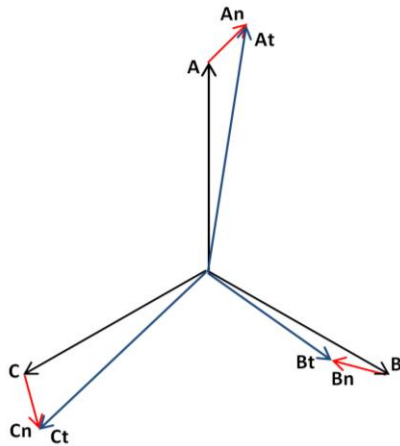


Fig. 2: Composición de uno de los sistemas de alimentación al TV.

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 los 0° y 360°.

### 3- MODELADO DEL TRANSFORMADOR.

El modelado del transformador en bajas frecuencia, hasta 3 kHz, comprende el modelado de los arrollamientos y el núcleo de material ferro magnético. En esta división, el modelo de los arrollamientos determina la respuesta al corto circuito 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 en la referencia [6] está basado en una topología híbrida donde los acoplamientos inductivos pueden ser derivados a partir de medidas de corto circuito en sus terminales, y un bobinado ficticio es usado como punto de conexión entre la matriz de admitancias acopladas y un equivalente dual que representa el núcleo (Fig. 3).

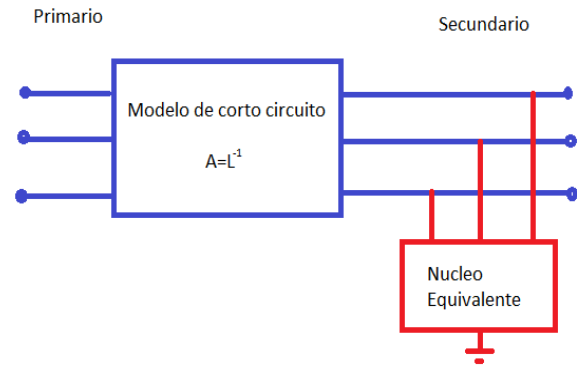


Fig. 3: Combinación de la matriz inversa de inductancia con el agregado del núcleo en un transformador de dos arrollamientos

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

La filosofía establecida en el modelo híbrido del transformador es usada en la aplicación TOPMAG, incluida en el software EMTP RV, la cual fue utilizada para calcular la reactancia de secuencia homopolar L0 de 5 mH, Fig. 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 poseen un núcleo de 3 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. Siendo los principales efectos no lineales a ser considerados en el modelado del inductor con núcleo ferro magnético: la saturación, pérdidas por histéresis y corrientes parasitas.

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 es extraída 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 (Fig. 4).

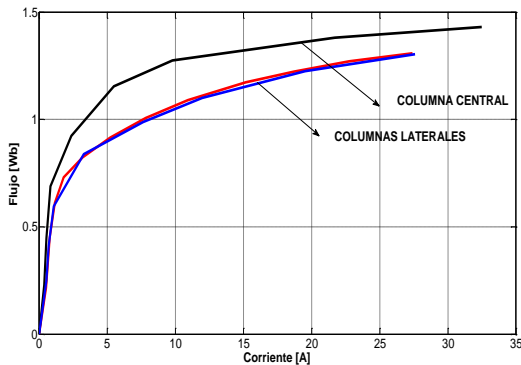


Fig. 4: Características magnéticas para cada columna del transformador en estudio.

El uso de una resistencia lineal para modelar las pérdidas en el hierro está basado en una descripción semi empírica con sustento en la contribución de las pérdidas por histéresis y corrientes parasitas en las pérdidas totales. Con el objeto de lograr un mejor ajuste a los datos de ensayo se utilizaron 3 niveles discretos de resistencias seleccionados por rango de tensión. Correspondiéndole 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 es mostrado en la (Fig. 5). A continuación se muestran los datos de placa de la unidad, las dimensiones del núcleo magnético, los resultados de los ensayos de vacío y en corto circuito y finalmente las mediciones de resistencia de los bobinados.

Datos de placa del transformador:

Potencia (KVA)	Relación (V/V)	Conexión
78.7	380/225	YD

Datos del núcleo:

Sección (cm <sup>2</sup> )		Longitud (cm)	
Columna	Culata	Columna	Culata
285.0	217.5	59.5	51.0

Ensayo de vacío:

Po (W)	Vo (V)	Io (A)
462	218.3	6.03

Ensayo en corto circuito:

Pcc (W)	Vcc (V)	Icc (A)
133	1.79	46.0

Resistencias de los bobinados:

R1 (Ω)	R2 (Ω)	N1 (Vueltas)	N2 (Vueltas)
0.0110	0.0112	90	92



Fig. 5: Transformador objeto de estudio.

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

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 post procesamiento correspondiente.

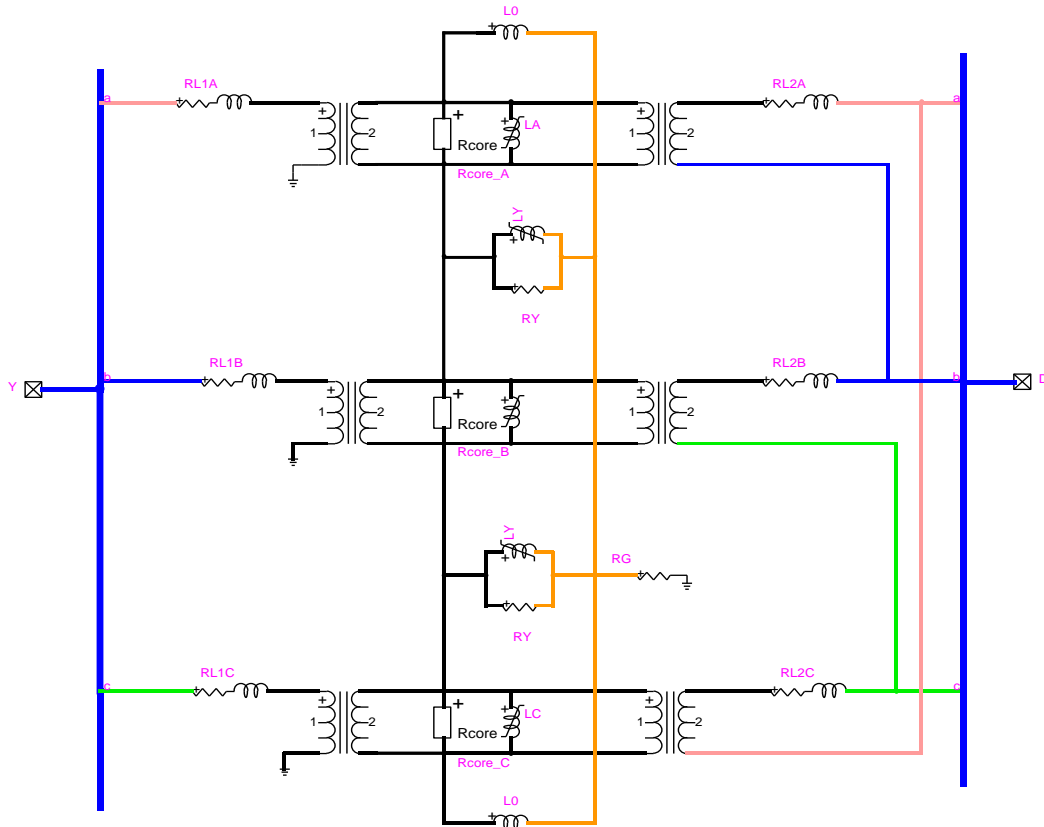


Fig. 6: Modelo de TV implementado en el EMTP RV.

#### 4- INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los valores de pérdidas obtenidos de las simulaciones, contemplando la metodología planteada en el ítem 2, se vuelcan en la Fig. 7. La cual muestra las pérdidas en el hierro del TV en función del módulo y ángulo de la componente de secuencia negativa.

En la citada figura se puede apreciar que al variar el módulo y ángulo de la 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.

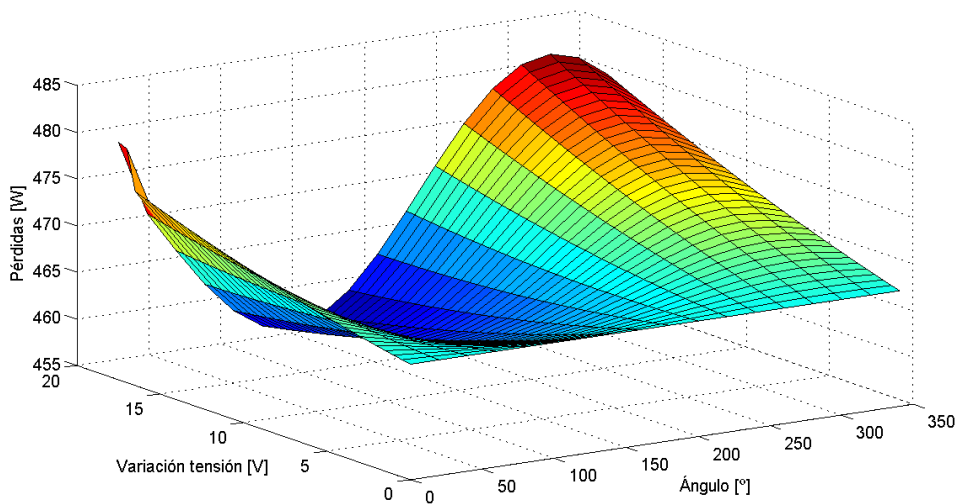


Fig. 7: Pérdidas del TV en función del Módulo y Ángulo de la secuencia negativa del sistema de alimentación.

Además de la Fig. 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  $120^\circ$ . La citada condición implica que la tensión aplicada al bobinado de la columna central (**Bt**) es la máxima (Fig. 8).

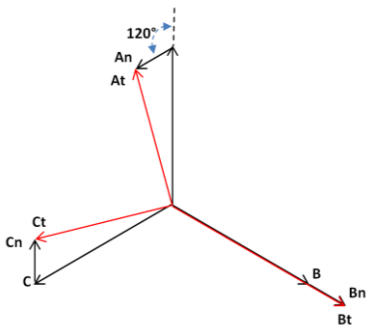


Fig. 8: Sistema de alimentación al TV, con la comp. de sec. neg. en  $120^\circ$

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

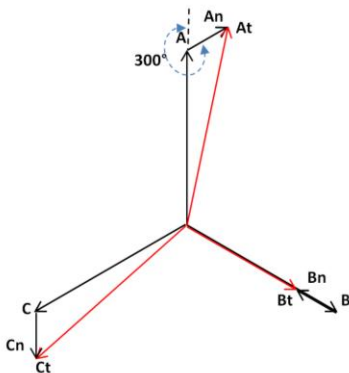


Fig. 9: Sistema de alimentación al TV, con la comp. de sec. neg. en  $300^\circ$

Evaluando el *factor de desbalance*  $F_{dvn}$  de acuerdo con la expresión (2), de la Fig. 7 es posible afirmar que para un mismo  $F_{dvn}$  aparecen varios diferentes valores de pérdidas en el TV como se muestra con mayor detalle en la Fig. 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 sólo el  $F_{dvn}$  establecido por las normas, ya que el mismo no tiene en cuenta el ángulo de la componente de secuencia negativa. El cual puede

tener una influencia importante en el equipo sometido a análisis.

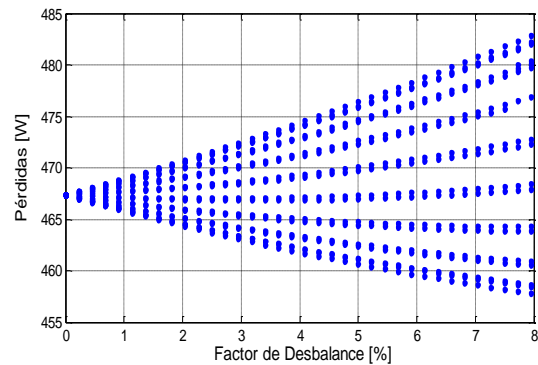


Fig. 10: Pérdidas en función del factor de desbalance  $F_{dvn}$ .

## 5- CONCLUSIÓN.

Teniendo en cuenta la forma de evaluar el desbalance por IEC [2] e IEEE [3], 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.

En virtud de los resultados arrojados por el estudio paramétrico realizado y mostrados en la Fig. 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 las componentes de secuencia negativa presentes en el sistema trifásico de su alimentación.

## 6- REFERENCIAS.

- [1] Pascual H. O., Albanese A. A., Fata O. A., Neira L. L., Perez F. A. y Schattenhoffer F., "Análisis del Desbalance en Redes de Distribución Argentinas, Contemplando la Reglamentación Nacional Vigente al Respecto," *Décimo Quinto Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ (XV ERIAC 2013)*, Foz de Iguazú-PR, Brasil, 19-23 de mayo de 2013.
- [2] IEC 61000-4-30: 2008., "Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods".
- [3] IEEE Std 1159-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.



- [4] Grainger J. J. and Stevenson W. D. Jr., "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, México, 391-440,(1995).
- [5] ENRE Ente Nacional Regulador de la Electricidad (Argentina), Res. 184/2000.
- [6] Mork Bruce, Gonzalez Francisco, Ishchenko Dmitry, Stuehm Don and Mitra Joydeep. "Hybrid Transformer Model for Transient Simulation—Part I: Development and Parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, N°: 1, January 2007.