

Modelación de Transformadores para Estudios de Energización usando ATP-EMTP

Luis Dután
CELEC EP TRANSELECTRIC
Quito, Ecuador

Resumen – Una representación adecuada de la saturación de los transformadores es fundamental en los estudios de transitorios electromagnéticos y deberá ser la más representativa de la que ocurre cuando el transformador es sobreexcitado durante su energización. Durante las pruebas de vacío que se realizan al transformador, se determina la corriente de excitación que circula en el mismo para un determinado voltaje aplicado; con dichos voltajes y corrientes en valores eficaces (*RMS*) se puede trazar la curva de saturación del transformador. En la práctica no es posible aplicar voltajes superiores al 110 por ciento (1,1 pu) en el devanado de prueba del transformador durante las pruebas de vacío debido al riesgo de daño, por tal motivo, en las pruebas de vacío se aplican voltajes y se toman las mediciones en un rango típico de 0,9 – 1,1 pu, obteniéndose apenas de tres a cinco puntos de la curva de saturación. Una curva de saturación determina a partir de valores de voltaje de hasta 1,1 pu no es adecuada ya que no representa la saturación extrema del transformador que se puede producir durante su energización. En este trabajo se presentan los modelos con los que cuenta el programa Alternative Transients Program (ATP) para transformadores y los resultados de simulaciones de energizaciones se comparan con eventos reales obtenidos mediante los Registradores Automáticos de Perturbaciones (RAP's), que se han venido instalando últimamente en las subestaciones de CELEC EP – Transelectric.

Palabras Clave – ATP, BCTAN, rms2peak, Saturación, SATURA Transformadores, XFMR.

I. INTRODUCCIÓN

Un modelo de núcleo está basado, usualmente, en la prueba de vacío del transformador de la cual se obtienen ciertos valores de corriente de excitación para voltajes ajustados, generalmente, entre 0,9 y 1,1 pu en pasos de 0.05 pu. Valores por encima de 1,1 pu no son aplicados durante la prueba por considerarse dañinos. Durante la energización de un transformador se sobrepasa dicho valor de voltaje por lo que se vuelve necesario tener una curva de saturación con valores por encima de 1,1 pu para una adecuada representación del núcleo. En el programa ATP la determinación tradicional de las condiciones de saturación por encima del último valor de voltaje ofrecido en la curva de saturación obtenida a partir de la prueba de vacío, es realizado mediante una extrapolación lineal de los dos últimos puntos de dicha curva. Dependiendo de la

pendiente de la recta formada a partir de los dos últimos puntos de la curva de saturación de la prueba de vacío del transformador, podrá haber un error muy grande.

Los datos de la prueba de vacío son suficientes cuando la simulación no involucra fuertes saturaciones del núcleo. El ATP tiene dos maneras de tratar los datos de Voltaje – Corriente (*rms*) obtenidos en la prueba para convertirlos en una curva característica de Flujo – Corriente en valores pico (λ_{pico} vs. I_{pico}), ya sea empleando la subrutina SATURA (que es la manera tradicional que se ha venido usando y la que trabaja con la extrapolación lineal), ó un método más avanzado (usado en el modelo de transformador XFMR) que puede tomar en cuenta el acoplamiento trifásico de transformadores.

II. MODELOS SATURABLE Y BCTAN

La modelación del núcleo del transformador en el programa ATP se basa en la curva característica λ_{pico} vs. I_{pico} , que es obtenida a partir de los datos de Voltaje *rms* y Corriente *rms* de la prueba de vacío mediante la rutina SATURA, la cual, como se mencionó anteriormente, realiza una extrapolación lineal de los dos últimos puntos de datos de dicha prueba considerando constante la inclinación del segmento formado por dichos puntos. Además, esta rutina asume que el flujo varía sinusoidalmente a la frecuencia fundamental como una función del tiempo, debido a que, generalmente, en la prueba de vacío la curva V_{rms}/I_{rms} ha sido obtenida con un voltaje terminal sinusoidal. También asume lo siguiente:

1. Las pérdidas debidas a corrientes de Eddy y por histéresis son ignoradas.
2. Las resistencias de los devanados son ignoradas y,
3. La curva λ_{pico}/I_{pico} es generada punto a punto, realizando entre ellas una interpolación lineal.

El ATP presenta varios modelos de transformadores de los cuales los más usados son: Saturable, BCTAN y XFMR. Los dos primeros modelos usan, para simular su núcleo, el resultado que ofrece la subrutina SATURA.

A. Modelo Saturable

Este modelo presenta en su entrada de datos una tabla en la cual se ingresan los valores de V_{rms} e I_{rms} de la prueba de vacío. Al momento de ejecutar el programa ATP, esta tabla de valores es convertida a λ_{pico} vs. I_{pico} mediante la subrutina *SATURA* y el núcleo así representado es conectado en el primario del transformador. Este modelo considera a sus elementos como desacoplados, tal como se muestra en la figura 1. La inductancia magnetizante lineal o no lineal, con Rm en paralelo, es conectada al punto *Y*, lo cual no siempre es el punto de mejor conexión. El modelo *Saturable* ha sido ampliamente usado para representación de transformadores monofásicos, mientras que para transformadores trifásicos su uso es limitado.

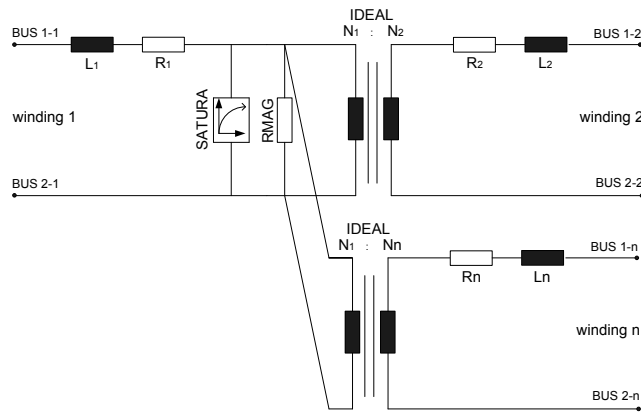


Fig. 1. Modelo de Transformador *Saturable*, para n devanados [3]

B. Modelo BCTRAN

El modelo *Saturable* presenta grandes limitaciones al momento de modelar transformadores trifásicos, por tal motivo se desarrolló el modelo *BCTRAN* el cual es una representación lineal simplificada de transformadores monofásicos o trifásicos en la forma de matrices de impedancias ó admitancias de rama (matriz L ó $A=L^{-1}$) tomando en cuenta los acoplamientos mutuos. Sin embargo, esta aproximación no puede incluir topologías multiramas o efectos no lineales del núcleo. En estudios de ferresonancia, corrientes inrush y otros comportamientos no lineales es necesario considerar los efectos de la saturación. Para eliminar esta limitación del modelo, se ha venido usando la conexión de ramas externas formadas por elementos no lineales al modelo *BCTRAN*. Dichos elementos pueden ser del tipo 93 ó 98 (curva de saturación), ó tipo 96 (curva de saturación que toma en cuenta el lazo de histerésis), y su conexión con el modelo de transformador puede ser realizada tal como se muestra en la figura 2. Los valores de flujo y corriente que se ingresan en los elementos no lineales son obtenidos usando la subrutina *SATURA*.

La extrapolación lineal que usa la subrutina

SATURA falla debido a que en la prueba de vacío el transformador no alcanza la saturación completa para niveles de excitación de hasta el 110%, y una extensión lineal de sus dos últimos puntos causará un severo error en la determinación de la corriente de magnetización para cualquier nivel de excitación por encima del último punto especificado. Por lo mencionado anteriormente, es necesario que los puntos adicionales de la curva de saturación deban incrementar la precisión de los estudios de transitorios en los que el núcleo del transformador juega un papel importante. En la figura 3 se muestra la diferencia entre la extrapolación de la curva de saturación usando la subrutina *SATURA* y un nuevo método basado en un ajuste de curvas.

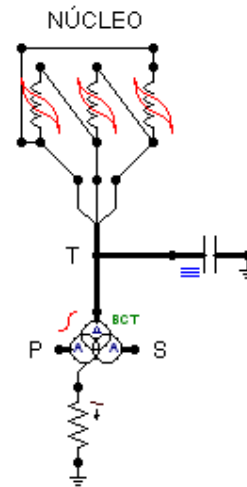


Fig. 2. Conexión externa del modelo del núcleo del transformador al elemento *BCTRAN*.

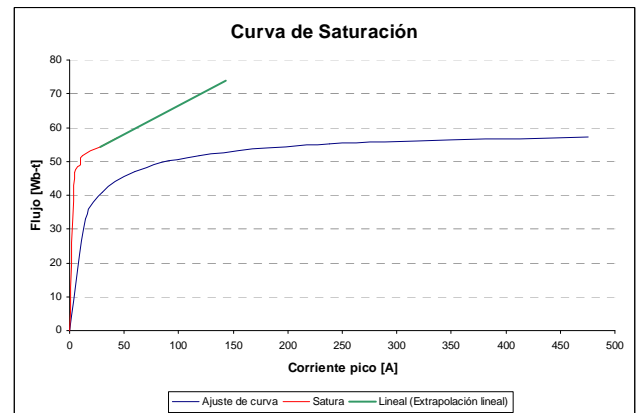


Fig. 3. Extensiones de la curva de saturación a partir de la prueba de vacío usando la subrutina *Satura* y un ajuste de curvas.

El grupo de usuarios de ATP en Brasil ya notaron este problema a inicios de la década de los noventa, e hicieron esfuerzos por tratar de obtener una curva más cercana a la realidad, logrando desarrollar el PROGRAMA *SATURA* el cual ajusta los datos de las pruebas de vacío a curvas típicas de saturación

obtenidas de fabricantes. Con este programa se mejoró la extrapolación de la curva, y aunque el método usado para este ajuste es simple, los datos de ingreso, tales como resistencia y reactancia de devanados no siempre son fáciles de obtener, especialmente en autotransformadores trifásicos, por lo que el uso de dicho programa es muy complejo.

III. NUEVA APROXIMACIÓN: HYBRID MODEL

Basados en la discusión anterior, a los investigadores les pareció práctico desarrollar un modelo combinado o “híbrido” basado en mejorar el modelo *BCTRAN*. La combinación de componentes y mejoras, son:

- Usar la matriz $[A]$ para una representación completa de inductancias de fuga, agregando los acoplamientos entre los devanados de las bobinas.
- Usar una representación topológicamente correcta de la no linealidad del núcleo basada en el principio de dualidad.
- Utilizar resistencias de devandos dependientes de la frecuencia.
- Incluir los efectos capacitivos, colocados externamente a los aisladores pasatapas (bushing's) del modelo.

A. Representación del Núcleo basado en el Principio de Dualidad

Un transformador $Y-\Delta$ con un núcleo de tres columnas se usará como ejemplo. Las figuras 4 y 5 muestran la estructura física y el correspondiente circuito magnético concentrado. Las \mathcal{R} en la figura 4 representan reluctancias magnéticas. La derivación completa de este modelo esta basada en el principio de dualidad: los nodos del circuito magnético se convierten en mallas o bucles cerrados en el circuito eléctrico, mientras que las mallas del circuito magnético se convierten en nodos del circuito eléctrico [4].

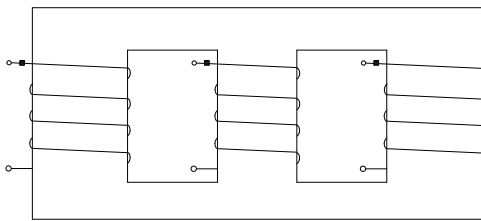


Fig. 4. Núcleo de tres columnas. Por simplicidad se muestra solo un conjunto de devanados [1].

En la figura 5, \mathcal{R}_L representa el camino del flujo a través de las columnas del núcleo del transformador, \mathcal{R}_Y representa el camino del flujo a través de los yugos; \mathcal{R}_2 representa el camino de fuga entre las columnas y

los devanados más internos; también se representan los caminos de fuga entre las columnas y los espacios entre las dos bobinas (\mathcal{R}_3) y entre las columnas y el devanado más externo (\mathcal{R}_4); finalmente, \mathcal{R}_{ph} representa el camino del flujo de fuga a través del aire en paralelo con el yugo. El resultado, cuatro partes funcionales distintas:

1. Representación de las inductancias de fuga.
2. Representación topológicamente correcta del núcleo.
3. Resistencias de los devanados.
4. Efectos capacitivos.

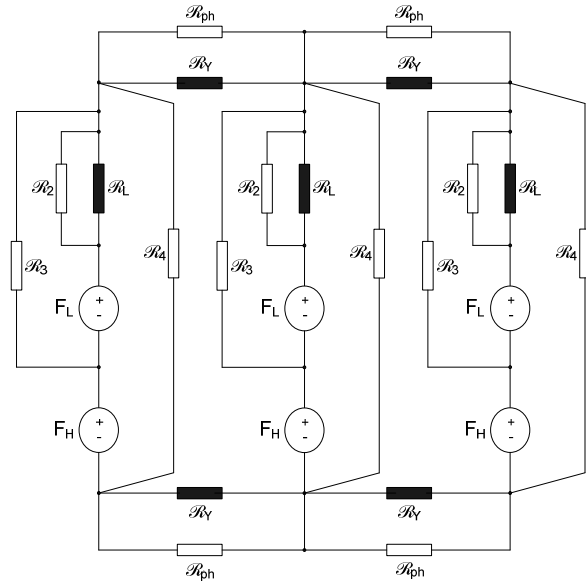


Fig. 5 Circuito magnético. Reluctancias que representan los caminos del flujo magnético

B. No linealidad del núcleo

El núcleo basado en la dualidad es conectado a través de un devanado ficticio $N+1$, donde N es el número de devanados del transformador. Dicho devanado ficticio es usado como un punto de conexión del núcleo equivalente, tal como se muestra en la figura 6 para un núcleo de tres columnas. La representación topológicamente correcta del núcleo no lineal es extraída del principio de dualidad y conectada a los terminales $\alpha-\beta-\gamma$ del devanado $N+1$.

Cada columna y yugo es representado por una resistencia de pérdidas en el núcleo con una inductancia saturable. Los caminos del flujo de secuencia cero son representados por inductancias L_0 . Esta simple representación $R-L$ de cada columna del núcleo es satisfactoria en muchos casos, aunque se puede lograr un modelo más detallado.

Si los datos de diseño están disponibles, el

equivalente del núcleo puede ser determinado basándose en el cálculo de la curva de magnetización $\lambda-i$ para cada columna del núcleo. La estimación de la curva de magnetización es más real debido a que el tipo de material es conocido, así como también las dimensiones del núcleo (área de la sección transversal) y número de vueltas de los devanados. El tipo de material define la curva $B-H$, la cual, naturalmente, es la misma para todas las componentes del núcleo y puede ser aproximada por la ecuación de *Frolich* (1), que proporciona una curva suave en función de dos parámetros a y b .

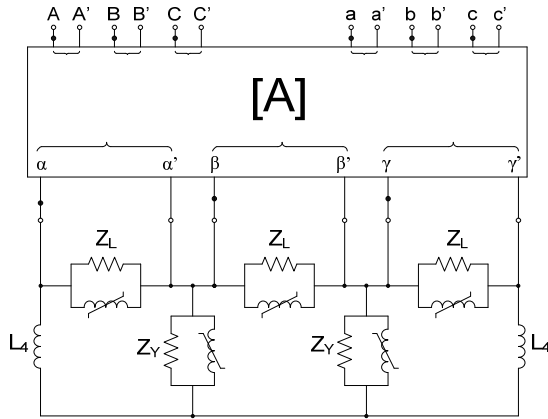


Fig. 6 Núcleo conectado al devanado N+1

$$B = \frac{H}{a + b \cdot |H|} \quad (1)$$

La curva $\lambda-i$ puede ser estimada mediante el escalamiento de la curva $B-H$ de acuerdo a las áreas y longitudes de los componentes del núcleo. Si las dimensiones de las columnas y yugos son desconocidas, razones normalizadas de las dimensiones de núcleos pueden ser usadas. Si las razones de las dimensiones del núcleo son desconocidas, éstas pueden ser asumidas; en aquellos casos razones típicas pueden ser usadas sin que se introduzca un gran error debido a que las razones de las dimensiones del núcleo varían en un pequeño rango de acuerdo a estándares de diseño. La ecuación de *Frolich* es conveniente para representar la curva de magnetización del núcleo.

IV. ESTRUCTURA DEL COMPONENTE XFMR DE ATP

Basados en el modelo híbrido, los desarrolladores del programa ATP crearon el elemento *XFMR*. Este modelo sirve para simular transformadores trifásicos de dos o tres devanados, así como autotransformadores, con todos los acoplamientos $Y-\Delta$. El modelo incluye una matriz de inductancia inversa

para la descripción de los flujos de fuga, en forma opcional puede modelar las resistencias de los devanados dependientes de la frecuencia, acoplamiento capacitivo y un modelo topológicamente correcto del núcleo con saturación individual y pérdidas en columnas y yugos. El usuario puede simular el transformador basado en tres fuentes de datos:

1. Datos de diseño (especificación geométrica y parámetros del material del núcleo y devanados).
2. Reporte de pruebas (similar al modelo *BCTRAN* excepto para el modelo del núcleo).
3. Valores típicos (basados en voltajes y potencias nominales).

El núcleo está conectado a un devanado ficticio en el exterior y las características de la magnetización se obtienen en base a la ecuación de *Frolich*. Ya que el núcleo tiene una conexión externa, se puede medir en él el flujo principal. Para establecer el devanado ficticio del núcleo, se debe especificar la secuencia de los devanados a partir del núcleo; normalmente el devanado de más bajo voltaje es el que está más cercano al núcleo. El punto de conexión de los devanados del núcleo es establecido basándose en el canal de fuga entre el devanado más interno y el núcleo.

Las partes inductivas y resistivas del núcleo son tratadas independientemente. Las pérdidas en el núcleo, hasta este momento, se asumen como lineales. Cada parte del núcleo es modelado con su propia resistencia de pérdidas.

Se asume que el núcleo magnético está caracterizado por cuatro parámetros a , b , d y e . El modelo trae una librería de materiales típicos de acero (M2, M4 M6 y METGLASS 2605TCA). Los aceros Nipón y ARMCO son muy similares y son agrupados en uno solo. Esta lista de datos está basada en los catálogos del estado de arte de las pruebas de los fabricantes. Materiales de acero antiguos tendrán características diferentes y sus pérdidas son, generalmente, más altas.

La esencia de modelar el núcleo inductivo es obtener los valores a' y b' en la ecuación de *Frolich* a partir de los cuales se llega a determinar la característica $\lambda-i$ por una técnica de optimización. El valor rms medido o asumido de la corriente de magnetización es comparado con una cantidad calculada e iterada hasta que un mejor ajuste sea alcanzado. El método *Golden Search* es implementado en *ATPDraw*; este método es simple de implementarse pero el proceso de optimización toma unos pocos segundos.

$$\lambda = B \cdot A \cdot N \quad (2)$$

$$i = H \cdot l / N \quad (3)$$

donde N es el número de vueltas del devanado más interno, A es la sección transversal del núcleo, y l es la longitud del núcleo.

Como un resultado de la ecuación de *Frolich* la relación *Flujo – Corriente* es definida como:

$$i = l_r \cdot \frac{a' \cdot \lambda / A_r}{1 - b' \cdot \lambda / A_r} \quad (4)$$

donde l_r y A_r son la longitud y sección relativa del núcleo relacionadas con la columna. Las constantes a y b ser determinadas en el proceso de optimización son:

$$a' = a \cdot \frac{l_L}{N^2 \cdot A_L} \quad (5)$$

y

$$b' = b \cdot \frac{1}{N^2 \cdot A_L} \quad (6)$$

basadas en la longitud y sección transversal absolutas de la columna del núcleo. El resultado final es:

$$\text{para flujo por la columna: } \lambda_L = \frac{i}{a' + b' \cdot i} \quad (7)$$

para flujo fuera de la columna:

$$\lambda_0 = \frac{i \cdot A_{r0}}{a' \cdot l_{r0} + b' \cdot i} \quad (8)$$

$$\text{para flujo por el yugo: } \lambda_L = \frac{i \cdot A_{ry}}{a' \cdot l_{ry} + b' \cdot i} \quad (9)$$

Las inductancias no lineales son implementadas como elementos *tipo 93* o *tipo 98* en ATP. Estudios realizados en el Michigan Technological University han revelado que las inductancias tipo 98 son las más estables.

Si un único punto de la prueba de vacío es ingresado en el *XFMR* el núcleo es asumido como lineal. Si más de un punto es especificado, entonces aquellos son enviados a la rutina de optimización la cual retorna los valores de a' y b' usados para describir la relación λ - i en el núcleo.

V. CONSIDERACIONES ADICIONALES EN EL CÁLCULO DE LA CARACTERÍSTICA FLUJO-CORRIENTE PARA TRANSFORMADORES CON ACOPLAMIENTO Δ

En los párrafos anteriores se mencionó la necesidad de un mejor método de extrapolación de la curva de saturación obtenida de las pruebas de vacío, debido a que la subrutina *SATURA* realiza una extrapolación lejana a la curva real. En este punto se va a tratar de otro error que se produce al utilizar dicha subrutina. El hecho aquí es cómo manejar transformadores trifásicos

y la relación entre corrientes de línea y corrientes de fase. Tradicionalmente se asume que la corriente de fase para devanados conectados en Δ es igual a la corriente de línea dividido para $\sqrt{3}$. Teniendo en mente una vez más que la característica no lineal del núcleo relaciona el *flujo de concatenación* con *la corriente de fase*, dicha curva, en la práctica, se obtiene mediante lecturas de mediciones de voltajes y corrientes *RMS*. Con un voltaje sinusoidal aplicado en la prueba de vacío, se obtiene una lectura *RMS* de la corriente de línea *no sinusoidal*.

Cuando se usa la subrutina *SATURA* el usuario ingresa los valores medidos *RMS* de la curva v - i en una secuencia de puntos, asumiendo una interpolación lineal entre ellos. La salida es una curva λ _{pico} vs. I _{pico} lineal a trozos. El reporte de prueba de vacío del transformador da valores *RMS* de voltaje y corriente de línea. Sin embargo, la subrutina *SATURA* requiere como datos de ingreso los valores de voltaje y corriente de *fase*. En el caso de conexiones en *Y* la corriente de línea es igual a la corriente de fase y ninguna conversión es necesaria; el factor $\sqrt{3}$ es usado para obtener el voltaje de fase a partir del voltaje sinusoidal que es aplicado en la prueba de vacío. La conexión Δ requiere más consideraciones, pues se asume que la corriente de fase es igual a la corriente de línea dividida para $\sqrt{3}$. Sin embargo, esta es una hipótesis doblemente dudosa debido a que durante saturaciones del transformador las corrientes no son sinusoidales y todos los armónicos son despreciados.

En la figura 7 se muestra el fundamento de la subrutina *SATURA* y se muestra de manera gráfica que no se pueden relacionar la curva de la corriente de línea medida dividida para $\sqrt{3}$ con la corriente de fase simulada; hacerlo implica provocar un gran error.

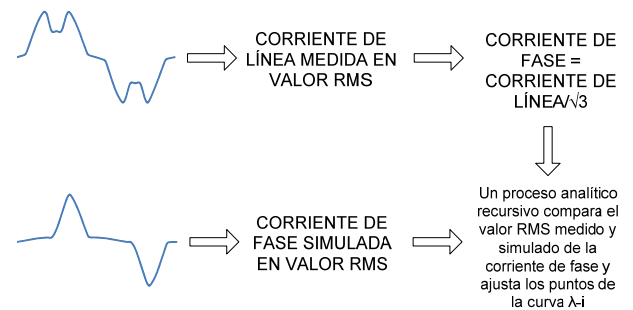


Fig. 7. Fundamentos de la subrutina *SATURA*.

Nicola Chiesa desarrolló la subrutina “*rms2peak*” la cual soluciona este problema evitando la conversión de la corriente de línea su valor de fase. En caso de conexiones *Y* el procedimiento es análogo al de la subrutina *SATURA*. El aspecto innovador se relaciona

con la conexión Δ . La figura 8 muestra la subrutina *rms2peak* para el caso de conexión Δ , en donde las corrientes de línea medidas y simuladas son directamente comparadas evitando el uso del factor $\sqrt{3}$.

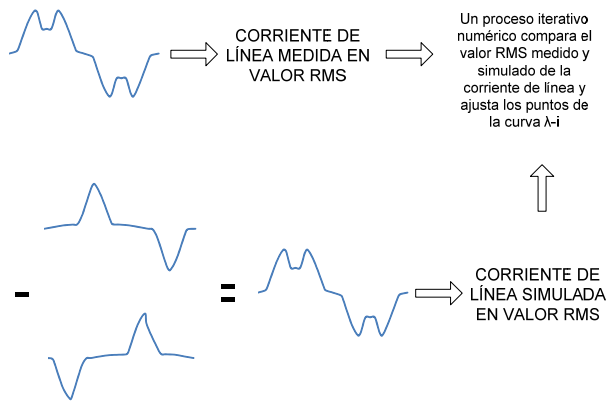


Fig. 8. Fundamentos de la subrutina *rms2peak*

La subrutina *rms2peak* puede ser resumida en tres pasos:

1. Conversión de los voltajes de línea RMS en valores pico de flujo de concatenación para todos los puntos de la curva característica $V_{rms}-I_{rms}$.
2. Estimación de la corriente pico del primer punto de la característica de magnetización.
3. Cálculo de los restantes puntos de la característica de magnetización con un método numérico iterativo que ajusta cada pico de corriente como:

VI. APLICACIÓN AL CASO DE ENERGIZACIÓN DEL TRANSFORMADOR DE LA SUBESTACIÓN SININCAY

En julio del año en curso se energizó el transformador $YY\Delta$ 230/69-13.8 kV, 165 MVA, ubicado en la subestación Sinincay de propiedad de CELEC EP – TRANSELECTRIC. En la mencionada subestación se encuentran también instalados Registradores Automáticos de Perturbaciones (RAP's) que registraron el evento.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones usando la subrutina *SATURA* para determinar los valores de flujo y corriente que serán ingresados en modelos no lineales tipo 96 que además de la saturación toman en cuenta la curva de histéresis, y que serán conectados de manera externa al modelo de transformador *BCTRAN* de la S/E Sinincay. Por otro lado, se realizará la modelación del transformador usando el modelo *XFMR (Hybrid Model)* y se compararán los resultados con las oscilografías reales.

En los dos casos se usarán interruptores ideales trifásicos estadísticos, ajustados al tiempo de cierre que ocurrió en la realidad. Se realizarán 50 simulaciones. Además, debido a que los registros del evento se guardan en archivos COMTRADE, para la comparación de las corrientes reales con las simuladas se usará el programa TOP.

A. Datos de Placa y Prueba de Vacío del Transformador de la Subestación Sinincay.

TABLA I
DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR DE LA S/E SININCAY

| Registro de Control HOJA DE ACOMPAÑAMIENTO DE LOS ENSAYOS FINALES | | | |
|---|---------------------|------------------|-----------------|
| EQUIPO: | TRANSFORMADOR 3Φ | SERIAL: | 185625 |
| Potencia: | 100/133.2/165.5 MVA | Tensión Nominal: | 230/69- 13.8 kv |
| Terciario: | 16.5 MVA | Norma: | IEC 60076 |
| CLIENTE: | TRANSELECTRIC | FRECUENCIA: | 60 Hz |
| | | FECHA: | 26/04/2006 |

TABLA II
PRUEBA DE VACÍO DEL TRANSFORMADOR DE LA S/E SININCAY

| Protocolo de Ensayo Pérdidas en Vacío | | | |
|---------------------------------------|----------------|------------------|--------|
| Transformador de la S/E Sinincay | | | |
| Potencia base [MVA] | 165.5 | Voltaje base [V] | 13800 |
| Voltaje [p.u.] | I promedio [A] | Po [kW] | Io [%] |
| 0.60 | 1.786 | 29.073 | 0.0524 |
| 0.70 | 2.457 | 40.095 | 0.0682 |
| 0.80 | 3.735 | 54.628 | 0.0976 |
| 0.90 | 6.392 | 70.994 | 0.1594 |
| 0.95 | 8.828 | 81.091 | 0.2173 |
| 1.00 | 11.037 | 93.652 | 0.2706 |
| 1.05 | 19.725 | 108.29 | 0.4857 |
| 1.10 | 32.15 | 126.92 | 0.7956 |

B. Modelamiento usando BCTRAN

Para el modelo *BCTRAN* se usa la subrutina *SATURA* para determinar la curva $\lambda-i$, y las inductancias no lineales se conectan tal como lo muestra la figura 2.

En la figura 9 se muestra parte del Sistema Nacional Interconectado (SNI) con la S/E Sinincay.

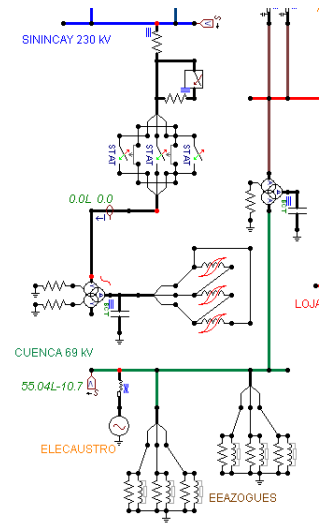


Fig. 9. Sistema en estudio usando BCTRAN

El resultado obtenido para la energización usando BCTRAN es el que se muestra en la figura 10

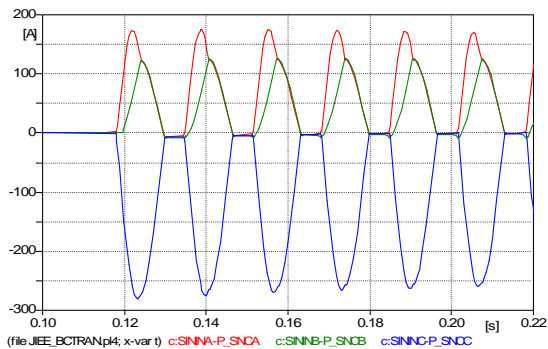


Fig. 10. Corrientes de energización del transformador de la S/E Sinincay usando el modelo BCTRAN de ATP.

El resultado anterior se compara con las oscilografías reales brindadas por la Gerencia de Operación y Mantenimiento de Transelectric. Se observa en la figura 11 que las corrientes simuladas distan mucho de las corrientes reales. Esto se puede explicar a partir de la figura 3 en donde se observa que la extensión de la curva de saturación mediante extrapolación lineal está muy alejada de la curva real para dicho núcleo. Por lo tanto, se comete un severo error al trabajar con curvas $\lambda-i$ ofrecidas por la subrutina SATURA.

. Los dos errores cometidos se los puede resumir como:

1. Los datos de la prueba de vacío no son suficientes como para tener una curva $\lambda-i$ cercana a la real.
2. Debido a que el devanado en el que se hizo la prueba de vacío (terciario) está en conexión Δ , la subrutina SATURA usa el término $\sqrt{3}$ para obtener la corriente de fase a partir de la corriente de línea medida, lo que conlleva a determinar la curva $\lambda-i$

con dos corrientes que no se las puede relacionar, tal como se mostró en la figura 7.

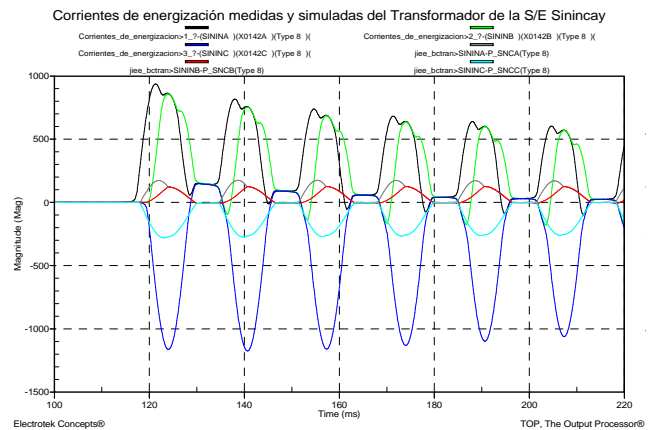


Fig. 11. Corrientes de energización reales y simuladas usando el modelo BCTRAN

C. Modelamiento usando XFMR (Hybrid Model)

Debido a que este modelo usa los valores de corriente de línea medida en la prueba de vacío, ningún tratamiento de esa prueba es necesario, salvo el caso de que la corriente en porcentaje ($\%I_0$) no esté calculada en su base adecuada. La norma IEEE Std C57.12.90-1999 precisa que en la prueba de vacío la corriente de excitación debe estar indicada en % de la corriente base tomando como valor base el Voltaje y Potencia nominales en el que es realizada la prueba; así, en los datos de prueba de vacío del transformador de Sinincay (tabla II), la corriente en porcentaje ($\%I_0$) está calculada para una corriente base que proviene de tomar como valor base de voltaje 13.8 kV y como valor base de la potencia 165.5 MVA que es la potencia nominal del primario y secundario del transformador. Si ingresamos los valores de la corriente I_0 en porcentaje, tal como está indicado en la tabla II, se producirán errores debido a que $\%I_0$ no está en la potencia base del terciario del transformador, por lo tanto, es necesario realizar un cambio de base tomando en cuenta que la $S_{vieja} = 165.5$ MVA, y la $S_{nueva} = 16.5$ MVA. Con ese tratamiento a la corriente, se ingresó los datos que exige el elemento XFMR de ATPDraw, escogiendo para la no linealidad un elemento tipo 96 (toma en cuenta la histéresis). Los resultados obtenido son los que se muestran en la figura 12.

Si comparamos estas corrientes simuladas con las corrientes reales, como se muestra en la figura 13, observamos que los resultados de las simulaciones con este nuevo elemento de transformadores en ATP, tiene una aproximación casi exacta con las corrientes reales, lo que permite validar este modelo siempre y cuando se posean datos confiables de la prueba de vacío y una buena aproximación del sistema a estudiarse.

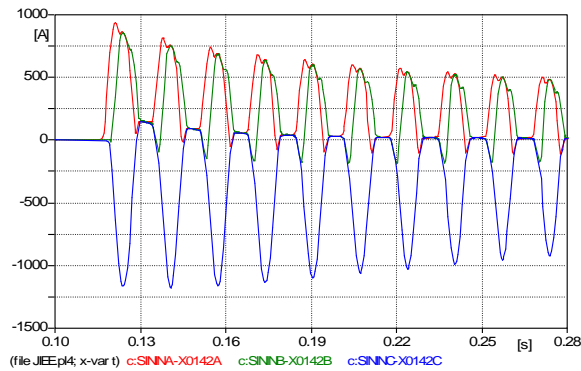


Fig. 12. Corrientes de energización del transformador de la S/E Sinincay usando el modelo XFMR de Atp

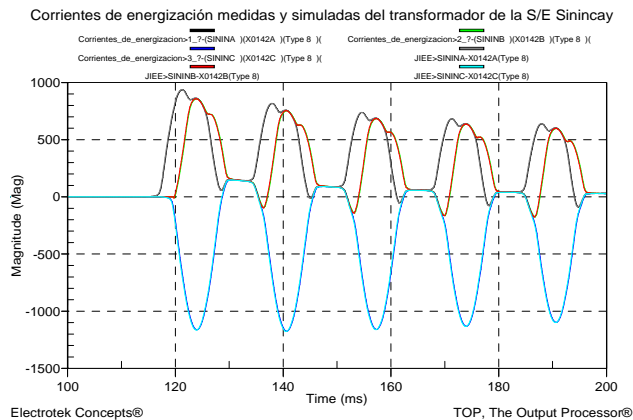


Fig. 13. Corrientes de energización reales y simuladas usando el modelo XFMR

Además del estudio presentado en este trabajo, se realizaron simulaciones para los transformadores de las subestaciones Milagro y San Gregorio, obteniéndose resultados muy cercanos a los reales.

VII. CONCLUSIONES

- Las limitaciones que presenta la prueba de vacío de los transformadores para la determinación de la curva de saturación del núcleo, en variables de *Flujo – Corriente*, durante saturaciones severas del mismo, provoca que se busquen métodos de extrapolación de dicha curva a partir de los datos de la prueba de vacío. Dichos métodos van desde una simple extrapolación lineal hasta métodos numéricos iterativos de ajuste de curvas.
- La extrapolación lineal que se ha venido usando mediante la subrutina SATURA de ATP para modelar el núcleo de un transformador produce errores severos en la determinación de la curva *Flujo – Corriente* y, por lo tanto, en la simulación de las corrientes de energización de un transformador.
- El nuevo modelo de transformador que trae el ATPDraw desde su versión 4.2 corrige este

problema mediante el ajuste de curvas, teniendo como base la ecuación de *Frolich*. Los resultados de este modelo han sido comparados con eventos reales logrando una gran exactitud de la simulación, lo que conlleva a tener una gran confianza en estudios posteriores.

- Si bien el estado del arte tiene una gran aceptación de este nuevo modelo de transformador, también alerta de la posibilidad de errores debidos especialmente o inestabilidades numéricas en los modelos no lineales del tipo 96 y 93 con los que se simula el núcleo del transformador.

VIII. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece las facilidades prestadas por la División de Estudios y Plan de Expansión, y los datos de equipos y oscilografías reales de la Gerencia de Operación y Mantenimiento de CELEC EP – TRANSELECTRIC para el desarrollo de este trabajo.

IX. REFERENCIAS

- [1] B. A. Mork, F. González, D. Ishchenko, D. Stuehm y J. Mitra, "Hybrid Transformer Model for Transient Simulation - Part I: Development and Parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 22, No 1, Enero 2007.
- [2] N. Chiesa y H. K. Hoidalen, "Modeling of Nonlinear and Hysteretic Iron-Core Inductors in ATP", Department of Electric Power Engineering- NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET, Tech Rep. 2008.
- [3] W.Scott Meyer y T. Liu, "EMTP Theory Book", Canadian/American User Group, 1995.
- [4] J. A. Martínez, "Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión", McGraw Hill, 2008.
- [5] N. Chiesa y H. K. Hoidalen, "On the Calculation of fluxlinkage/current characteristics for Δ -coupled transformer windings", Department of Electric Power Engineering-NORGES TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE UNIVERSITET, Tech Rep. 2007.
- [6] B. A. Mork, F. González, D. Ishchenko, N. Chiesa y H. K. Hoidalen, "Implementation of the Hybrid Transformer Model I ATPDraw", IPST, Tech paper, 2007.
- [7] "Registro de Pruebas de Transformador de la Subestación Sinincay", CELEC EP – TRANSELECTRIC.

X. BIOGRAFÍA



Luis Dután, nació en Azogues-Ecuador. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa La Salle - Azogues. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero Eléctrico en 2008. Desde 2009 ha venido colaborando en CELEC – TRANSELECTRIC inicialmente en la División de Subestaciones y en la actualidad en

la División de Estudios y Plan de Expansión. Además, se encuentra cursando la Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Áreas de interés: transitorios electromagnéticos, estudios eléctricos, simulaciones de sistemas de potencia en Alternative Transients Program (ATP), planificación de sistemas de potencia. (ldutan@transelectric.com.ec)