

## PERDIDAS DE POTENCIA EN TRANSFORMADORES BAJO ALTA SATURACION

Daniel Slomovitz

U.T.E. - LABORATORIO, Paraguay 2385, Montevideo, URUGUAY

INTRODUCCION

En general, los modelos de transformadores se proponen para condiciones normales de funcionamiento, excluyéndose el caso de muy alta saturación magnética del núcleo. A lo sumo, existen trabajos que proponen modelar la rama magnética por un inductor variable con o sin pérdidas [1]. Sin embargo, es necesario contar con modelos más apropiados cuando se estudian fenómenos transitorios que saturan el núcleo. Tal es el caso de ferresonancia, donde las pérdidas de energía deben evaluarse precisamente [2] ya que determinan el cese o la permanencia del fenómeno.

También en el estudio de la protección diferencial de transformadores es necesario contar con modelos más elaborados. Recientemente se han propuesto relés diferenciales basados en la vigilancia de los valores de los componentes del modelo del transformador [3]. Defectos internos cambian los valores de estos componentes. Sin embargo, los modelos de transformadores usados en esos trabajos no contemplan variaciones de sus ramas series (impedancias de corto circuito) al saturar el núcleo [4]. Obviamente, si dichos valores cambian por la saturación magnética del núcleo, este tipo de relé indicará falla interna cuando no la hubo.

Por otro lado, un nuevo tipo de relé diferencial [5] basado en la medición de la potencia consumida por el transformador, también requiere de un modelo más preciso. Este debe pronosticar el consumo interno en base a las corrientes y voltajes aplicados al transformador, aún en transitorios de alta saturación.

En este trabajo se analizan los modelos propuestos y se proponen modificaciones para aumentar la exactitud en régimen transitorio.

ANALISIS DE MODELOS PROPUESTOS

Para el caso más simple de transformador monofásico de dos arrollados, en baja frecuencia, los modelos más elaborados proponen el circuito de la figura 1.

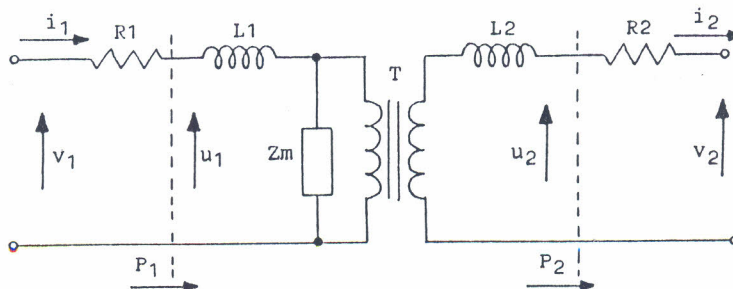


Figura 1

donde  $R_1$  y  $R_2$  contemplan las pérdidas en los arrollados más las pérdidas adicionales y  $L_1$ ,  $L_2$  modelan las inductancias de fuga.  $Z_m$  constituye la rama magnetizante. Está formada por un inductor variable por tramos o en forma continua que contiene la información de la curva de saturación magnética del núcleo y una rama en paralelo que modela las pérdidas en el núcleo.

### INDUCTANCIAS SERIE

Los valores de  $L_1$  y  $L_2$  se asumen fijos, sin embargo es conocido que tienen cierta variación con el grado de saturación del núcleo.

La determinación de los valores de estos inductores en forma separada, en base a los datos constructivos del transformador es compleja y en general los fabricantes solo informan el valor de la inductancia de corto circuito total  $L_1+L_2$ . Por otro lado, la medición de cada una de estas inductancias sólo es posible saturando el transformador. Esto se debe a la gran diferencia de valores entre las impedancias serie y paralelo de este modelo.

Si bien la variación de toda la inductancia de corto circuito es en general pequeña, la variación individual de  $L_1$  y  $L_2$  es muy grande. Esto se debe a que los flujos magnéticos por el aire cambian su geometría al saturar el transformador. La figura 2 muestra un esquema de los flujos en el aire con y sin saturación. Parte del flujo de la bobina I que se cerraba por el núcleo (fig. 2a), pasa a integrar el flujo común al cerrarse por el espacio externo al transformador (fig. 2b). Este cambio es producido por el marcado descenso de la permeabilidad magnética del hierro. Esto produce una ligera disminución en la inductancia total de fugas, pero una gran reducción en  $L_1$ .

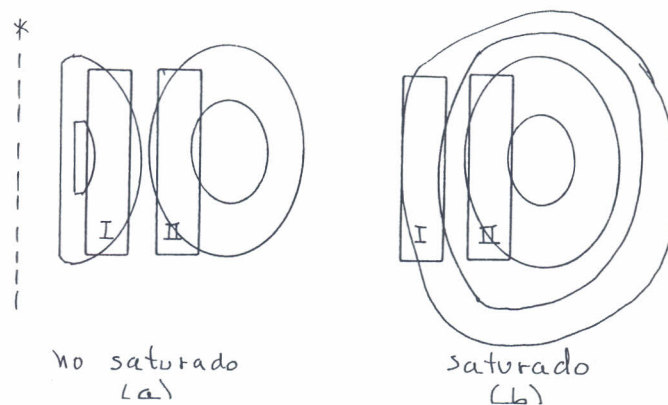


Figura 2

### RESISTENCIAS SERIE

Los resistores  $R_1$  y  $R_2$  modelan las pérdidas producidas por la circulación de la corriente principal en los arrollados, más las pérdidas adicionales. Estas últimas se deben a corrientes en torbellino en los arrollados y otras partes conductoras del transformador. Estas corrientes son producidas por campos magnéticos dispersos. Durante la saturación, la geometría de estos campos varía por lo cual los modelos que utilizan resistencias constantes predicen resultados erróneos. La figura 3 muestra esquemáticamente la amplitud del campo magnético en arrollados cilíndricos, suponiéndolo colineal con el eje.

La figura 3a muestra la relación entre el campo  $B$  y el radio de la bobina  $r$  para el caso no saturado. En estas condiciones los "ampere-vuelta" de

ambos arrollados son prácticamente iguales. En cambio, bajo alta saturación la permeabilidad magnética del hierro se reduce a la del aire. Suponiendo que el arrollado excitador sea el II, el diagrama B-r se aproxima al mostrado en la figura 3b. La forma de la intensidad del campo que atraviesa el arrollado I cambia y esto provoca un aumento en las resistencias del modelo. Obsérvese que dicho aumento no es necesariamente en  $R_1$ . Existen pérdidas adicionales aun en los arrollados por los que no circula corriente.

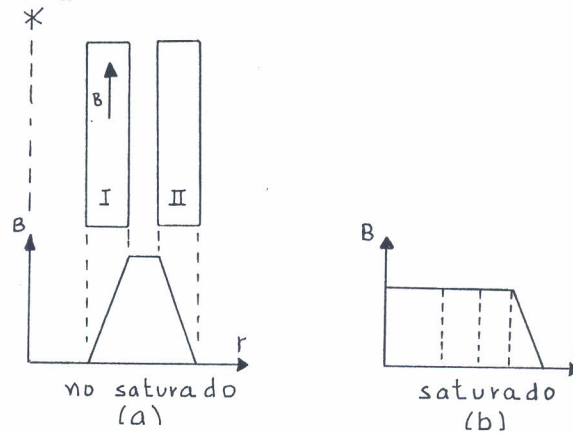


Figura 3

#### RAMA PARALELO

El inductor no lineal no produce pérdida de potencia. Estas sólo están asociadas a la rama paralelo. Se han propuesto varios modelos para simular las pérdidas en el hierro, tanto por histéresis como por corrientes parásitas [6]. Incluso se ha estudiado la relación de pérdidas cuando el flujo es sinusoidal o cuando es fuertemente distorsionado [7]. Sin embargo, todos estos modelos predicen pérdidas, durante la saturación, mucho menores que las pérdidas en las ramas serie. Por tanto, desde el punto de vista del análisis de las pérdidas totales bajo alta saturación, es posible despreciar las pérdidas en el núcleo.

#### ESTUDIO EXPERIMENTAL

Dado que la potencia aparente requerida para saturar un transformador es mucho mayor que su potencia nominal, trabajamos con un pequeño transformador de 5 kVA monofásico, de 180 V/105 V,  $i_0=5.7\%$ , pérdidas en los arrollados 2.8% y pérdidas en el hierro 1.2%.

Las principales diferencias en el comportamiento saturado entre transformadores pequeños y grandes radican en el factor de mérito de la inductancia de los arrollados y en la relación entre pérdidas adicionales y pérdidas totales en cortocircuito.

En líneas generales, cuanto más grande es el transformador mayor es el factor de mérito. Por esto, los transitorios de irrupción con componente continua tienen una constante de tiempo de varios segundos en transformadores grandes, mientras que en el usado es de solo de solo 2 ciclos. Sin embargo, para la medición de las pérdidas basta con la

información del primer ciclo, por lo cual esta diferencia no afecta los resultados.

Por otro lado, la diferencia de relación de pérdidas adicionales es grande. En transformadores de 30 MVA puede llegar a un 30%, mientras que en el transformador usado es del 7%. Esto se tendrá en cuenta en la evaluación final de resultados.

Las mediciones sobre el transformador en condiciones de muy alta saturación, se realizaron durante el transitorio de irrupción. De esta forma, la alta corriente consumida dura solo unos pocos ciclos y no llega a elevar apreciablemente la temperatura de los arrollados. por el contrario, si se realizaran las mediciones en régimen permanente, la elevación de la temperatura introduciría errores importantes.

La potencia y la energía consumida por el transformador se obtuvieron midiendo las corrientes por medio de 2 resistores serie y los voltajes mediante 2 divisores de tensión.

La corriente transitoria de irrupción puede alcanzar valores varias veces mayores a la corriente nominal. La potencia consumida por el transformador debida a esta corriente transitoria, es principalmente debida a la disipación en R1 o R2. Esta potencia puede alcanzar valores del orden de la potencia nominal por el alto valor del pico de la corriente de irrupción.

Por otro lado, durante el transitorio de irrupción la potencia entregada al campo magnético alcanza valores altos. Esta potencia incluso puede superar a la potencia nominal del transformador. Sin embargo, la energía almacenada magnéticamente en la primera parte del ciclo es devuelta a la fuente en casi su totalidad antes de completarse un periodo. Esto es así pues las pérdidas magnéticas, aun bajo fuerte saturación del hierro, representan un porcentaje pequeño de la energía almacenada de pico.

La Fig. 4 muestra el oscilograma obtenido de corriente  $i_1$  (trazo inferior) y voltaje  $u_1$  (superior) durante una conexión en vacío. La corriente alcanza un primer pico de 200 A y vuelve a cero al final del periodo.

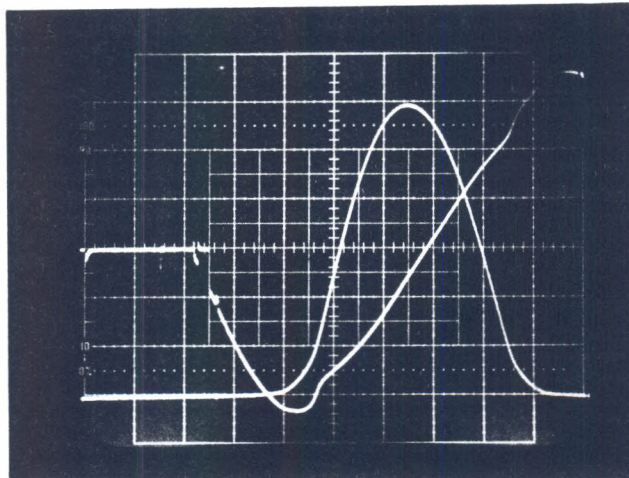


Figura 4

A partir de los oscilogramas de voltaje y corriente se computó los valores de la rama serie del modelo del transformador.

Excitando el primer arrollado se tiene

$$\int_0^T (v_1 - v_2) dt = R_1 \int_0^T i_1 dt + L_1 [i_1(T) - i_1(0)] \quad (1)$$

por ser la corriente nula tanto al comienzo como al final del periodo

$$R_1 = \frac{\int (v_1 - v_2) dt}{\int i_1 dt} \quad (2)$$

de manera análoga se calcula R2

Para el cálculo de la inductancia se utilizan las siguientes ecuaciones

$$v_L = v_2 - v_1 - R i \quad (3)$$

siendo

$$v_L = L di/dt \quad (4)$$

entonces

$$L = \frac{v_L}{di/dt} \quad (5)$$

La determinación del valor de L se realiza estimando la mejor adaptación entre las mediciones y la ecuación.

Usando este método se obtuvieron los siguientes resultados:

Lado excitado: 105 V (exterior)

$$R = 0.037 \, \Omega \quad (R_{dc} = 0.032 \, \Omega, R_{corto \, circuito \, total} = 0.062 \, \Omega, \text{ evaluada del lado de } 105 \, V)$$

$$L = 0.13 \, \text{mH} \quad (L_{corto \, circuito \, total} = 0.17 \, \text{mH}, \text{ evaluada del lado de } 105 \, V)$$

Lado excitado: 180 V (interior)

$$R = 0.080 \, \Omega \quad (R_{dc} = 0.074 \, \Omega)$$

$$L < 0.01 \, \text{mH}$$

Estos resultados muestran que la inductancia del arrollado interior es despreciable frente a la del arrollado exterior, mientras que la inductancia total se redujo un 24%.

Por otro lado, la variación de las resistencias es del 4%. Estimamos que las variaciones hubieran sido mayores si el transformador hubiera tenido mayores pérdidas adicionales.

#### MODELO PROPUESTO

El ajuste entre la energía consumida por el transformador y el modelo, puede lograrse si se agrega un pequeño resistor en serie con el inductor de la rama magnetizante. La potencia disipada por este resistor es despreciable en régimen normal, pero se torna importante durante la saturación.

El cambio producido por esta modificación en la corriente magnetizante es muy reducido.

## TRABAJOS FUTUROS

En redes de potencia, los transformadores son, en general, de tres arrollados y trifásicos. Se generalizará el modelo para contemplar estos casos y se determinará en qué ramas se incluirán los resistores adicionales.

En la parte experimental, se ensayará un transformador de tres arrollados con pérdidas adicionales elevadas. Para lograr esto, el bobinado se construyó con una barra de cobre de sección rectangular dispuesta en forma horizontal, de manera que el campo de dispersión provoque grandes corrientes parásitas.

## REFERENCIAS

- [1] J. Frame, "Hysteresis modeling in an electromagnetic transient program," IEEE PAS 101, 1403-1412, 1982.
- [2] M. Andrade, F. Girardi, D. Slomovitz, "Avaliacao dos procedimentos de calculo de sobretensoes provocadas por ferroressonancia," X SNPTEE, Curitiba, Brasil, 1989.
- [3] K. Inagaki, M. Higaki, Y. Matsui, K. Kurita, "Digital protection method for power transformer based on an equivalent circuit composed of inverse inductance", IEEE Trans. Power Delivery, vol.3, 1988, pp. 1501-10.
- [4] D. Slomovitz, Discusión de "Design, implementation and testing of a microprocessor-based high-speed relay for detecting transformer winding faults," IEEE WM, 1991.
- [5] D. Slomovitz, "Un nuevo método para la protección diferencial de transformadores," IEEE LATINCON, México, 1990.
- [6] D. Ewart, "Digital computer simulation model of a steel core transformer," IEEE Power Delivery, 174-183, 1986.
- [7] D. Slomovitz, "Correction of power transformer no-load-losses measured under nonsinusoidal voltage waveform," IEE, 136, 42-47, 1989.