



MODELACIÓN DEL FENÓMENO DE HISTÉRESIS EN TRANSFORMADORES

Dr. Antonio A. Martínez García.

Ing. Lázaro Guerra Hernández.

Resumen / Abstract

En el presente trabajo se describe un procedimiento para la representación del fenómeno de histéresis en los núcleos de los transformadores para la simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos.

Palabras claves Histéresis, transitorios electromagnéticos

A procedure for the representation of the hysteresis phenomenon core of transformers during electromagnetic transient phenomena.

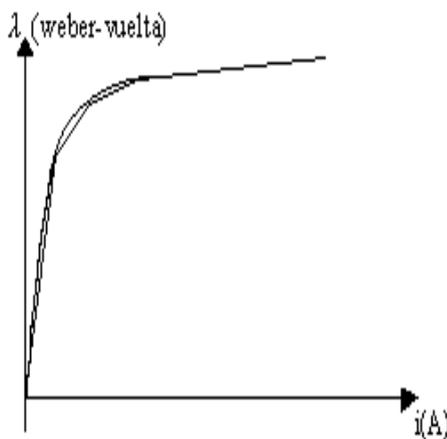
Key words Hysteresis, electromagnetic transients

Introducción:

En el presente trabajo se describe un procedimiento para la representación del fenómeno de histéresis de los núcleos de transformadores para la simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos. El modelo se basa en que en la actualidad los lazos histéresicos de los materiales utilizados en la construcción de transformadores son estrechos y los detalles de su forma no son importantes en las modelaciones, solo el valor de las pérdidas es de interés así como el efecto de atenuación asociado a las mismas. El procedimiento original propuesto en [1] se basa en producir pérdidas proporcionales al cuadrado de la densidad máxima de flujo como se comprueba experimentalmente.

Desarrollo:

El fenómeno de histéresis es complejo y depende fuertemente de la historia magnética del material ferromagnético. Lo anterior se trata en [1], donde se



muestran pequeños lazos de magnetización descritos por un núcleo bajo determinadas condiciones de trabajo. El objetivo del presente trabajo es la modelación de las pérdidas histéresicas en ciclos estrechos y altos en los transitorios electromagnéticos en transformadores, sin entrar en detalles en cuanto a la forma precisa de los ciclos descritos por el material ferromagnético.

Figura 1 Curva de magnetización de un transformador aproximada a cuatro tramos de recta

En [1] se utiliza como modelo para el ajuste de la curva histéresica un polinomio de orden n , en este trabajo se utilizó una aproximación a cuatro tramos de recta como se muestra en la figura 1. cuyos detalles se describen en [2], donde se modelan las corrientes de inrush en transformadores sin considerar histéresis.

El procedimiento propuesto se basa en que a partir de la curva B versus H del núcleo aproximado a cuatro segmentos de recta, a la cual se llamará $H_0=f(B)$, al modelar el comportamiento del transformador partiendo de cero historia magnética del núcleo, o sea en $t=0$, $B=H=0$, cuando se le aplica un determinado voltaje en $t=0$ el valor de B del transformador variará desde el origen hasta el valor B_{max} (punto 1 figura 2), una vez alcanzado B_{max} se obliga a que cuando H comienza a disminuir lo haga no por la curva H_0 sino según la expresión:

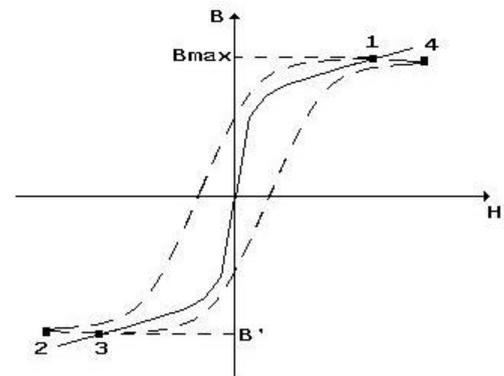


Figura 3 Representación de la curva de histéresis de un transformador con la curva de magnetización aproximada

$H = H_0 + k_{hist}(B - B_{max})$ (1) lo cual se muestra con líneas de punto en la figura 2 hasta alcanzar el máximo valor en sentido contrario en el punto 2, de ordenada B' , donde k_{hist} es una constante. El segundo término de la expresión (1) corresponde con la distancia 2-3 cuando se llega al valor máximo negativo y le llamaremos H_{hist} . En este instante B cambia su sentido de variación y se supone que se comienza a partir de 3 el mismo proceso hacia arriba suponiendo que H varía según la

misma expresión a partir ahora de $B_{max} = B'$ describiéndose la línea de puntos 3-4, donde H_{hist} toma el mismo valor que debajo. (se está suponiendo $B_{max} = |B'|$ ciclo histerésico simétrico.

Al procederse de la manera descrita el área dentro del ciclo si partimos del punto 2 y vamos hasta el 3 podrá escribirse como:

$$2 \int_{-B_{max}}^{B_{max}} H dB = 2 \int_{-B_{max}}^{B_{max}} [H_0 + k_{hist} (B - B_{max})] dB$$

$$= 4k_{hist} B_{max}^2 \quad (2)$$

Lo anterior se ve de manera gráfica si partimos de un lazo histerésico muy fino y alto como se indica en la figura 3, donde el área descrita en medio ciclo partiendo de un punto $(0, B_0)$ por debajo del lazo queda como se indica en la figura 3 que corresponderá con la mitad del ciclo histerésico y el área del romboide que se forma al bajar de nuevo según lo descrito arriba será la base por la altura:

$$= H_{hist} \cdot 2 B_{max} = 4 k_{hist} B_{max}^2$$

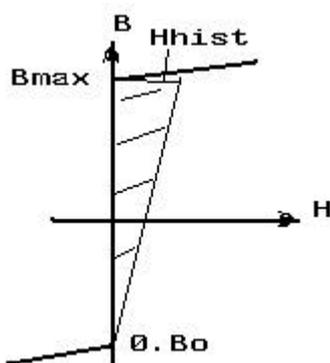


Fig. 3 Medio ciclo histerésico en ciclo muy alto ideal.

Las pérdidas histerésicas se calculan experimentalmente como:

$$\text{Pérdidas} = k_{pérdidas} B^m$$

donde m para los aceros modernos varía entre 1.5 y 2 y puede no ser constante, por lo que una buena aproximación es tomar $m=2$, por lo que podemos considerar:

$$k_{pérdidas} = 4 k_{hyst}$$

y por tanto el algoritmo de trabajo con que se obliga a variar H produce el efecto de incluir las pérdidas histerésicas en la modelación previa medición experimental del valor de $k_{pérdidas}$.

En el caso de que la amplitud del voltaje aplicado al transformador varíe en el tiempo, se recorrerán ciclos de diferentes amplitudes, pero siempre se cumplirá que las pérdidas sean proporcionales a ΔB^2 asegurándose una evaluación correcta de las pérdidas para cualquier transitorio.

Resultados obtenidos.

La inclusión de las pérdidas histerésicas en el cálculo de transitorios se incluyó en el algoritmo desarrollado en [2], para el cálculo de los transitorios en transformadores de fuerza y de corriente. En la figura 4 se muestran los resultados de los cálculos de las corrientes en el primario de dos transformadores de corriente en pre y postfalla y en la figura 5 se muestra la forma del lazo

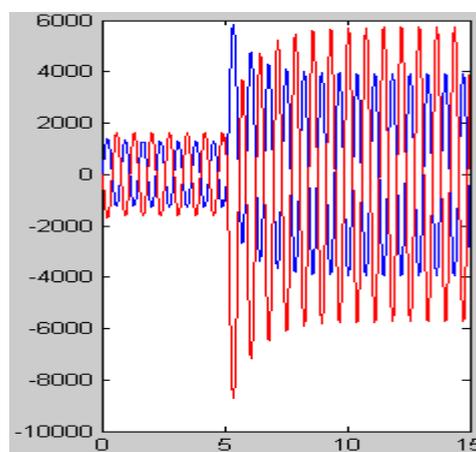


Fig.4 Corrientes primarias en TCs con condiciones iniciales diferentes.

histerésico descrito por el núcleo del transformador de corriente al que se le hizo circular la corriente que tiene una componente de directa en el sentido negativo donde se puede ver una mayor saturación en un sentido negativo que en el contrario, motivado por la acción de la componente de directa de la corriente.

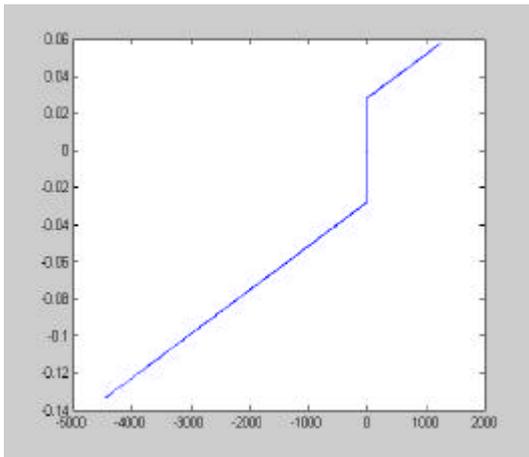


Fig.5 Ciclo histerésico descrito por el núcleo del TC con CD negativa.

En la figura 6 se muestran las gráficas ampliadas de los recorridos del ciclo histerésico a medida que la corriente disminuye una vez alcanzado el mayor valor de B. Obsérvese como se acorta el tamaño del ciclo descrito a medida que disminuye el valor de la corriente de inrush, o sea, al disminuir las condiciones de saturación del transformador de corriente.

Conclusiones

El sencillo procedimiento propuesto en [1] incluido en [2] donde se ha utilizado una aproximación lineal de la curva de histéresis del núcleo de transformadores de fuerza y de medición nos ha permitido el estudio del comportamiento de transformadores ante transitorios electromagnéticos considerando las pérdidas histerésicas, lo que incrementa ligeramente el amortiguamiento de los transitorios y disminuye los valores picos de las corrientes tansitorias, lo que será tratado en trabajos posteriores al presente.

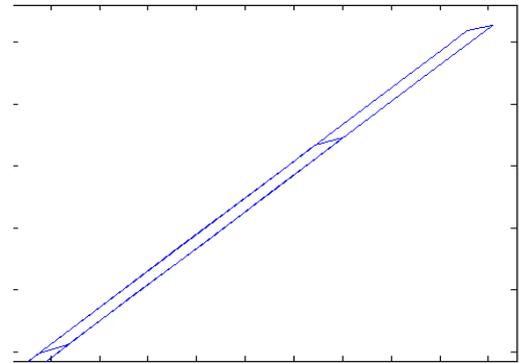


Fig.6 Ampliación de ciclo histerésico en semiciclo positivo lazo fig. 5.

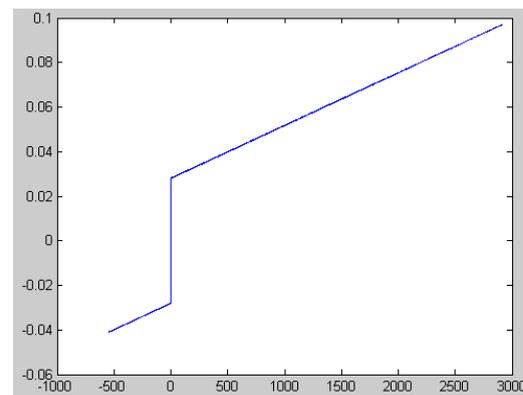


Fig.7 Ciclo histerésico descrito por el Núcleo del TC con CD positiva.

Bibliografía.

- 1.- F. León, Adam Semlyen. A simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers. IEEE Trans on Power Delivery. Vol 10 No.1 Enero 1995.
- 2.- A. Martínez García, Lázaro Guerra Hdez y otros. Algoritmo para el cálculo de transitorios en transformadores de fuerza y de corriente. Energética Año 2001.

Datos de autores:

Dr. Antonio A. Martínez García.

CIPEL. email amg@cujae.edu.cu

Ing. Lázaro Guerra Hernández.

CIPEL. email lazaro@cujae.edu.cu