

Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico

CONTRERAS-AGUILAR, Luis*†, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P

Recibido Abril 5, 2017; Aceptado Junio 20, 2017

Resumen

Los fenómenos que surgen durante la operación transitoria de los transformadores eléctricos, se pueden caracterizar mediante modelos matemáticos que describan su comportamiento no lineal. Algunos softwares computacionales especializados para el análisis de transitorios en sistemas eléctricos incluyen modelos sofisticados de transformadores que describen apropiadamente estos fenómenos. Sin embargo, algunos de estos modelos requieren del conocimiento de la saturación del núcleo que en algunos casos no son proporcionados por el fabricante. En este artículo se presenta un modelo alternativo de la ecuación diferencial del núcleo ferromagnético no lineal, el cual es adecuado para estudios transitorios de baja frecuencia en transformadores eléctricos. Además, se presenta una forma simple para determinar los coeficientes paramétricos de la representación de saturación del núcleo. Finalmente, se realizan simulaciones del modelo monofásico del transformador eléctrico para comparar y cuantificar el modelo presentado con mediciones reales.

Saturación, transformador eléctrico, corriente de *inrush*, mediciones, simulación

Abstract

The phenomena that occur during the transient operation of electric transformers are characterized by mathematical models that describe its non-linear behavior. Specialized software for the transient analysis of electrical systems has included sophisticated models of transformers that properly describe the non-linear phenomena. However, some of these models require special knowing of the non-linear characteristic in the core, which in many cases is not provided by the manufacturer. This paper presents an alternative differential equation model of the non-linear ferromagnetic core, which it is suitable for studies of low-frequency transients of electric transformers. In addition, a simple way to determine the parametric coefficients of the non-linear representation in the core saturation is carried-out. Finally, simulations of the single-phase transformer model are compared with measurements in order to validate and quantify the presented model.

Saturation, electric transformer, *inrush* current, measurements, simulations

Citación: CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y CONTRERAS-SUÁREZ, Juan. Caracterización no lineal y estimación de coeficientes paramétricos en la representación de la saturación magnética del transformador eléctrico. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-2: 1-10

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: luisc@ucl.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Durante la energización y/o switcheo del transformador eléctrico se puede originar una gran corriente denominada corriente de “*inrush*”. Este fenómeno se caracteriza por una gran magnitud de corriente respecto al nominal, así como una gran componente de corriente directa y un importante contenido armónico. En términos generales, son diversos los factores que influyen para que se presente este fenómeno transitorio. En este contexto, las condiciones iniciales y la característica no lineal del núcleo ferromagnético del transformador son dos factores importantes que influyen directamente sobre la respuesta transitoria al momento del switcheo. También, la corriente de *inrush* puede llegar a ser hasta diez o más veces la corriente nominal durante el transitorio (Cheng et al, 2004), mientras la corriente de magnetización en estado estacionario, suele ser inferior al 1% de la corriente nominal.

Algunos de los efectos no deseados que se presentan cuando aparecen corrientes de *inrush* son (Kovan et al., 2011):

- Surgen problemas relacionados a la calidad de la energía y ferresonancia.
- Se incrementan los esfuerzos eléctricos y mecánicos que pueden dañar el equipo.
- Los sistemas de protección pueden operar falsamente.

Por otro lado, el modelado de transformadores puede llegar a ser muy complejo, debido principalmente a la gran cantidad de diseños en núcleos y al hecho de que algunos de sus parámetros son no lineales y dependientes de la frecuencia (Martinez-Velasco & Mork, 2003).

Además, dependiendo de las necesidades de estudio se han clasificado diferentes rangos de frecuencia para el análisis de transitorios (Members et al., 2013). También, los modelos desarrollados deben ser válidos para el rango específico de frecuencia o estudio requerido. Considerando este trabajo se destaca los transitorios de baja frecuencia, con rango de frecuencia desde los 5 Hz hasta 1 kHz.

Del mismo modo, se pueden utilizar diversos criterios para clasificar los modelos de transformadores en simulaciones de transitorios de baja frecuencia (Martinez-Velasco & Mork, 2003). Se destacan tres grupos principales de modelos los cuales están basados en: representación matricial (impedancia o admitancia), otro grupo son los modelos basados en la topología y el tercer grupo se basa en componentes saturables del transformador. En este sentido, el desarrollo del modelo del transformador para simulaciones de transitorios de baja frecuencia debe considerar la saturación y pérdidas del núcleo ferromagnético.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar una representación alternativa del transformador para simulaciones transitorias de baja frecuencia. El modelo está basado en el circuito eléctrico clásico (ver Figura 1). La propuesta se centra en el modelado transitorio del inductor no lineal que representa la saturación magnética del transformador. La descripción de la saturación es mediante funciones continuas y diferenciables que permite acoplarse directamente a la ecuación diferencial que describe el comportamiento de la corriente de magnetización en el transformador. Así mismo, se describe un proceso simple de optimización para obtener los coeficientes de las funciones que representan la saturación del núcleo y con ello tener parámetros para desarrollar simulaciones transitorias del transformador.

Modelado del transformador monofásico

La Figura 1 muestra el circuito clásico equivalente-T del transformador monofásico con parámetros concentrados. El circuito representa un transformador de dos devanados, donde la rama central en paralelo representa el núcleo ferromagnético. En esta representación se consideran las pérdidas en el núcleo (R_m) y su característica de saturación (i_m). Así mismo $R_{p,s}$ y $L_{p,s}$ son las pérdidas en el cobre y la inductancia propia de cada devanado, respectivamente.

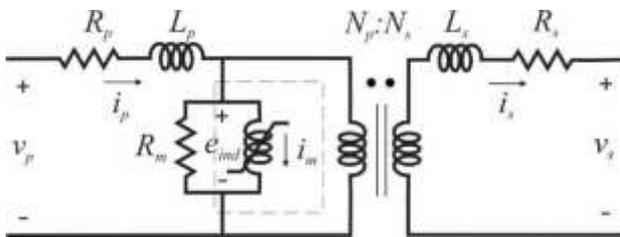


Figura 1 Circuito equivalente-T del transformador monofásico

Fuente: Elaboración propia con información de dominio público

Aplicando las leyes de Kirchhoff y refiriendo al lado primario del transformador se tiene,

$$v_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + e_{ind} \quad (1)$$

$$e_{ind} = a(R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + v_s) \quad (2)$$

$$e_{ind} = R_m (i_p - \frac{i_s}{a} - i_m) \quad (3)$$

donde a es la relación de transformación y está dada por $a = N_p/N_s$, p y s denotan primario y secundario respectivamente, v y i son los voltajes y corrientes.

Representación alternativa en la saturación del núcleo

Ahora, observando la parte de saturación en el núcleo (recuadro discontinuo) y de acuerdo a la ley de Faraday para los enlaces de flujo se tiene (Staff, 1965),

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

Con

$$\lambda = L_m i_m \quad (5)$$

Desde que la inductancia (L_m) no es constante y es función de la reluctancia (\mathfrak{R}) (Staff, 1965),

$$L_m = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (6)$$

y la reluctancia, a su vez es función de la permeabilidad (μ) del material magnético en el núcleo,

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (7)$$

donde A es el área de la sección transversal del núcleo, l es la longitud media del trayecto del flujo en el núcleo y N es el número de vueltas en la bobina. Sustituyendo (7) y (6) en (5) se obtiene,

$$\lambda = K \mu i_m \quad (8)$$

donde $K = AN^2/l$ y depende de los parámetros físicos del núcleo. Sustituyendo (8) en (4),

$$e_{ind} = K \frac{d\mu i_m}{dt} \quad (9)$$

La permeabilidad (μ) no es constante en materiales ferromagnéticos tal que,

$$e_{ind} = K \left[\mu \frac{di_m}{dt} + i_m \frac{d\mu}{dt} \right] \quad (10)$$

Resolviendo para μ en (8) y substituyendo en la ecuación anterior resulta,

$$e_{ind} = \left\{ \frac{\lambda}{i_m} \frac{di_m}{dt} + i_m \frac{d\lambda}{dt} \right\} \quad (11)$$

Usando la regla de la cadena en el último término de la expresión anterior,

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{di_m} \times \frac{di_m}{dt} \quad (12)$$

Combinando (11) y (12) se obtiene la expresión alternativa para expresar el voltaje inducido del circuito,

$$e_{ind} = \left[\frac{\lambda}{i_m} + i_m \frac{d\lambda}{di_m} \right] \frac{di_m}{dt} \quad (13)$$

Finalmente y por simplicidad con $a = 1$, las expresiones (1), (2) y (3) pueden ser re-arrregladas para formar un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de la forma,

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p} [v_p - (R_p + R_m)i_p + R_m(i_s + i_m)] \quad (14)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s} [-v_s - (R_s + R_m)i_s + R_m(i_p - i_m)] \quad (15)$$

$$\frac{di_m}{dt} = R_m(i_p i_m - i_s i_m - i_m^2) \left[\lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right]^{-1} \quad (16)$$

Las ecuaciones (14), (15) y (16) describen el comportamiento transitorio de las corrientes en el primario, secundario y de magnetización respectivamente.

Funciones para representar la saturación

La Figura 2 muestra la característica típica no lineal del núcleo ferromagnético en transformadores. Ahí se puede observar que los enlaces de flujo pueden ser función de la corriente de magnetización o de la densidad de flujo respecto a la intensidad de campo.

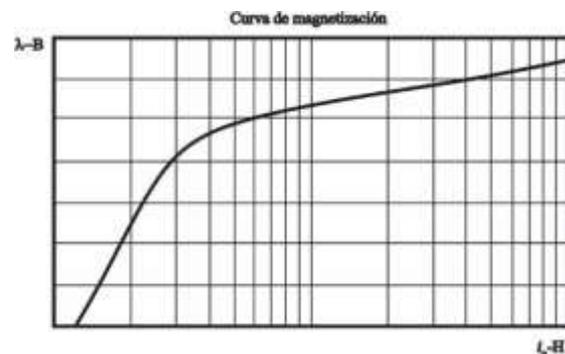


Figura 2 Característica de saturación en materiales ferromagnéticos

Fuente: Elaboración propia con información de dominio público

Para nuestros propósitos aquellas funciones que logren caracterizar dicha no linealidad y sean derivables respecto a i_m o H podrán ser incluidas en el modelo. Entonces, la característica no lineal puede ser descrita como,

$$\lambda = f(i_m, a, b, c) \quad (17)$$

donde a , b y c son coeficientes paramétricos que ajustan la función. Algunas funciones que pueden ser utilizadas son (Chiesa & Høidalen, 2007),

$$\lambda = \frac{i_m}{a + b |i_m| + c \sqrt{|i_m|}} \quad (18)$$

$$\lambda = a[\tanh(bi_m)] + ci_m \quad (19)$$

$$\lambda = a[\tan^{-1}(bi_m)] + ci_m \quad (20)$$

Las funciones (18) “Frolich modificada”, (19) “tangente hiperbólica” y (20) “tangente inversa” son continuas y diferenciable respecto a i_m , tal que sus derivadas como se indican en (16) son,

$$\left[\lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = \left[\frac{i_m(a + \frac{c}{2}\sqrt{|i_m|})}{(a+b|i_m|+c\sqrt{|i_m|})^2} \right] \quad (21)$$

$$\left[\lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = [ci_m - abi_m(\tanh^2(bi_m) - 1)] \quad (22)$$

$$\left[\lambda + i_m^2 \frac{d\lambda}{di_m} \right] = \left[ci_m + \frac{abi_m}{(b^2i_m^2+1)} \right] \quad (23)$$

Determinación de coeficientes paramétricos de la saturación

Usar parámetros apropiados en las ecuaciones (14)-(17) es importante para desarrollar una simulación transitoria fiable del transformador que se desea estudiar. Los parámetros relacionados con las pérdidas en los devanados (R_{p-s}), pérdidas en el núcleo (R_m) y las inductancia propias de los devanados ($L_{p,s}$) pueden ser proporcionados por el fabricante o se pueden obtener mediante pruebas de circuito abierto y corto-circuito del transformador (Martinez-Velasco, 2009) y (Cho, 2002). En el apéndice se muestran los resultados de las pruebas y los parámetros relacionados al transformador aquí presentado. Los coeficientes (a, b, c) de (17) pueden ser determinados mediante datos obtenidos de la característica de saturación, previamente conocida.

Mediciones para obtener la característica de saturación

Para determinar o ajustar los coeficientes a, b y c de (17) requerimos al menos tres puntos medidos o conocidos, tal que $x_j(i_{m,j}, \lambda_j)$ es un punto como se indica en la Figura 3. En este caso, las curvas de histéresis fueron obtenidas mediante mediciones de voltaje y corriente instantáneos en el secundario y primario del transformador en vacío, respectivamente. Entonces, los voltajes son transformados a enlaces de flujo. Para este trabajo, las curvas de histéresis fueron obtenidas en cinco puntos de operación en estado estacionario. Estas mediciones corresponden a 50, 80, 100, 120 y 150 por ciento del valor nominal del voltaje. La Figura 3 muestra solo tres curvas de histéresis correspondientes a 50, 100 y 150 por ciento del voltaje nominal.

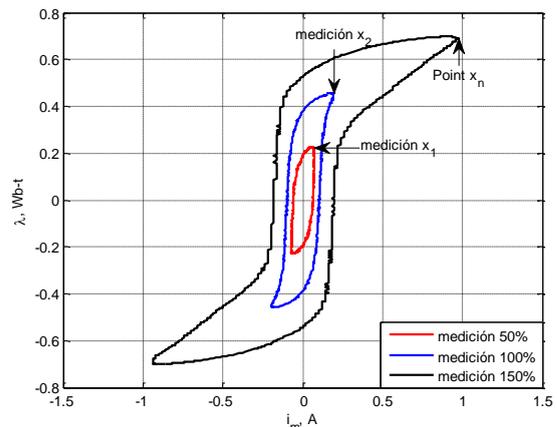


Figura 3 Mediciones de lazos de histéresis

Fuente: Elaboración propia

Determinación de los coeficientes en la función de saturación

Una vez que se tienen los puntos x_j , se puede aplicar el método de optimización de mínimos cuadrados para determinar los valores correspondientes a los coeficientes a, b y c , como se describe a continuación.

De (17) en términos de los puntos de medición e incluyendo los errores o residuos en el ajuste de la función de saturación se obtiene,

$$\varepsilon_j = f_j(i_{m,j}, a, b, c) - \lambda_j \quad (24)$$

donde ε_j representa los residuos de los puntos $x_j(i_{m,j}, \lambda_j)$, $\forall j = 1, 2, \dots, n$, con respecto a la función que se requiere ajustar. De tal forma, que se obtendría un sistema de residuos n -dimensional de ecuaciones algebraicas no lineales.

Entonces, el valor óptimo de los coeficientes a , b y c se obtienen minimizando la suma de los cuadrados de los residuos como sigue,

$$\min \mathbf{F}(a, b, c) = \sum_{j=1}^n (f_j(i_{m,j}, a, b, c) - \lambda_j)^2 \quad (25)$$

donde $f_j: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ y n es el número de mediciones que satisface $n \geq 3$. Ahora, asumiendo que la función objetivo $\mathbf{F}(a, b, c)$ es diferenciable y suave, la solución del problema de optimización requiere de (24) que cumpla con la condición de optimalidad de primer orden (Wright, 1999) dada por.

$$\nabla_{a,b,c}^2 \mathbf{F}(a, b, c) = 0 \quad (26)$$

Debido a que las funciones de saturación son no lineales, el sistema $\mathbf{F}(a, b, c)$ representa matemáticamente un sistema algebraico no lineal cuya solución proporciona los valores óptimos de los coeficientes a , b y c . Teniendo este objetivo en mente, el método de Newton puede ser aplicado para linealizar (26),

$$\underbrace{[\nabla_{a,b,c}^2 \mathbf{F}(a, b, c)]^k}_{\mathbf{H}} [\Delta \mathbf{Y}]^k = - \underbrace{[\nabla_{a,b,c} \mathbf{F}(a, b, c)]^k}_{\nabla \mathbf{F}} \quad (27)$$

En (27) el vector de actualización es definido como $\Delta \mathbf{Y} = \Delta[a, b, c]^T$, el superíndice T indica la transpuesta. Los términos \mathbf{H} y $\nabla \mathbf{F}$ es la matriz Hessiana y vector gradiente de la función objetivo, respectivamente y evaluados en la k -ésima iteración del algoritmo de solución. Por lo tanto la solución de (26) es obtenida resolviendo sucesivamente (27), donde al final de cada iteración los valores óptimos de a , b y c son aproximados con $\mathbf{Y}^{k+1} = \mathbf{Y}^k + \Delta \mathbf{Y}^k$ hasta cumplir una tolerancia especificada.

La Figura 4 muestra las curvas aproximadas a los puntos medidos con los coeficientes a , b y c optimizados. Los valores para estos coeficientes se dan en la tabla siguiente.

	a	b	c
Frolich	0.1646	0.8989	0.4871
tanh	0.7583	1.5630	0.1740
atan	0.5343	2.9608	0.0112

Tabla 1 Coeficientes paramétricos de las funciones

Fuente: Elaboración propia

Además, por observación se tiene que la función de Frolich modificada representa la mejor la curva deseada. Aunque, por el momento no es la finalidad, se podría incluir en el algoritmo la selección de la curva óptima, inclusive se pueden incluir más funciones que representen la característica no lineal, p.e., la ecuación logística y entre otras más.

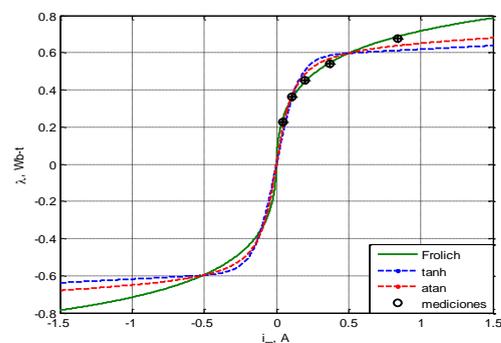


Figura 4 Resultados de la aproximación de funciones

Fuente: Elaboración propia

Solución transitoria del transformador monofásico

La energización del transformador es quizá la condición más crítica en cuanto a saturación del núcleo. Teniendo ello en mente y a fin de cuantificar el desempeño de la no-linealidad del modelo dentro de una simulación transitoria, se desarrolla un caso de estudio que involucra la respuesta de un transformador real, el cual se reporta en el Apéndice. Además, se desea producir las más altas corrientes de *inrush*, esto se logra cuando coincide la energización del transformador (sin carga) con el cruce por cero del voltaje de alimentación. Esta situación se puede reproducir en el laboratorio conectando el transformador por medio de un interruptor de cruce por cero. En este trabajo se utilizó un Relevador de Estado Sólido (RES) detector de cruce por cero modelo RM1A48D50 de Carlo Gavazzi ("Solid State Relays Industrial Zero Switching", 2007). Los voltajes y corrientes instantáneos se capturaron para la cuantificación del modelo de simulación. La Figura 5 muestra el arreglo del caso de estudio, con el cual se determina las mayores corrientes de *inrush*.

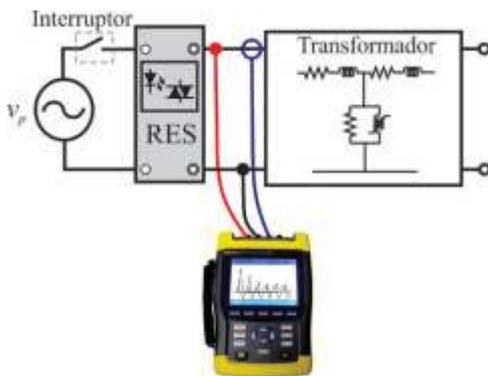


Figura 5 Caso de estudio para obtener las corrientes de inrush en el laboratorio

Fuente: Elaboración propia

Para dar constancia al caso de estudio se desarrollaron al menos 30 energizaciones del transformador, de entre ellas se tomaron las 5 más representativas.

En la Figura 6 se muestran las 5 corrientes de *inrush* (corriente primaria) producidas por la saturación del transformador al energizar cuando el voltaje tiene pendiente positiva durante la detección del cruce por cero. Además, se muestra la media y la desviación estándar (D-E) de las 5 señales. La tabla II muestra la media y desviación estándar para los 6 picos de la señal en unidades de Amperes.

pico	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}	6 ^{to}
media	27.12	13.04	8.61	6.42	4.91	4.02
D-E	1.1	0.65	0.49	0.39	0.41	0.34

Tabla 2 Media y desviación estándar de las mediciones

Fuente: Elaboración propia

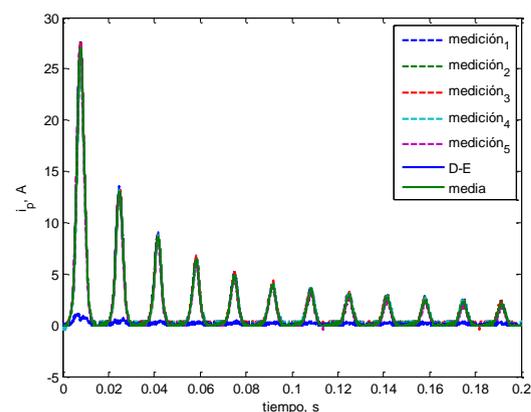


Figura 6 Mediciones de la corriente de inrush

Fuente: Elaboración propia

Ahora, se desarrolla una simulación del modelo utilizando como entrada los valores de voltaje grabados en las pruebas, así como el voltaje en el secundario, el cual es el producto de una carga (R_L) por la corriente i_s . La carga se considera lo suficientemente grande para que se suponga el transformador en vacío. Es decir, que $i_s \approx 0$ en este caso $R_L = 100,000 \Omega$. Los parámetros del Apéndice se utilizan y también los coeficientes a , b y c que se determinaron en la sección anterior.

Se utiliza el ode15s de MATLAB® para solucionar el sistema de tres ecuaciones diferenciales. Las condiciones iniciales de son $i_p(t_0) = 0$, $i_s(t_0) = 0$ y $i_m(t_0) = 0.192$.

La Figura 7 muestra las corrientes transitorias en las simulaciones con la ecuación de saturación Frolich modificada, tangente hiperbólica y tangente inversa y la media de las mediciones. En esta figura se observa una muy buena aproximación cuando se utiliza la ecuación de Frolich modificada. Mientras que las funciones no lineales tangente hiperbólica y tangente inversa muestran mayor discrepancia durante los primeros ciclos de simulación con respecto a la media de las mediciones.

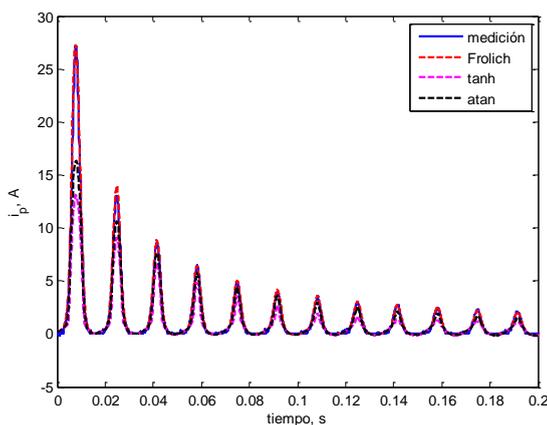


Figura 7 Simulaciones de la corriente de inrush

Fuente: Elaboración propia

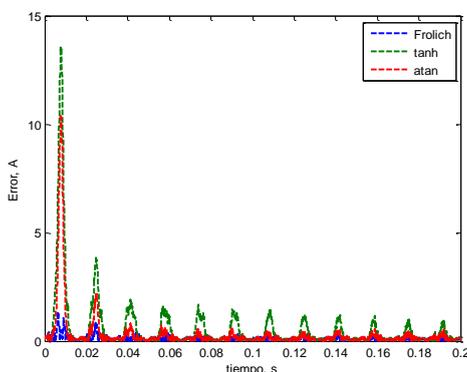


Figura 8 Errores absolutos de las funciones

Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 muestra los errores absolutos de cada función con respecto a la media de las mediciones y referenciados en la desviación estándar. Es importante notar que la función de Frolich modificada tienen un error máximo en el primer pico de 1.2 Amperes que es aproximadamente igual a la desviación estándar en ese pico. El error aproximado máximo en el resto de los picos en los siguientes 11 ciclos es de 0.2 Amperes, más abajo que la desviación estándar en las mediciones. Para la función tangente inversa se tienen un error absoluto máximo de aproximadamente 10, 2 y 1 Amperes en los primeros tres picos, respectivamente. El resto de los picos mantienen aproximadamente 0.5 Amperes de error absoluto, lo cual estaría dentro de la desviación estándar. La función tangente hiperbólica tienen un error de aproximadamente 13 y 3.8 Amperes en los dos primeros picos respectivamente. Mientras que un promedio de aproximadamente 1.2 Amperes en el resto de los picos.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una forma alternativa para representar la saturación no lineal de los transformadores. En esta forma de representación queda explícitamente la corriente de magnetización del núcleo como estado del sistema. Además, se presentaron tres funciones para representar la saturación, las cuales dependen de los coeficientes a , b y c . También, se describió una forma simple para determinar los coeficientes la cual es basada en la minimización de los residuos por mínimos cuadrados. Se debe notar que se requieren al menos tres puntos conocidos para determinar los coeficientes y entre más puntos se le proporcione al algoritmo, tanto en la parte lineal como en la no lineal, mejor ajuste de los coeficientes se obtendrá. Para el caso presentado la función Frolich modificada tiene mejor ajuste con las mediciones realizadas en el laboratorio.

El menor error absoluto que se encontró es utilizando la función de Frolich modificada, mientras que el mayor error absoluto es con la tangente hiperbólica. Principalmente los mayores errores (función tangente hiperbólica y tangente inversa) se presentan durante los primeros picos, de lo cual se asume que el ajuste no es tan bueno en la región de saturación, mientras que en la parte lineal es más consistente.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad de Colima, PRODEP y CONACYT por el apoyo recibido para llevar a cabo esta investigación.

Referencias

Cheng, C. K., Liang, T. J., Chen, J. F., Chen, S. D., & Yang, W. H. (2004). Novel approach to reducing the inrush current of a power transformer. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 151(3). pp. 289-295.

Chiesa, N., & Høidalen, H. K. (2007, September). Modeling of nonlinear and hysteretic iron-core inductors in ATP. *In EEUG Meeting 2007, European EMTP-ATP Conference*, Leon, Spain.

Cho, S. D. (2002, December). *Parameter estimation for transformer modeling* (Ph.D. dissertation). Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI, EE. UU.

Kovan, B., De Leon, F., Czarkowski, D., Zabar, Z., & Birenbaum, L. (2011, July). Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3). 1563-1570.

Martinez-Velasco, J. A. (Ed.). (2009). *Power system transients: parameter determination*. Boca Raton, FL, EE. UU.: CRC press.

Martinez-Velasco, J. A., & Mork, B. A. (2003, June). Transformer Modeling for Low Frequency Transients-The State of the Art. *In Proceedings of the IPST International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, USA.

Members, C., Imece, A. F., Durbak, D.W., Elahi, H., Kol-, S., Lux, A., . . . Tarasiewicz. (2013). Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Programs Part 2 Modeling Guidelines for Fast Front Transients. *IEEE Power & Energy Society*, pp. 5-4-5-19. *Solid State Relays Industrial Zero Switching*. (2007). Carlo Gavazzi.

Staff, E. E. (2003). *Circuitos magnéticos y transformadores*. Barcelona, Spain: Reverté.

Wright, S. J., & Nocedal, J. (1999). *Numerical Optimization*. New York, EE. UU.: Springer.

Apéndice

Se utilizó para las pruebas un transformador monofásico de laboratorio (*Lab-Volt*[®]) de 480 VA, 120/120 V, 4 A y 60 Hz. Para determinar los parámetros, se siguieron los procedimientos de (Martinez-Velasco, 2009) para las pruebas de circuito-abierto (PC-A) y corto-circuito (PC-C). Las mediciones de voltaje y corriente RMS, pérdidas de potencia activa y reactiva y factor de potencia (FP) fueron obtenidas usando un analizador de calidad de la energía "Fluke 435 Series II". La Tabla A.I presenta los resultados de la prueba estandarizada realizada en el transformador monofásico y la Tabla A.II muestra los valores obtenidos.

variable	PC-A	PC-C
$V_2(V_{RMS})$	122.5	19.11
$I_1(I_{RMS})$	0.15	4.07
FP	0.49	0.26
$P_{loss}(watts)$	9	20
$Q_{loss}(VAR)$	16	75
$S_{loss}(VA)$	18	78
a	1	1

Tabla 3 Mediciones de pruebas en el transformador

Fuente: *Elaboración propia.*

parámetros	$R_{p,s}$	$L_{p,s}$	R_m
valor	0.61035 Ω	6.0132 mH	1666.66 Ω

Tabla 4 Parámetros del transformador

Fuente: *Elaboración propia.*