

Umbral para discriminar entre corriente inrush y falla interna en un transformador de potencia

Martha N. Acosta Montalvo, Héctor Esponda Hernández,
Manuel A. Andrade Soto, Ernesto Vázquez Martínez

Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME,
Doctorado en Ingeniería Eléctrica
martha.acostamnt@uanl.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta el cálculo de un umbral que discrimina entre la corriente de energización y una falla interna en un transformador de potencia. Se forma una matriz que contiene las corrientes diferenciales de una señal de referencia y se obtienen los eigenvalores máximos, estos son utilizados para el cálculo del umbral. A partir de la matriz de corrientes diferenciales que contiene la señal de falla, se obtiene el eigenvalor dominante y se compara con el umbral, si la magnitud del eigenvalor dominante es menor al umbral se tiene una energización, de lo contrario se tiene una falla interna.

PALABRAS CLAVE

Umbral, eigenvalores, corriente inrush, transformador, protección diferencial.

ABSTRACT

This paper describes a threshold which discriminates between inrush current and internal fault in a power transformer. A matrix, which contains differential currents of a reference signal, is formed. The maximum eigenvalues of the matrix are obtained; these are used to calculate the threshold. The dominant eigenvalue is obtained from a matrix which contains differential currents of a fault signal; dominant eigenvalue is used for comparison with the threshold. If the magnitude of the eigenvalue is less than the threshold then it is an inrush current, otherwise it is an internal fault.

KEYWORDS

Threshold, eigenvalue, inrush current, transformer, differential protection.

INTRODUCCIÓN

El transformador es un dispositivo fundamental para la operación del sistema eléctrico de potencia. Cuando ocurre la energización del transformador, los dispositivos de protección pueden operar de forma incorrecta debido a la corriente inrush,¹ la cual solo es detectada por los TCs de lado primario y esta es interpretada como una falla.

La correcta discriminación entre la corriente inrush y una falla interna supone un reto para la operación correcta de los dispositivos de protección. A lo largo del tiempo, se han propuesto diferentes métodos para dar solución a dicho problema, los cuales se pueden clasificar en tres grupos. El primer grupo emplea el contenido armónico de la corriente diferencial para bloquear la protección en escenarios de energización del transformador, conexión y desconexión.²⁻³ El segundo grupo utiliza el reconocimiento de la forma de onda de la corriente diferencial.⁴⁻⁵ El tercer grupo usa las señales de corriente y tensión como entradas.⁶⁻⁷

Algunos métodos basados en el reconocimiento de la forma de onda han propuesto diversos algoritmos, en los cuales la discriminación de la corriente inrush y una falla interna se realiza mediante un umbral. Mediante el análisis modal, en⁸ se establece que para eventos de corriente inrush, el eigenvalor dominante no supera un umbral de 0.4, mientras que para una falla interna el eigenvalor dominante es mayor al umbral. En,⁴ se calcula el factor de singularidad de la forma de onda (WSF) el cual obtiene la diferencia entre la forma de onda de la corriente y una forma de onda sinusoidal, cuando ocurre una falla la forma de onda de la corriente es aproximadamente una sinusoidal y WSF tiene valores muy cercanos a cero, cuando se tiene una corriente inrush WSF tendrá un valor elevado. Si $WSF > 1$ se tiene una corriente inrush, de lo contrario se tiene una falla interna.⁹ Propone el algoritmo de correlación mejorado, en el cual la corriente durante un ciclo es reorganizada como una nueva medición. Las corrientes de falla se distinguen de la corriente inrush si el coeficiente de correlación mejorado entre el primer medio ciclo y el medio ciclo restante es mayor a un umbral. El umbral es determinado con base en el límite de corriente inrush. En,¹⁰ se estructuran dos tipos de formas de onda sinusoidales normales de acuerdo con el valor y la posición del punto máximo de corriente en la zona de no saturación. Se calculan coeficientes de correlación (CC) entre la forma de onda original y dos formas de onda sinusoidales estructuradas. En base al CC se crean dos criterios, los cuales son comparados con un umbral propuesto de 0.8; si $CC > 0.8$ se tiene una corriente inrush, de lo contrario se tiene una falla interna. En ¹¹ se calcula la función de auto-correlación (ACF) para las corrientes diferenciales, y después se calcula la desviación estándar de la ACF. Se define un criterio; el cual consiste en la diferencia entre el máximo y el mínimo de la desviación estándar de cada fase. Este resultado se compara con un umbral de 0.057; si el criterio es mayor al umbral, se tiene una corriente inrush, de lo contrario se trata de una falla interna.

En este artículo, se propone el cálculo de un umbral para la correcta discriminación de la corriente inrush y una falla interna en el transformador con base en el análisis de eigenvalores. A partir de señales de referencia, las cuales contienen información de la energización del transformador, se obtiene el máximo pico de corriente inrush. A la matriz que contiene las corrientes diferenciales se le aplica un filtro delta para remover la componente de estado estable y se normaliza. De esta matriz, se obtiene una matriz simétrica, de la cual se calcula el eigenvalor mayor, el cual es utilizado para el cálculo del umbral. Durante la operación del algoritmo, a partir de las señales que se están midiendo, se obtiene el eigenvalor dominante y la magnitud de éste es comparada con el umbral calculado anteriormente.

PRE-PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Se realiza un pre-procesamiento de las señales de corriente diferenciales, el cual consiste en la aplicación de un filtro delta con el objetivo de remover el estado estable de la señal. Debido a que la corriente inrush puede alcanzar magnitudes mayores a las de la corriente de falla, las corrientes diferenciales se normalizan con respecto al valor absoluto de la corriente diferencial máxima.⁸

Algoritmo QR

Una matriz \mathbf{A}_k puede ser descompuesta en el producto de una matriz unitaria \mathbf{Q}_k y una matriz triangular superior \mathbf{R}_k , la cual es obtenida de la multiplicación de $\mathbf{Q}_k^H \mathbf{A}_k$ donde $\mathbf{Q}_k^H = \mathbf{Q}_k^T$. \mathbf{A}_{k+1} es formada por la multiplicación de $\mathbf{R}_k \mathbf{Q}_k$ [12]. Entonces:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A} \quad (1)$$

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{Q}_k \mathbf{R}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{Q}_k^H \mathbf{A}_k \mathbf{Q}_k = \mathbf{R}_k \mathbf{Q}_k \quad (3)$$

para $k=1,2, \dots$

La ecuación (3) se puede escribir como una transformación de similaridad:

$$\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{Q}_k^H \mathbf{Q}_{k-1}^H \dots \mathbf{Q}_1^H \mathbf{A} \mathbf{Q}_1 \dots \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{Q}_k \quad (4)$$

La matriz \mathbf{A}_k tiende a una matriz triangular superior cuando $k \rightarrow \infty$ y los elementos contenidos en la diagonal son los eigenvalores de \mathbf{A} .

Umbral

Los eigenvalores de una matriz $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ simétrica son reales y no negativos denotados por $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, y los eigenvectores derechos correspondientes u_1, u_2, \dots, u_n son ortogonales.¹³

$$\mathbf{A}u_i = \lambda_i u_i \quad (5)$$

Si se tienen una matriz $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, (5) se puede reescribir como

$$\|\mathbf{B}u_i\|^2 = \lambda_i (\mathbf{B}^T \mathbf{B}) \|u_i\|^2 \quad (6)$$

donde $\|\cdot\|$ denota la norma 2 y $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ da como resultado una matriz simétrica de $n \times n$.

Aplicando la raíz cuadrada en ambos lados de (6)

$$\|\mathbf{B}u_i\| = \sqrt{\lambda_i (\mathbf{B}^T \mathbf{B})} \quad (7)$$

A partir de (7) se establece que para cada eigenvalor no nulo de la matriz generada por $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ se tiene un valor σ :

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i (\mathbf{B}^T \mathbf{B})} \quad (8)$$

el cual cumple con lo siguiente

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\lambda_{\max}}, \quad \sigma_{\min} = \sqrt{\lambda_{\min}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\min} \leq |\lambda_i| \leq \sigma_{\max} \quad (10)$$

A partir de (10), se observa que σ_{\max} y σ_{\min} proporcionan un rango de las magnitudes que pueden tomar los eigenvalores de la matriz y (10) puede ser utilizado para establecer límites en la magnitud en los eigenvalores del sistema para ciertas condiciones de operación. Establecer el límite máximo de magnitud que pueden tomar los eigenvalores de una señal sin falla sirve como referencia para identificar disturbios en la zona de protección del transformador de potencia. Dicho lo anterior, se plantea el cálculo de un umbral que permita discriminar entre la corriente inrush y una falla interna.

Se tiene una matriz A_R que contiene las corrientes diferenciales de una señal de referencia. Mediante el algoritmo QR se obtiene los eigenvalores de A_R , denotados por $\lambda_{0_1}, \lambda_{0_2}, \dots, \lambda_{0_i}$ y mediante (9) se obtiene $\sigma_{\max 1}, \sigma_{\max 2}, \dots, \sigma_{\max k}$. Una vez obtenidos los límites máximos de magnitud se calcula el umbral

$$\text{umbral} = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{\max i}}{k} \quad (11)$$

donde k representa el número de σ_{\max} obtenidos a lo largo de la señal de referencia.

Señal de Referencia

En¹⁴ se determina que para una energización en 0°, la magnitud de la corriente inrush es la máxima, mientras que al energizar en 90° se obtiene la mínima magnitud de la corriente inrush. En¹⁵ se evaluó el impacto que tiene la impedancia de la fuente en la magnitud de la corriente inrush y se determinó que, ésta es muy sensible a la impedancia de la fuente, mientras la impedancia de la fuente sea menor el pico de la corriente inrush será mayor. La relación X/R de la fuente no afecta la magnitud de la corriente inrush.

La señal de referencia debe contener el transitorio generado por la corriente inrush. Se considera la máxima corriente inrush esperada para el transformador de potencia con el fin de obtener un umbral que cumpla con la condición de discriminar entre la corriente inrush y una falla interna. Para obtener el máximo pico de corriente inrush, el ángulo de energización del transformador fue de 0° y la impedancia de la fuente es muy pequeña.

Criterio de discriminación

De (5) se observa que el eigenvalor mide la razón de cambio de la magnitud de sus eigenvectores asociados. Debido a esto se determina que la magnitud del eigenvalor dominante λ_d proporciona la mayor información de las variables de estado de la forma en la respuesta transitoria de onda.⁸

El eigenvalor dominante es el utilizado para el análisis del sistema. Se tiene una matriz que contiene las corrientes diferenciales de una señal que se está monitoreando. De esta matriz, se obtiene una matriz simétrica, de la cual se

obtiene el eigenvalor dominante mediante el algoritmo QR, y este eigenvalor dominante es comparado con el umbral calculado en (11). Para una condición de falla dentro de la zona de protección del transformador (falla interna) la magnitud del eigenvalor dominante es mayor al umbral. En cambio, para condiciones del sistema diferentes a una falla la magnitud del eigenvalor dominante es menor al umbral:

$$\lambda_d > \text{umbral} \tag{12}$$

$$\lambda_d < \text{umbral} \tag{13}$$

Sistema de prueba

El sistema de prueba utilizado para la evaluación del umbral se muestra en la figura 1, el cual se compone de un transformador de potencia conexión delta-estrella aterrizada, equivalente Thévenin en ambos lados del transformador; una línea de transmisión modelo π y una carga en el lado secundario del transformador; el sistema opera a 60 Hz. Los parámetros del sistema son obtenidos de,⁸ en la tabla I se describen los parámetros de los generadores y la carga; en la tabla II se describen los parámetros de la línea de transmisión y en la tabla III se describen los parámetros del transformador de potencia.

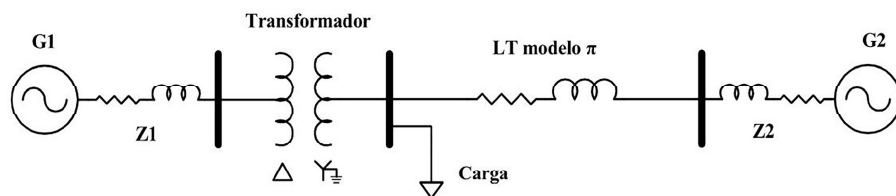


Fig.1. Sistema de prueba.

Tabla. I. Parámetros de los generadores y carga.

Parámetro	Unidad	G1	G2	Carga
Tensión línea-línea	kV	115	13.8	13.8
Frecuencia	Hz	60	60	60
Potencia	MVA	90	3	80.06
Resistencia serie	Ω	15	10	--
Resistencia paralelo	Ω	1	1	--
Inductancias paralelo	H	0.1	0.046	--
Ángulo	Grados	0	20	25.925

Tabla. II. Parámetros del transformador de potencia.

Parámetros	Unidad	Transformador trifásico de dos devanados
Tensión en devanado	kV	115/13.8
Frecuencia	Hz	60
Potencia	MVA	100
Conexión	--	$\Delta - Y$ aterrizado

Las simulaciones se realizaron a una razón de 64 muestras por ciclo lo cual equivale a una frecuencia de muestreo $f_s = 7.68$ kHz.

Tabla. III. Parámetros de la línea de transmisión.

Parámetros	Unidad	Línea de Transmisión
Resistencia secuencia positiva	Ω/km	0.01273
Resistencia secuencia cero	Ω/km	0.3864
Inductancia secuencia positiva	H/km	09337e-3
Inductancia secuencia cero	H/km	4.1264e-3
Capacitancia secuencia positiva	F/km	1274e-9
Capacitancia secuencia cero	F/km	7.751e-9
Longitud	km	90

En la tabla IV se describen los parámetros de los transformadores de corriente utilizados en el esquema de protección diferencial del transformador.

Tabla. IV. Parámetros de los transformadores de corriente.

Característica	Unidad	T C l a d o primario	T C l a d o secundario
Relación de Transformación	--	500/5	4000/5
Resistencia secundario	Ω	0.5	0.5
Inductancia secundario	mH	0.8	0.8
Área	m^2	6.5	6.5
Longitud de la trayectoria magnética	m	0.5	0.5
Flujo remanente	T	0	0
Resistencia burden	Ω	2	0.5
Inductancia burden	mH	0.8	0.8

En la tabla V se resume el criterio de discriminación que se estableció en (12) y (13).

Para la condición de energización del transformador, el umbral calculado mediante (11) es de 0.5 para el sistema de prueba de la figura 1.

Tabla. V. Criterio de discriminación.

Evento	Magnitud del Eigenvalor Dominante
Corriente Inrush Sobreexcitación	[0, umbral]
Falla Interna	[umbral, ∞]

RESULTADOS

Con el fin de evaluar los criterios establecidos en la tabla V, se realizan simulaciones para diferentes condiciones de operación del sistema, las cuales se presentan a continuación.

Energización

El instante de energización y la curva de saturación del transformador impactan directamente la forma de onda y la magnitud de la corriente inrush. Para probar el umbral calculado, en la figura 2a) y 2b) se muestra la energización con un ángulo de 0°, 90° y 180°, respectivamente, con respecto a la señal de tensión. Se observa que para estas condiciones la magnitud del eigenvalor dominante no supera el umbral calculado. En la figura 2c) se muestra la energización cuando se ha realizado un cambio en la curva de saturación, para esta condición la magnitud del eigenvalor dominante es menor a la magnitud del umbral calculado. En todos los casos mostrados en la figura 2 se cumple con el criterio establecido en (13), discriminando correctamente la condición de energización respecto a una falla interna.

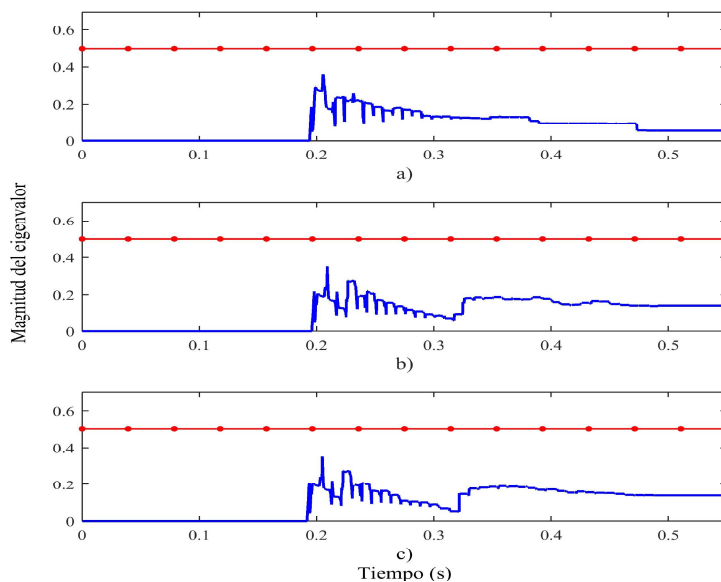


Fig. 2. Energización del transformador a) a 90°, b) a 180°, y c) empleando TCs con curva de saturación modificada.

Sobreexcitación

El transformador de potencia es propenso a condiciones de sobreexcitación debido a la caída de frecuencia del sistema y al aumento de la tensión aplicada. El transformador tolera máximo 110% de sobreexcitación con respecto a los valores nominales, esta sobreexcitación puede producir un incremento de la corriente inrush. Debido a esto se consideró probar el umbral calculado cuando el transformador se encuentra bajo esta condición, se realizó la energización del transformador y después se simuló una sobreexcitación debido a un 10% de la caída de frecuencia y un aumento de tensión del 50%. La figura 3 muestra el comportamiento del eigenvalor dominante ante la condición de sobreexcitación y se observa claramente que la magnitud del eigenvalor no supera el umbral calculado, cumpliéndose con el criterio en (13), i. e. no existe falla interna.

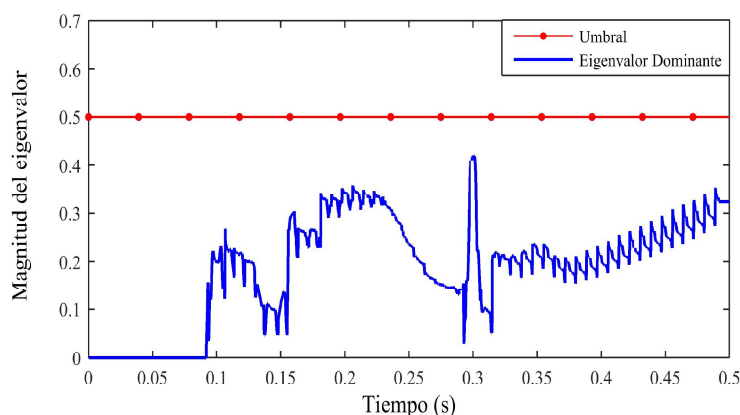


Fig.3. Sobreexcitación después de la energización.

Falla interna

Las fallas dentro de la zona de protección del transformador deben ser detectadas correctamente y ser liberadas en el menor tiempo posible, ya que el transformador puede sufrir severos daños que repercuten en su tiempo de vida. Para probar el umbral calculado, se introduce una falla monofásica dentro de la zona de protección del relevador después de la energización. En la figura 4 se muestra el comportamiento del eigenvalor dominante ante dicha falla. La condición de falla interna es detectada correctamente, ya que la magnitud del eigenvalor dominante es mayor umbral al calculado. Para esta condición del sistema se cumple el criterio establecido en (12) y se inicia la operación de la protección diferencial.

Falla interna con saturación en los TCs

La forma de onda en el secundario de los TCs es distorsionada debido a la saturación del transformador de instrumento. La saturación en los TCs es causada por la presencia de fallas, los dispositivos de protección pueden tener retardo en la operación o simplemente tener una mala operación debido a esta condición. El umbral propuesto debe identificar la condición de falla aún con la saturación de los TCs. En la figura 5 se muestra el comportamiento del eigenvalor dominante ante la presencia de una falla interna monofásica, la cual causa la saturación de

los TCs. La magnitud del eigenvalor dominante ante la condición de falla es mayor a la del umbral calculado y se cumple el criterio establecido en (12), lo que indica una correcta discriminación de la falla interna.

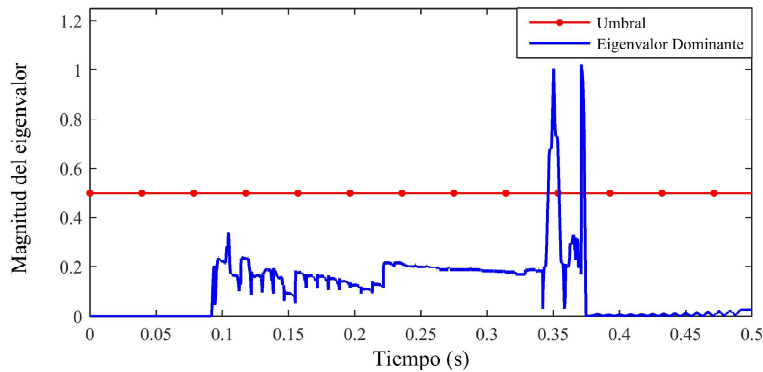


Fig. 4. Falla interna después de la energización.

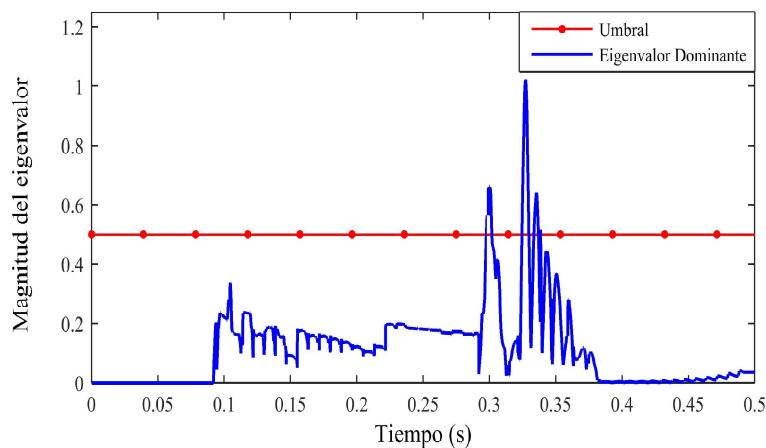


Fig. 5. Falla interna con saturación de los TCs después de la energización.

CONCLUSIÓN

Se calculó un umbral para la discriminación de una falla interna y la corriente inrush, el cual depende de una señal de referencia, la cual es obtenida a partir de la energización del transformador en un ángulo de 0° y la impedancia es muy pequeña, puesto que con estas condiciones se obtiene el caso más crítico de corriente inrush. El eigenvalor dominante del sistema fue utilizado para establecer los criterios de discriminación, obteniéndose un umbral de 0.5 de acuerdo a la condición base de energización. Se realizaron simulaciones con diferentes escenarios de operación para analizar y verificar la confiabilidad del umbral calculado.

Puede verse (figura 4 y figura 5) que el umbral propuesto discrimina correctamente las fallas internas y se elimina la operación incorrecta de los dispositivos de protección ante condiciones de energización del transformador, sobreexcitación (figura 2 y figura 3), aun cuando se presente saturación de los TCs.

REFERENCIAS

1. L.-C. Wu, C.-W. Liu, S.-E. Chien, and C.-S. Chen, "The Effect of Inrush Current on Transformer Protection," in 2006 38th North American Power Symposium. IEEE, sep 2006, pp. 449-456.
2. J. Sykes and I. Morrison, "A Proposed Method of Harmonic Restraint Differential Protecting of Transformers by Digital Computer," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, no. 3, pp. 1266-1272, may 1972.
3. A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and H. Altuve, "A current-based solution for transformer differential protection: II. Relay description and evaluation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 886-893, oct 2002.
4. J. Ma, Z. Wang, and J. Wu, "A novel method for discrimination of internal faults and inrush currents by using waveform singularity factor," in 2010 Conference Proceedings IPEC. IEEE, oct 2010, pp. 1035-1039.
5. R. J. N. Alencar, U. H. Bezerra, and A. M. D. Ferreira, "A method to identify inrush currents in power transformers protection based on the differential current gradient," Electric Power Systems Research vol. 111, pp. 78-84, 2014.
6. A. G. Phadke and J. S. Thorp, "A New Computer-Based Flux-Restrained Current-Differential Relay for Power Transformer Protection," IEEE Power Engineering Review, vol. PER-3, no. 11, pp. 3624-3629, nov 1983.
7. G. Baoming, A. DeAlmeida, Z. Qionglin, and W. Xiangheng, "An Equivalent Instantaneous Inductance-Based Technique for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 4, pp. 2473 - 2482, oct 2005.
8. H. Esponda Hernández, "Identificación de la corriente inrush en un transformador de potencia utilizando análisis modal," Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
9. Xiang-ning Liu, Pei Liu, and O. Malik, "Studies for identification of the inrush based on improved correlation algorithm," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 4, pp. 901 - 907, oct 2002.
10. D. Q. Bi, X. A. Zhang, H. H. Yang, G. W. Yu, X. H. Wang, and W. J. Wang, "Correlation Analysis of Waveforms in Nonsaturation Zone-Based Method to Identify the Magnetizing Inrush in Transformer," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1380 - 1385, jul 2007.
11. H. Samet, T. Ghanbari, and M. Ahmadi, "An Autocorrelation Function Based Technique for Discrimination of Internal Fault and Magnetizing Inrush Current in Power Transformers," Electric Power Components and Systems, vol. 43, no. 4, pp. 399-411, feb 2015.
12. J. H. Wilkinson, The algebraic eigenvalue problem. Clarendon Press, 1988.
13. R. L. Burden, J. D. Faires, Brooks/Cole Publishing Company., and Cengage Learning (Firm), Numerical analysis. Brooks/Cole, Cengage Learning, 2011.

- 14.R. Moon, and R. K. Dhattrak, "A Study of Effect of Magnetizing Inrush Current on Different Ratings Of Transformers," *International Journal of Advanced Research in Electrical*, vol. 3, no. 4, pp. 9021-927, 2014.
- 15.S. Jazebi, F. de León, and N. Wu, "Enhanced Analytical Method for the Calculation of the Maximum Inrush Currents of Single-Phase Power Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pp. 2590 – 2599, dec 2015.

