

Efectos de la Ferrorresonancia en la Energización de Transformadores

Ferromagnetic Resonance Effects during Transformer Energization

G. J. Correa-Henao¹

Recibido: 17 de junio de 2015

Aceptado: 15 de agosto de 2015

Resumen

En esta contribución técnica se presentan algunos casos de estudio sobre fenómeno de ferrorresonancia, el cual se relaciona directamente con la explicación de muchos problemas debidos a las operaciones de cierre y apertura monofásica en transformadores eléctricos, dentro de los circuitos de distribución de energía eléctrica, tomando parámetros usuales en la configuración de circuitos, de conformidad con la normatividad requerida por la empresa EPM para la atención de clientes residenciales en el Departamento de Antioquia (Colombia). De esta manera, se conducen algunas explicaciones de diferentes problemáticas debidas a las operaciones de cierre y apertura monofásica en transformadores.

Palabras clave: Ferrorresonancia; Armónicos; Transformadores..

Abstract

This technical contribution is based upon the study of some case studies on the phenomenon of ferromagnetic resonance. It relates to the explanation of many problems

¹ PhD en Ingeniería eléctrica. Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia. gabriel.correahe@amigo.edu.co

due to shut-off and opening maneuvers on single-phase transformers, taking into account conventional circuit configuration parameters that conforms the regulations required by EPM standards for residential customers in the Department of Antioquia (Colombia). Thus, some explanations are conducted on various problems due to the shutting-off and opening on single-phase transformers.

Keywords: Ferromagnetic Resonance; Harmonics; Transformers.

1. Introducción

El estudio del fenómeno de ferrorresonancia se relaciona directamente con la explicación de muchos problemas debidos a las operaciones de cierre y apertura monofásica en transformadores [1].

La *Ferrorresonancia* puede ocurrir en muchas clases de circuitos: circuitos que contienen cables largos, cables cortos, y sistemas sin cables, líneas largas aéreas, pequeñas piezas aisladas en subestaciones, bancos capacitivos (Que pueden estar o no aterrizados), transformadores pequeños de distribución, transformadores de potencial (Con neutros aterrizados o no) [2] De conformidad con la normatividad del sector eléctrico (específicamente estándar ANSI/IEEE C37.100 [3]), la ferrorresonancia se define como una condición eléctrica asociada a la saturación de un elemento electromagnético, como por ejemplo un transformador, que entra en condición de resonancia debido a la capacitancia existente en el mismo. Debido a este fenómeno, comúnmente los daños inexplicables en los equipos debidos a sobrevoltajes son atribuidos a la ferrorresonancia [4] FHL-factor, and loss measurement techniques. Extensive application of power electronics and other nonlinear components and loads creates single-time and periodic events that could lead to serious problems within power system networks and its components. Transient models are used for transformer simulation during turning-on, faults, and other types of disturbances. They are based on a system of time-dependent differential equations usually solved by numerical algorithms. Transient models require a considerable amount of computing time. Steady-state models mostly use phasor analysis in the frequency domain to simulate transformer behavior, and require less computing times than transient models. Several transformer harmonic models in the time domain and/or frequency domain are introduced. Important power quality problems related to transformers such as ferroresonance and geomagnetically induced currents (GICs).

En esta contribución técnica se aborda la simulación de una problemática real debida a la ferorrresonancia no lineal entre transformadores de potencial y la capacitancia asociada a los interruptores de los circuitos. En estos circuitos se caracteriza la existencia de sobretensiones y/o sobrecorrientes en formas de onda irregulares, las cuales están relacionadas con la excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia en serie, que pueden llevar a daños en los bujes de los transformadores, con las consecuentes fallas en el aislamiento [3].

El problema de la ferorrresonancia tanto para un circuito de distribución, como para un sistema de potencia por lo general se enfoca de dos maneras: El circuito y la no-linealidad de la inductancia (Para un transformador, se toma la inductancia de magnetización) deben simplificarse de modo que los desarrollos matemáticos sean razonablemente sencillos. En los sistemas de distribución el fenómeno es común debido a condiciones de desbalanceo de fases, por ejemplo, cierre o apertura monopolar de un circuito trifásico [5]

En la realización de esta contribución técnica se utiliza la herramienta informática ATP-Draw para proceder a simular los modelos de ferorrresonancia [6], ajustando adecuadamente los parámetros para simulación del fenómenos electromagnético.

Esta contribución técnica consiste en tres importantes secciones. Se presenta el marco teórico en torno a las definiciones referidas al fenómeno de la ferorrresonancia, así como la estrategia de construcción de modelos de simulación en circuitos de distribución con transformadores monofásicos y transformadores de potencial (utilizados en medidas). En la segunda parte del artículo se presentan los resultados proporcionados por los modelos de simulación, sus diagnósticos y análisis aplicados a transformadores de potencial en redes de distribución de energía eléctrica de media tensión (13. kV-44kV), según la normatividad de EPM vigente [7]. Lo anterior conduce a la presentación de algunas conclusiones en la última parte del artículo.

2. Estudio Teórico del Problema de Ferorrresonancia en Transformadores Monofásicos

El diccionario de términos contenidos en el estándar ANSI/IEEE C37.100 de 1984 define la *Ferorrresonancia* como “Un fenómeno usualmente caracterizado por sobrevoltajes y una muy irregular forma de onda, asociado con la

excitación de una o más inductancias saturables a través de una capacitancia en serie con la inductancia” [3].

En muchas ocasiones, las fallas de transformadores y cables que se reportan como problemas de fábrica por el aislamiento, en realidad pueden deberse al fenómeno de ferrorresonancia. Las sobretensiones que se pueden alcanzar llegan hasta 6 p.u., dependiendo de la relación X_c/X_M , la curva de saturación, el tiempo de interrupción o energización del sistema, por mencionar sólo algunos de los factores que influyen en el fenómeno [8].

La resonancia puede ocurrir en cualquier circuito que contenga una inductancia (L), una capacitancia (C) constantes que hagan que la reactancia inductiva (ωL) sea igual a la reactancia capacitiva ($1/\omega C$). El sistema oscila porque el circuito L y C intercambian energía entre sí en el circuito LC . Como L y C son constantes, entonces la frecuencia de resonancia debe ser: $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ [4],[9]

En un sistema de distribución no se tiene una variación sensible de la frecuencia; sin embargo, los otros dos parámetros sí pueden variar considerablemente debido a las distancias, tipo de construcción de la red, tipo de transformadores, o bien, debido al sistema (Aéreo o subterráneo).

El fenómeno de la ferrorresonancia puede manifestarse de dos maneras: **Ferrorresonancia Serie** y **Ferrorresonancia Paralela**. Dichos circuitos se ilustran en la figura 1 [9].

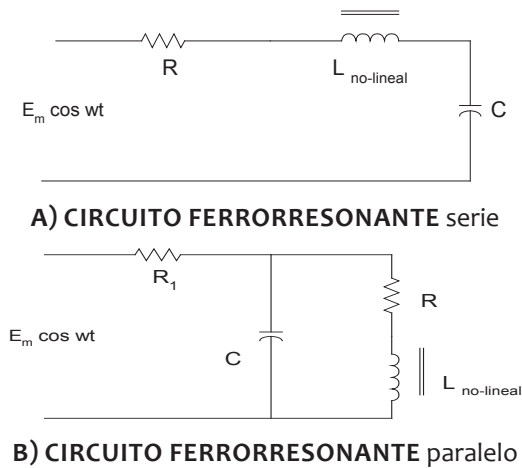


FIGURA 1. CONFIGURACIÓN DE CIRCUITOS DE FERRORRESONANCIA MAGNÉTICA (SERIE Y PARALELO)

2.1. Descripción del Fenómeno de Resonancia en un Circuito RLC

El fenómeno de ferorresonancia tiene semejanza con las condiciones de resonancia que se pueden presentar en un circuito **eléctrico lineal serie RLC**, en que se suponen constantes sus parámetros.

Si la conexión se realiza en paralelo, ambos elementos tendrían el mismo valor del voltaje aplicados y las corrientes a través de cada uno de ellos, así como la proporcionada por la fuente, se ven notoriamente disminuidas.

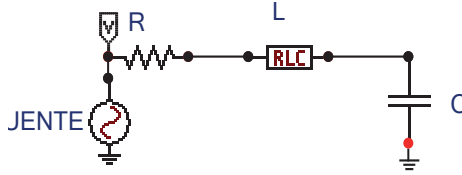
El caso más crítico ocurre cuando los valores óhmicos de la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva coinciden en un circuito serie (Es decir, $X_L/X_C = 1$); en este caso la corriente queda limitada tan sólo por la resistencia, puesto que las reactancias inductiva y capacitiva se cancelan por ser de signo contrario; si se considera que la resistencia corresponde al efecto resistivo de los elementos del circuito, entonces su valor será pequeño, propiciando que las corrientes aumenten considerablemente ^[10]. Esto traerá como consecuencia que los potenciales de los elementos del circuito sobrepasen los valores normales que tendrían si se hubiesen conectado en otras condiciones o en diferentes combinaciones. Esta forma de operación es conocida comúnmente como “resonancia”.

En el circuito serie de la figura 1-a, se cumple la siguiente ecuación:

$$V_{\text{Fuente}} = R + V_L + V_C = R + j \cdot I(X_L - X_C)$$

Cuando $X_C = X_L$, la corriente incrementa su magnitud y sólo se limita por la resistencia R. Es decir, $I = V_{\text{Fuente}} \div R$. Durante la ferorresonancia, el voltaje del sistema V_{Fuente} permanece inalterado. Sin embargo, tanto V_L y V_C se incrementan y se oponen entre sí (Como se ilustra en la figura 2). Estos altos voltajes pueden dañar el equipo.

La figura 2 ilustra el circuiro serie resonante para simulación en ATP, el cual da una idea de cómo responde el voltaje de un circuito serie RLC cuando se presenta resonancia. En la propuesta de estudio de caso, se toman los parámetros L y C como lineales.



$$V_{fuente} = V_{LL} \sqrt{2} \times \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$V_{LL} = 240V \text{ (Voltaje Trafo } 1\phi \text{ distribución)}$$

$$f = 60\text{Hz}$$

Como $X_L = X_C$, entonces

$$L = 100\text{mH} ; C = 70.3586\mu\text{F} ; R = 1\Omega$$

FIGURA 2. UN CIRCUITO SERIE RLC RESONANTE, CON ELEMENTOS LINEALES

Como resultado, se puede apreciar que el voltaje en la inductancia lineal sigue al voltaje en el capacitor, según se observa en la figura 3. El efecto de la resonancia es que el voltaje en dichos elementos aumenta infinitamente, y sólo es limitado por la resistencia del circuito.

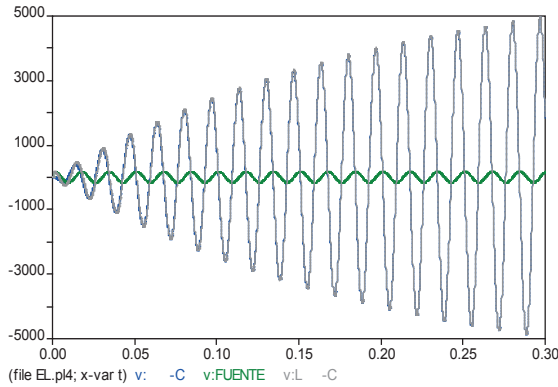


FIGURA 3. RESPUESTA DE VOLTAJE EN UN CIRCUITO RLC RESONANTE SERIE (L Y C SON LINEALES)

La Ferrorresonancia es un caso especial de la resonancia serie, en la cual X_L es un parámetro No-Lineal (Como en la figura 1a), en tanto que X_C permanece como parámetro lineal. La no linealidad es función tanto de la corriente como de la frecuencia.

2.1.1. Ferroresonancia Serie

Corresponde al fenómeno que ocurre en la configuración de la figura 1-a. Dicha configuración se emplea en la configuración radial de los sistemas de distribución de electricidad, en transformadores de configuración Y aterrizada en el primario. En varios artículos [2], [5], [8], [10]-[13] se han planteado fórmulas para determinar la longitud crítica que da inicio a la ferroresonancia, por lo que es bueno mencionar que dichas fórmulas solo corresponden a ese caso particular. La ferroresonancia, según se mencionó anteriormente depende también de las pérdidas o carga del transformador y las condiciones iniciales.

2.1.2. Ferroresonancia Paralela

Corresponde al fenómeno que ocurre en la configuración de la figura 1-b. Es de muy rara ocurrencia y su análisis corresponde más a un tratamiento teórico de casos monofásicos que a alguna situación real presentada

2.1.3. Curva de Resonancia

Para comprender el efecto de la frecuencia resonante y su relación con los parámetros del circuito, entonces se procede a visualizar sus efectos [14]. Se toma como referencia el circuito de la figura 1-a.

Si a un circuito compuesto un elemento resistivo R, uno inductivo L y uno capacitivo C en serie se le aplica una tensión alterna de frecuencia variable y se toman los valores de la intensidad y los correspondientes de la impedancia para cada valor de frecuencia considerado, la gráfica de dichos valores sobre un par de ejes cartesianos permite determinar la denominada *Curva de Resonancia*.

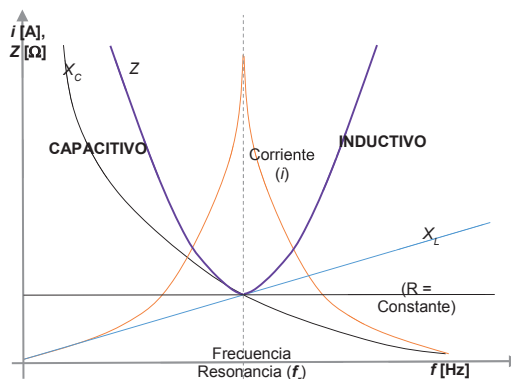


FIGURA 4. CURVA DE RESONANCIA PARA UN CIRCUITO SERIE RLC [15]

En la figura 4. a medida que el valor de la frecuencia variable se acerca al valor de la resonancia la corriente “ i ” aumenta, mientras la impedancia “ Z ” disminuye. Alcanzada la frecuencia de resonancia “ f_r ” la corriente “ i ” del circuito adquiere su máximo valor, al mismo tiempo que la impedancia “ Z ” tiene su mínimo valor; es decir: $Z = R$ (Nótese cómo en la figura 4 la curva violeta de “ Z ” coincide en su punto más bajo con la recta de “ R ”). Para frecuencias menores y mayores a la “ f_r ” el circuito tiene comportamiento capacitivo e inductivo respectivamente [13].

Como se ha informado anteriormente, el fenómeno de ferorresonancia tiene semejanza con las condiciones de resonancia que se pueden presentar en el circuito serie RLC, con parámetros constantes. En un circuito de distribución real la inductancia (Que desempeña el papel más importante en el fenómeno de la ferorresonancia) corresponde a la reactancia inductiva del transformador, representada por su núcleo, por cuyas características de saturación es *No-Lineal*, es decir, aunque la tensión que se aplique sea senoidal, la corriente de magnetización que aparece no lo es (Usualmente, contiene el 3° armónico) [4]. Por tanto, no es aplicable la teoría de los fasores, sino el estudio como fenómeno electromagnético de ferorresonancia [2].

2.1.4. Clasificación del Comportamiento de la Ferroresonancia en Transformadores

Como se indicó anteriormente, la ferroresonancia es un fenómeno oscilatorio estacionario no lineal, que se presenta en un sistema eléctrico AC debido a la interacción entre un capacitor y un inductor con núcleo ferromagnético saturable. En la ferroresonancia siempre se encuentran mínimamente involucrados: una fuente de tensión alterna, una capacitancia: C, un transformador o una inductancia con núcleo ferromagnético saturable, una carga resistiva baja [9]. Las formas de onda producto de simulaciones, experimentos realizados y casos ocurridos, han permitido determinar que existen cuatro tipos de ferroresonancia: fundamental, subarmónica, cuasiperiódica y caótica [1], las cuales están ligadas a los comportamientos de los fenómenos electromagnéticos en sistemas no lineales.

Las formas de onda producto de simulaciones, experimentos realizados y casos ocurridos, han permitido determinar que existen cuatro tipos de ferroresonancia: fundamental, subarmónica, cuasiperiódica y caótica. Las mismas que están ligadas con los comportamientos de los sistemas dinámicos no lineales [1],[9].

- **Ferroresonancia Fundamental:** En este tipo de ferroresonancia las ondas de tensión y corriente son periódicas, con igual periodo (T) que la onda del generador y usualmente con gran contenido armónico [9].
- **Ferroresonancia Subarmónica:** Las formas onda también son periódicas, pero en este caso, de un periodo que es múltiplo entero del periodo de la onda del generador, es decir, con componentes armónicas.
- **Ferroresonancia Cuasiperiódica:** En este tipo de comportamiento, las señales de tensión y corriente ya no son periódicas. Si se realizar un análisis de Fourier se encontraría un espectro discontinuo presentando dos frecuencias dominantes con sus correspondientes armónicas; la relación entre dichas frecuencias es un número real irracional [9].
- **Ferroresonancia Caótica:** Este tipo de comportamiento es explicado en [2], en cuyo caso, se apreciaría un espectro de Fourier se presenta continuo para todas las frecuencias, con “atractores extraños” [11].

2.2. Fenómeno en el Transformador de Potencial

Para comprender con claridad las consecuencias de la saturación, supóngase que se desea ver cómo es la corriente que circula por un transformador operando en vacío. Cuando no hay carga en el transformador, la única corriente que circula por las bobinas es la de excitación [5]. La curva de magnetización de un transformador de potencial se ilustra en la figura 5 [15]:

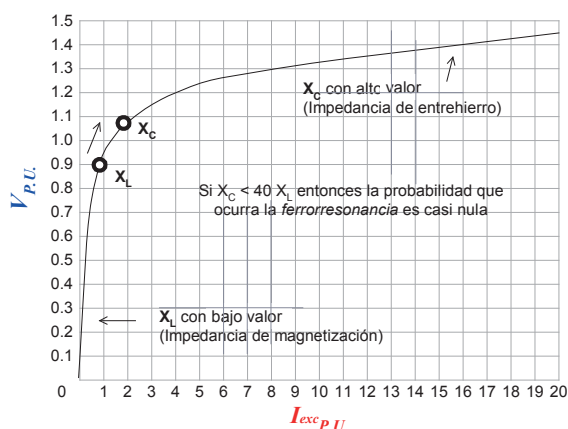


FIGURA 5. CURVA APROXIMADA DE MAGNETIZACIÓN PARA UN TRANSFORMADOR DE POTENCIAL [15]

Ahora bien, el objetivo es determinar los puntos de operación del circuito. Para ello se recurre nuevamente al circuito de la figura 1a, despreciando la resistencia y dejando el parámetro C constante. Las características de voltaje de operación se pueden representar como una línea paralela a la de la capacitancia en serie, tal como se ilustra en la figura 6 [15].

Razones económicas referentes al aprovechamiento del material ferromagnético han suscitado que los transformadores se diseñen para trabajar alrededor del punto de saturación, el cual se encuentra en la rodilla de la curva de voltaje contra corriente (figura 6), indicando que cualquier exceso apreciable de voltaje es capaz de saturar al transformador provocando aumentos en los niveles de corriente y deformaciones en las ondas de corriente y de voltaje [16].

Si durante la operación normal X_c es más baja que X_L y si por alguna razón, el voltaje se incrementa, entonces es posible que a cierto nivel de voltaje se obtenga $X_c = X_L$. Se forma entonces un circuito serie resonante y comienza entonces el fenómeno de *Ferrorresonancia*. En este caso, el voltaje del sistema permanece sin cambios, en tanto que V_L y V_C se incrementan significativamente. Debido a que X_L es no lineal, entonces las curvas de voltaje son muy distorsionadas.

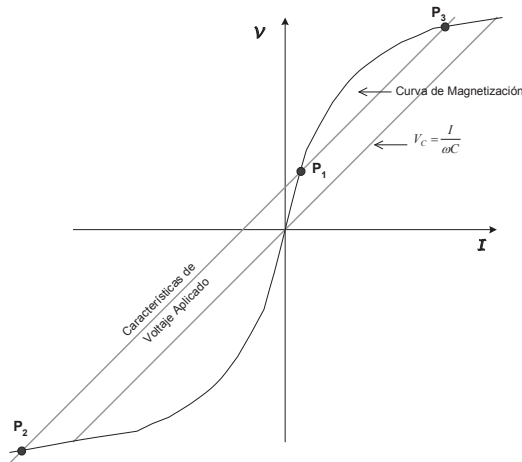


FIGURA 6. GRÁFICA PARA EL ANÁLISIS DE UN CIRCUITO FERRORRESONANTE [15]

Dependiendo de la magnitud relativa de la capacitancia en serie con respecto a la inductancia no lineal y la magnitud de la tensión aplicada, éste puede cortar a la curva de magnetización en uno, dos, o tres puntos (P_1, P_2, P_3).^[15]

La aplicación de este método gráfico al sistema monofásico no lineal ha definido tres posibles soluciones e introducido el concepto de Ferromagnética. Un breve análisis cualitativo de estos puntos de operación permite visualizar en qué puntos de operación se podrá lograr una condición de estado estable, es decir, en qué puntos de operación se puede encontrar trabajando al circuito.

Los puntos P_1 y P_2 son de operación estable, sin embargo, el P_3 no lo es. Estos dos posibles puntos de operación se traducen en inestabilidad, lo que se refleja en una oscilación permanente del voltaje de operación.

En el punto de operación P_1 el voltaje mayor aparece a través de la inductancia y es igual a la suma aritmética de la tensión aplicada más el voltaje a través de la capacitancia (Se asumen pérdidas despreciables). En el punto de operación P_2 , la tensión mayor se da a través de la capacitancia y es igual a la suma de la tensión aplicada y el voltaje a través de la inductancia. Para un valor dado de la capacitancia en serie, este punto de operación da por resultado un voltaje considerablemente mayor que el punto de operación P_1 , siendo precisamente éste el que por lo regular se refiere como operación ferromagnética^{[15], [17]}.

Si el voltaje que se aplica se incrementa gradualmente a un circuito ferromagnético cuyas características permitan cortar la curva en tres puntos, el circuito operará inicialmente en la región del punto P_1 . Sin embargo, a medida que la tensión se incrementa y las características de la tensión aplicada se vuelven tangenciales a la curva de magnetización, entonces el punto de operación salta bruscamente de P_1 al de operación ferromagnética P_3 .

Como nota interesante, vale la pena informar que en pruebas efectuadas en modelos, se ha demostrado que si el voltaje se conecta directamente a un valor fijo dado en vez de que los incrementos sean graduales, el voltaje aplicado que se requiere para hacer saltar al punto de operación P_3 (Es decir, de P_1 a P_3), es mucho menor que cuando el incremento de voltaje es paulatino.

No es recomendable trabajar con valores de flujo superiores al flujo de saturación para no se obligue a la corriente a crecer abruptamente y así evitar los sobrecalentamientos que este efecto puede producir [7].

La no linealidad en el núcleo de los transformadores causa, bajo ciertas conexiones, que se pueda combinar la saturación magnética con efectos resonantes dando lugar al fenómeno de Ferrorresonancia. La primera consecuencia que origina la saturación de transformadores es la deformación de la forma de onda de la corriente de excitación, incrementando excesivamente los valores máximos de ésta. Si existe deformación en la forma de onda de corriente, entonces también las ondas de voltaje de los elementos del circuito “LC-serie” se alteran. Dado que la fuente de alimentación es parte de un sistema muy sólido, su voltaje permanece constante en forma, frecuencia y magnitud independientemente de lo que ocurra en el circuito.

Los transformadores de potencia y de potencial se diseñan para que operen cerca del punto en el codo de la curva de magnetización. Por esa razón, X_L tiene un valor alto para el núcleo no saturado y un valor bajo cuando el núcleo se satura [7].

3. Estudio de la Problemática por Ferrorresonancia en Sistemas Eléctricos de Distribución de Energía Eléctrica

Como se ha explicado en la Sección II, en los transformadores de medida, el fenómeno de ferrorresonancia tiene la consecuencia de manifestarse una oscilación permanente del voltaje de operación. Adicionalmente, la impedancia de cortocircuito de estos transformadores se ve sometida a continuos cambios. Esto se explica debido a que la inductancia del mismo es susceptible de perturbaciones a consecuencia de los cambios en la relación ϕ/I en la curva de magnetización del transformador de potencial [1].

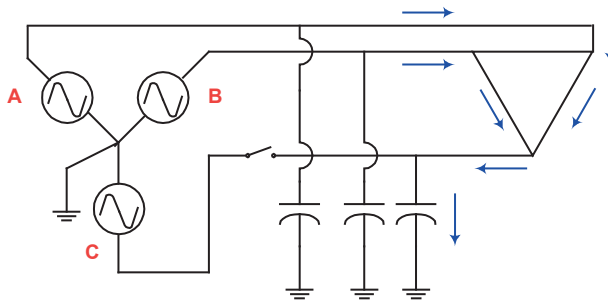
Los equipos eléctricos que tienen devanados enrollados en núcleos contruidos con material ferromagnético, tienen el problema de que este material se satura si se excede un cierto nivel de flujo circulando por el núcleo; tal como se mostró con anterioridad [18]. Debido a esta no linealidad, la relación existente entre el voltaje y la corriente presenta una característica en la cual la saturación estará dada de acuerdo al nivel de voltaje aplicado a las terminales de los devanados; lo cual se debe a que este voltaje es proporcional al

flujo. Esta no linealidad produce complicaciones muy interesantes en el análisis del circuito “LC-serie” y es este el caso en que un circuito puede operar en *Ferorresonancia*.

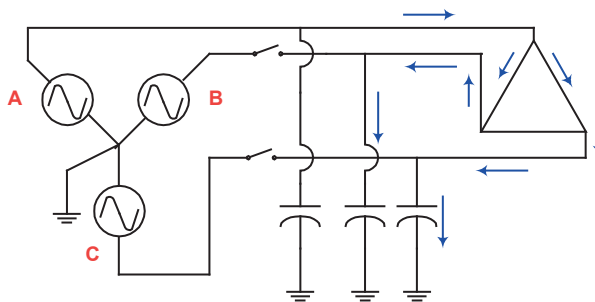
3.1. Ferorresonancia en Sistemas 3φ aislados en Δ

En sistemas trifásicos es más factible que se presente una conexión donde pueda ocurrir el fenómeno de *Ferorresonancia*.

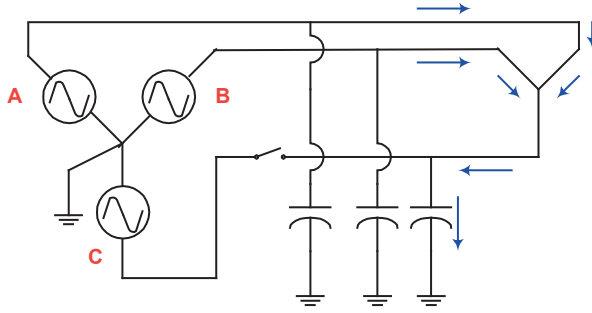
El problema sobreviene cuando se desconectan uno o dos de los conductores que alimentan a un banco de transformadores trifásicos no aterrizado y existe efecto capacitivo de los alimentadores con un valor adecuado para producir el fenómeno.



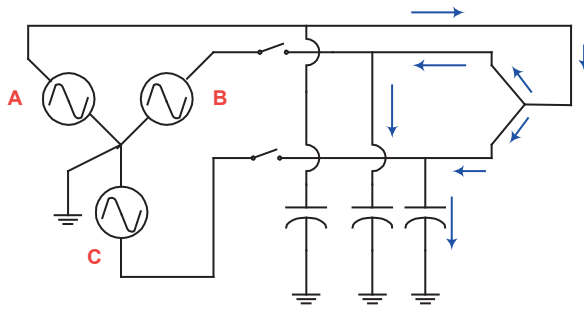
7.A. CONEXIÓN Δ, CON FASE C ABIERTA



7.B. CONEXIÓN Δ, CON FASES B Y C ABIERTAS



7.C. CONEXIÓN Y, CON FASE C ABIERTA



7.D. CONEXIÓN Y, CON FASES B Y C ABIERTA FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DE TRAYECTORIAS LC-SERIE CUANDO SE ABREN INTERRUPTORES^[14]

Según se ha mencionado previamente, la Ferrorresonancia se presenta cuando existe una trayectoria “LC-serie” no lineal y se tiene cierta combinación de los parámetros del circuito ^[17]. El banco de transformadores puede constar de tres unidades monofásicas o un solo transformador trifásico, con cualquier conexión en que no se aterrice el primario. (Como es el caso del Sistema en Δ aislado a 44kV) ^[7]

Para localizar visualmente estas trayectorias, la figura 7 muestra transformadores cuyo primario se conecta en Δ (fig. 7-a y 7-b), y en Y (figs. 7-c y 7-d) señalando el camino de la corriente cuando se abre una fase (fig. 7-a y 7-c) y cuando se desconectan dos fases de la fuente (fig. 7-b y 7-d)^[14]

TABLA 1: VALORES DE CAPACITANCIA (EN NF) EN TRANSFORMADORES, QUE SE ASOCIAN A FERRORESONANCIA ^[11]

Capacidad del Transformador (kVA)		Voltaje del Sistema (kV)			
Monofásico	Trifásico	8.32/4.8	12.5/7.2 - 13.8/8	25/14.4 - 27.8/16	40/23.1 - 48/27.7
< 5	15	72	26	16	3
10	30	119	43	11	5
-	50	239	86	21	9
25	75	358	129	32	15
-	100	477	172	43	20
50	150	719	258	64	25
75	225	1070	387	97	40
100	300	1432	516	129	50
167	500	2390	859	215	98
250	750	3580	1290	322	120
-	1000	4770	1720	430	190
-	1500	7190	2580	645	370
-	2000	9550	3440	859	480

En la figura 7 no se incluye el secundario de los transformadores por dos causas principales:

- Existe mayor posibilidad de que un transformador opere en *Ferorresonancia* cuando la carga es muy pequeña o nula, siendo más crítico el caso de operación en vacío. Lo anterior, teniendo en cuenta que las cargas del transformador contribuyen a disipar parte de la energía almacenada en las capacitancias y en los elementos ferromagnético
- Cuando el banco de transformadores opera en vacío, la conexión del secundario no tiene efecto en el cálculo de los voltajes y corrientes del primario.
- Esas configuraciones pueden ocurrir cuando una o dos fases quedan abiertas mientras el transformador queda ligeramente cargado (o sin carga eléctrica), como resultado de la falla de un fusible o interruptor, por la ruptura del conductor, o por un accidente operativo.

Los voltajes entre líneas de la fuente corresponden a los nominales de los transformadores, puesto que son los que se aplican al banco en condiciones normales balanceadas y la fuente de voltaje se encuentra sólidamente aterrizada.

La fuente de alimentación se asume ideal porque se supone que el banco está conectado a un barraje infinito con reactancia equivalente despreciable. También se desprecian las reactancias de dispersión de los transformadores y los efectos inductivos de las líneas, esto se debe a que son pequeños comparados con las impedancias que presentan las reactancias de magnetización y los efectos capacitivos del sistema [17].

3.2. Problemas en Sistemas con Cables Aislados Subterráneos

Los límites mínimos de capacitancia que se requieren para que exista ferrorresonancia se dan en la tabla I. Los valores de dichas capacitancias son entregados en **nF** (Recuérdese que $1 \text{ nF} = 1000 \text{ pF}$) [19]. Los valores marcados en *cursiva* en la Tabla I son susceptibles de autoferrorresonancia [19].

El primer paso para predecir la ferrorresonancia es verificar cómo la inductancia puede estar en serie con la capacitancia. Una vez se haya entendido este punto, entonces la ferrorresonancia no será difícil de identificar. Las capacitancias pueden estar formadas por un cable subterráneo capacitante o por una línea aérea de suministro de un transformador [13].

3.3. Estudio en Sistemas aislados a 44kV

Se procede a simular el efecto de ferrorresonancia en un sistema de distribución aislado a 44kV. Para el efecto se simula el efecto en un transformador de potencial 44/0.115 kV usado para medida, con conexión Δ en el primario y Y aterrizada en el secundario [7].

Se procede a dejar una fase abierta para permitir la aparición de un circuito ferrorresonante RLC, como el de la figura 7.a.

3.3.1. Descripción del Circuito

El análisis de un sistema eléctrico puede presentar las siguientes características: Un barraje a 44kV y un sistema aislado en Δ . Hay un transformador de potencial conectado, el cual se emplea para efectos de medición en el consumo de energía y potencia.

De acuerdo a la norma IEC de transformadores de medida, por tratarse de un sistema conectado a 44kV, entonces el primario se conecta a la **tensión** nominal, y el voltaje secundario debe ser igual a 115V [19].

La **potencia nominal** se elige como de 50VA. Pues es una potencia adecuada para la selección de un transformador de medida. Finalmente, se elige un transformador cuya **clase de precisión** sea del 0.5% por tratarse de una aplicación en sistemas industriales. Adicionalmente, se tiene que el transformador tiene $\mu_{cc} = 5\%$.

Se supone en el punto de conexión, se tiene: $I_{cc3\phi} = 3500\text{Amp} \Leftrightarrow I_{cc1\phi} = 0\text{Amp}$ (Pues se trata de un sistema en Δ aislado). Este dato corresponde a un valor típico para sistemas de distribución en un nivel de voltaje como el que se estipula en la norma RA7-060 [7]. Seguidamente se realizan los cálculos para la realización de los modelos que se entran a la interfaz ATP-Draw [6].

El barraje se alimenta con fuente de 44kV_{RMS} . Es decir, el voltaje monofásico pico es 35926.5 Voltios.

El Barraje de la Subestación tiene la siguiente reactancia de secuencia positiva (Se desprecia el efecto resistivo): $X_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3} \cdot I_{CC3\phi}} = \frac{(44\text{kV})}{\sqrt{3} \cdot 3.5\text{kA}} = 7.26\Omega$. Se asume un sistema sólidamente puesto a tierra [20]. Bajo esta condición, entonces se cumple la condición $n \frac{X_1}{X_0} < 3$ y $\frac{R_1}{X_0} < 1$ y . Luego, X_0 debe ser mayor de 23Ω (Un valor de $1\text{M}\Omega$ es adecuado, según se recomienda en la normatividad colombiana [20]) y R_1 puede tomarse como 1Ω . Esta impedancia es muy alta en bancos de transformadores [20]. Cuanto mayor es X_0 , es menor la posibilidad de transferir la magnetización de un transformador a otro a través del barraje de la subestación.

3.3.2. Descripción del Transformador

El transformador de potencial tiene conexión Δ -Y. Su relación de transformación por fase es de 44000 V en el primario a 115V en el secundario. La secuencia de red es **abc**, por tanto, el voltaje de fase-neutro está desfasado -30° respecto al voltaje línea-línea.

Se desprecia el efecto resistivo de los devanados del transformador. Con la información según la cual el transformador tiene una impedancia de cortocircuito de 5% y una potencia nominal de 50VA, entonces se pueden hallar los parámetros del transformador.

Por teoría de máquinas eléctricas [14] se sabe que, $X_{CC} = X_S + \frac{X_P}{a^2} \approx 2 \cdot X_S$ y en consecuencia, $X_P = a^2 \cdot X_S$. Expresado en ohmios, queda: $X_S = \frac{(V_S)^2}{2 \cdot S_{Nom}} \times \mu_{cc} = \frac{(\sqrt{3} \cdot 115V)^2}{2 \cdot 50VA} \times 0.05 \approx 20\Omega$. Además, $X_P = \left(\frac{44kV}{115}\right)^2 \cdot 20\Omega \approx 3M\Omega$

Los datos han sido tomados del Programa de Implantação do MAE para transformadores de medición a 46kV/115V [21]. Luego, dichos datos son apropiados para ser usados en nuestra simulación del sistema aislado a 44kV [7]. En consecuencia, la curva de magnetización del transformador de potencial para el modelo de simulación se ilustra en la figura 8. Importante anotar que en estado estacionario, el transformador de potencial tendrá un remanente de 1mA y 56Wb. Obsérvese que la reactancia de magnetización, definida como $X_m = U/I_m$, puede tener un valor variable que depende de la tensión.

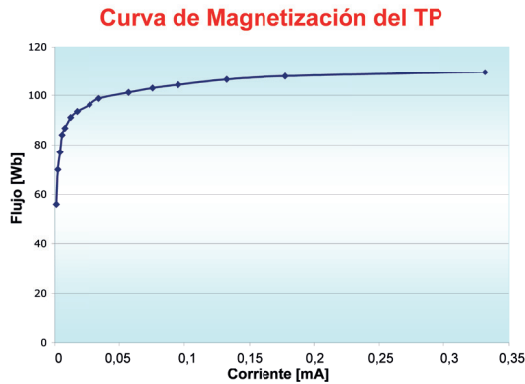


FIGURA 8. CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIAL A 44KV [EN WB] (CONSTRUCCIÓN PROPIA)

3.3.3. Circuito en ATP

El siguiente circuito permite evidenciar el fenómeno de ferrorresonancia que ocurre cuando se aísla una fase del sistema de 44kV, o cuando por alguna razón existe desincronización en el cierre de interruptores de una subestación. En este caso, se supone la fase B queda abierta.

El circuito de la figura 9 evidencia la situación previamente descrita.

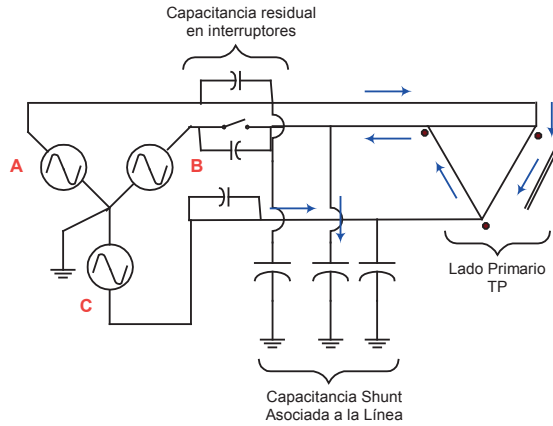


FIGURA 9. CIRCUITO BASE PARA MODELACIÓN DEL FENÓMENO (CONSTRUCCIÓN PROPIA)

Por otro lado, con ayuda de la tabla I sobre la capacitancia necesaria para causar ferorrresonancia, entonces se estima el valor de la capacitancia por aproximación lineal. Algunos autores proponen un valor típico de capacitancia serie para un interruptor defectuoso correspondiente a 900pF [13]. La capacitancia shunt en una línea de subestación con distancia menor a 100m tiene valores máximos de 3000pF [19].

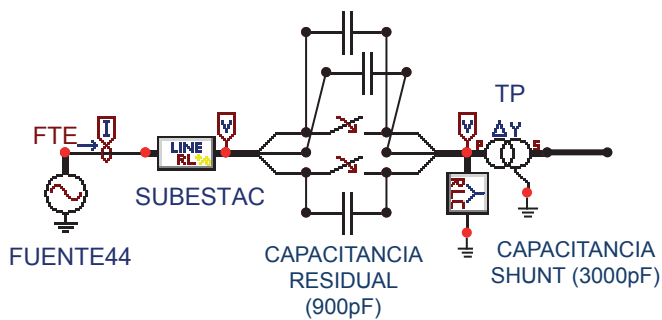


FIGURA 10. CIRCUITO BASE EN LA INTERFAZ ATP (CONSTRUCCIÓN PROPIA)

Tratándose del caso de estudio de energización en un transformador de potencial, se establecen los parámetros de cierre de los interruptores de la fase *a* y la fase *c* en el tiempo 0.00, mientras el interruptor de la fase *b* se abre en el tiempo 0.00. De esta manera, se puede provocar el fenómeno de ferrorresonancia del circuito de la figura 10.

Con la información ya recopilada, entonces se procede a entrar los parámetros ya calculados previamente para generar el siguiente modelo ATP que se emplea en la simulación respectiva.

En primer lugar se evalúa la ferrorresonancia introduciendo los valores de capacitancia residual asociada a un interruptor descompuesto (Estimada en 900pF) y la capacitancia shunt propia del bus (Estimada en 3000pF).

La figura 11 muestra el tipo de onda obtenida en las fases BC del transformador de potencial (TP), si el transformador se deja en vacío.

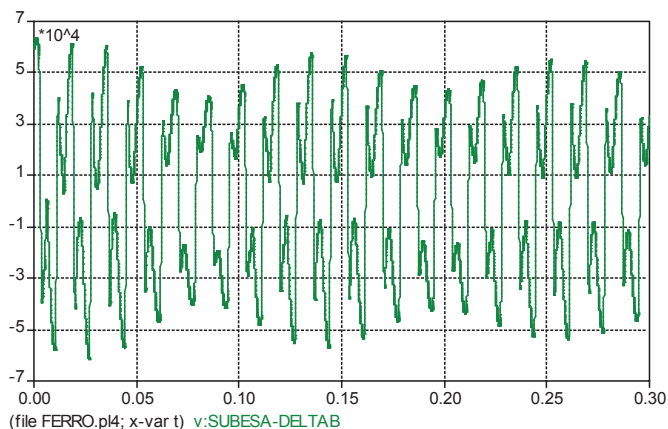


FIGURA 11. RESPUESTA DEL VOLTAJE EN EL INTERRUPTOR DAÑADO SIN RESISTENCIAS DE CARGA EN EL TP [EN VOLTIOS]

La ferrorresonancia es un fenómeno de baja frecuencia, pues se presenta al momento que el transformado trabaja en la región no lineal.

Se puede observar que las oscilaciones más comunes están comprendidas en frecuencias submúltiplos de la fundamental de 60Hz. (Por ejemplo, resonancias de 20Hz). Se infiere entonces que cualquier subarmónico de

secuencia positiva es teóricamente posible en tanto que ferrorresonancias mayores de la frecuencia fundamental no ocurrirán.

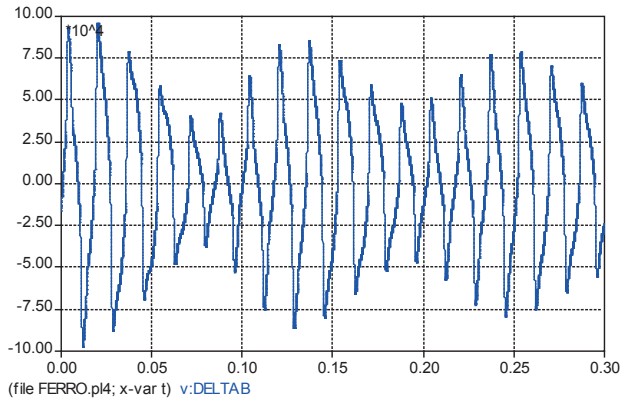


FIGURA 12. FERRORRESONANCIA OBSERVABLE EN LAS FASES BC DEL SISTEMA EN Δ AISLADO [EN VOLTIOS]

Nótense los notables sobrevoltajes en los bornes primarios del transformador. Dado que el voltaje pico de referencia es de 35kV_p , entonces se pueden apreciar sobrevoltajes de hasta 2,17 p.u. Esto prueba el peligro de la ferrorresonancia ya que puede perforar el aislamiento para el cual se diseñó el equipo. Además por tratarse de un fenómeno de baja frecuencia, entonces el daño se hace muy pronunciado.

3.3.4. Prevención de la Ferrorresonancia

En resumen, se puede afirmar que la ferrorresonancia puede ocurrir por los siguientes aspectos:

- Cuando ocurre una apertura de una o dos fases debido a la acción de interruptores, rechazos de carga o a la acción desincronizada de interruptores.
- Si ocurre el cierre desincronizado de una o dos fases, sin tener en cuenta los tiempos introducidos por los desfases entre voltajes de línea.
- Por la configuración propia de los devanados primarios del transformador, especialmente la conexión Δ y la Y sin aterrizar.

- Transformadores en vacío y transformadores ligeramente cargados.
- Capacitancia de cables, capacitores *shunt* y aún la capacitancia parásita de los transformadores.

Como se ha explicado previamente, la ferrorresonancia es muy peligrosa por el hecho que se generan sobrevoltajes que oscilan entre 2 y 5p.u. Como solución, podemos afirmar que la ferrorresonancia puede ser prevenida y controlada tomando las siguientes acciones:

Seleccionando conexiones apropiadas del transformador de medida (Y también para el de distribución) de modo que no ocurra la ferrorresonancia, como por ejemplo, usando bancos monofásicos, o también usando transformadores trifásicos de tres columnas al momento de considerar una configuración Y aterrizada.

- Cierres sincronizados de interruptores.
- Colocando cargas en el transformador en el secundario entre 5 y 10% de la potencia nominal del mismo. La figura 13 ilustra la ventaja de esta sugerencia: (Obsérvese la estabilización del voltaje de manera casi inmediata en la figura 13)
- Otro mecanismo de control se refiere al aseguramiento del aterrizamiento del neutro del primario del transformador conectado en Y, a través de una resistencia.
- Emplear pararrayos MOV de alta capacidad de disipación de energía. Así se limitan los sobrevoltajes por debajo de 2 p.u, pero el circuito debe abrirse para eliminar la ferrorresonancia. En estos casos también deben considerarse el calentamiento del MOV.
- La utilización de pararrayos MOV para limitar las sobretensiones debidas a la ferrorresonancia puede conllevar a riesgos operacionales, dado que las sobretensiones de ferrorresonancia tienen una duración relativamente larga ($t_{cola} > 50\mu s$), con lo que la energía disipada por el pararrayos debe ser muy elevada y si no ha sido elegido cuidadosamente el pararrayos puede explotar.
- Usar transformadores de mayor capacidad y cables de menor longitud en la medida de lo posible.

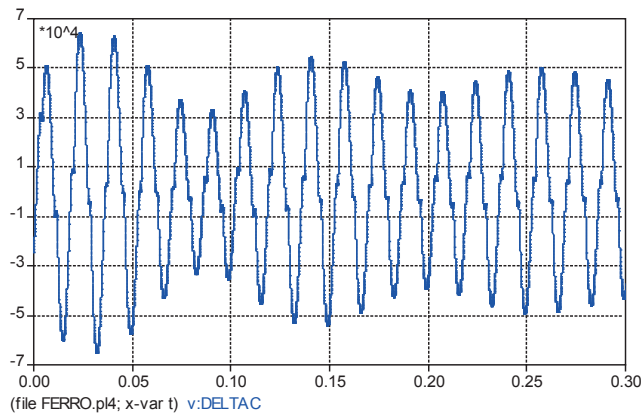


FIGURA 13. CONTROL DE FERORRESONANCIA EMPLEANDO CARGA CERCANA AL 10% DE LA CAPACIDAD NOMINAL ($1,32\Omega$) DEL TP

4. Conclusión

Se puede afirmar que en la contribución técnica que se han cumplido los objetivos fundamentales de conocer y analizar el fenómeno electromagnético de la ferorrresonancia, analizando el caso particular de problemas en un transformador de potencial, cuyo primario está conectado a un sistema de distribución aislado a 44kV. Asimismo, se ha comprobado la hipótesis de control de la ferorrresonancia a través de un modelo de simulación.

En los circuitos de potencia, la no linealidad de la inductancia se asocia con la saturación del núcleo de un transformador. La capacitancia puede ser la de los cables subterráneos o aéreos, o aún la capacitancia remanente de los devanados del transformador.

El problema del fenómeno de la ferorrresonancia se centra principalmente en su detección y predicción, especialmente en las nuevas instalaciones, debido a que en este caso en la mayoría de los sistemas no se producirán daños catastróficos, sino más bien se acelera el deterioro de las mismas, disminuyendo la vida útil del aislamiento de las instalaciones.

Entre los daños referidos a los efectos del fenómeno del sobrevoltaje debido a la ferorrresonancia se cuenta que en los cables aislados se inician descargas parciales que finalmente causarán la falla del aislamiento, mientras que en los transformadores el calentamiento excesivo de los núcleos tiene el

resultado de degradar el aceite aislante y un notable aumento de las pérdidas de vacío de los mismos.

La ferrorresonancia tiene la consecuencia de que se desarrollan tanto corrientes como tensiones altas referidas al sistema del circuito resonante. Por cierto, valga la pena informar que la frecuencia fundamental de resonancia es la de la red (60Hz).

Una buena práctica para controlar los efectos de la ferrorresonancia es dejar una carga mínima conectada al secundario del transformador. (Que oscile entre 5–10% de la potencia nominal del mismo)

5. Referencias

- [1] A. H. Abu Bakar, S. A. Khan, T. C. Kwang, and N. A. Rahim, "A review of ferroresonance in capacitive voltage transformer," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 28–35, 2015.
- [2] A. E. A. Araujo, A. C. Soudack, and J. R. Marti, "Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 140, no. 3. pp. 237–240, 1993.
- [3] IEEE, "New and recent IEEE publications," *ANSI / IEEE Spectrum, Standard 100*, vol. 22, no. 7. pp. 92–93, 1985.
- [4] E. F. Fuchs and M. Masoum, "Chapter 2 - Harmonic Models of Transformers." Academic Press, Burlington, pp. 55–108, 2008.
- [5] R. Yang, X. Zeng, and X. Yang, "Detection of ferromagnetic resonance for distribution system," *Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on*. pp. 922–926, 2014.
- [6] H. K. Høidallen, "Electromagnetic Transients Program," *ATPDraw - The graphical pre-processor to ATP*, 2015. [En Línea]. Disponible: <http://www.atpdraw.net/>.
- [7] EPM, NORMA RA7-060: TRANSFORMADORES QUE QUEDARÁN CONECTADOS AL SISTEMA DE EE.PP.M. Medellín, Colombia: EPM, 2005, p. 17p.
- [8] H. Na, Z. Zirong, and D. Rong, "Study on Ferromagnetic Resonance Over-voltage of Voltage Transformer," *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMT-MA), 2011 Third International Conference on*, vol. 3. pp. 461–464, 2011.
- [9] P. Ferracci, "Ferroresonance," *Cah. Tech.*, vol. 190, no. 1, pp. 2–28, 1998.
- [10] J. A. Martínez-Velasco, *Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión*. Barcelona, España: UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) y REE (Red Eléctrica de España), 2007.

- [11] Z. Abdul-Malek, K. MehranZamir, B. Salimi, and S. J. Mirazimi, "Investigation on the Probability of Ferroresonance Phenomenon Occurrence in Distribution Voltage Transformers Using ATP Simulation," in *Intelligent Informatics*, A. Ajith and T. Sabu, Eds. Chennai, India: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 149–155.
- [12] D. C. McDermit, D. D. Shipp, T. J. Dionise, and V. Lorch, "Medium-Voltage Switching Transient-Induced Potential Transformer Failures: Prediction, Measurement, and Practical Solutions," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 4. pp. 1726–1737, 2013.
- [13] C. Quijite-Sánchez, "Estudio del Fenómeno de Ferrorresonancia en Transformadores," Universitat Virgil i Rovira, Barcelona (España), 2012.
- [14] J. M. Ortega-Plana and J. Ramírez-Vásquez, "Máquinas de corriente continua," *Enciclopedia CEAC de la electricidad, Tomo II*. Grupo Editorial CEAC, p. 939p, 1978.
- [15] C. Heck, "13 - Core materials for inductance coils and transformers," C. B. T.-M. M. and their A. Heck, Ed. Butterworth-Heinemann, 1974, pp. 396–522.
- [16] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, 3rd ed. Bogotá (Colombia): McGrawHill, 2000.
- [17] U. G. EMTP, "ATP/EMTP Rule Book." Lázló Prikler, Hans Kr. Høidalen, Oslo, Noruega, 1998.
- [18] S.-M. Jang, K.-J. Ko, J.-H. Park, and S.-H. Lee, "Design criteria and electromagnetic analysis of a high-speed permanent magnet synchronous machine," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 3146–3151.
- [19] S. Acevedo, "Análisis de Ferrorresonancia en Transformadores Eléctricos," Universidad de Monterrey, 1987.
- [20] Icontec, *Norma Técnica Colombiana NTC 317*. Colombia, 1998, p. 54p.
- [21] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional," *Agência Nacional de Energia Elétrica*, 2011. [En Línea]. Disponible: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo5_Revisao_2.pdf. [Accedido en: 01-May-2015].