

Fenómenos Transitorios Asociados a la Energización de un Transformador

Jiménez, R. Esteban.

rejimene@unalmed.edu.co
Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín

Abstract—El fenómeno de corrientes inrush en los transformadores es más común de lo que se piensa, en todo momento se energizan transformadores para hacer el acople de líneas secundarias de distribución a las líneas primarias. Estos efectos pueden ser devastadores cuando se presentan con el fenómeno de ferresonancia. En este trabajo se pretende establecer las condiciones para que estos dos fenómenos se presenten y cuáles serían los resultados de su aparición.

Palabras Claves—Switch Tripolar, Inrush de Magnetización, Análisis Armónico, corriente de magnetización.

I. INTRODUCCIÓN

EL funcionamiento del transformador exige la existencia de corriente alterna, para que exista el fenómeno de inducción y se pueda presentar el traspaso de potencia hacia niveles de tensión y corrientes más bajos o más altos según sea la aplicación.

Dentro de dicho análisis se definen conceptos fundamentales, que permiten el análisis del circuito magnético allí generado. Uno de estos conceptos es el de la corriente de magnetización, la cual se establece para orientar los dipolos magnéticos del núcleo. Esta corriente se presenta en todo el tiempo de funcionamiento del transformador, pero es medible únicamente en condición nominal de vacío pues en operación normal se mediría junto con la corriente exigida al primario por la carga en el secundario.

Dicha corriente de magnetización tiene dos componentes asociadas, la primera hace referencia a las pérdidas de potencia en el núcleo, dicha componente está en fase con el voltaje aplicado y su magnitud depende de las pérdidas asociadas al transformador sin carga. La segunda componente hace relación a magnetización del núcleo, esta componente está desfasada 90° con respecto al voltaje de alimentación y depende del número de vueltas del devanado y la forma del núcleo del transformador [4].

Es también de utilidad este valor de corriente de magnetización para estimar cuantas son las pérdidas de potencia invertidas

para la magnetización del núcleo y poder establecer la transferencia de potencia en forma de campo magnético.

Un ciclo completo de la excitación de tensión hará aparecer el ciclo de histéresis del núcleo.

Este ciclo de histéresis tiene asociada una potencia, dicha potencia se calcula mediante el área que dicho flujo encierra. El cálculo teórico de esta potencia es complicado de analizar debido a que no se tiene una relación lineal entre la intensidad del campo magnético y la densidad de flujo, pero de manera experimental puede ser medido por medio de un watímetro.

II. CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN

Asumiendo que el transformador está en vacío, se puede garantizar que la corriente establecida a través de la bobina es la corriente de magnetización.

La expresión que gobernará el flujo magnético generado a través del núcleo [2], está dada por la expresión:

$$\Phi = \frac{\sqrt{2}V_s}{N} \int_0^t \sin \omega t \, dt + \Phi_0$$
$$\Phi = -\Phi_{\max} \cos \omega t + \Phi_{\max} + \Phi_0$$

Los términos constantes en la expresión anterior son los que dan el nivel DC a la señal de flujo, pero estos van decayendo debido a las pérdidas [2] haciendo que finalmente desaparezca dicha componente DC.

Si consideramos el flujo inicial como nulo, el valor máximo se presenta cuando la señal de voltaje va por el primer cruce por cero, es decir cuando $\omega t = \pi$, en esta situación el coseno de la expresión del flujo es mínimo y por consiguiente el flujo es máximo e igual a el doble de la condición de amplitud para el flujo.

El establecimiento de este flujo máximo hace llegar el núcleo a la saturación por tanto establece altos niveles de fuerza magnética, la cual es proporcional a la corriente aplicada, generándose corrientes de magnitudes de hasta 8 y 10 veces el valor nominal. La situación empeora cuando el transformador ya había sido energizado y se hace un recierre pues el flujo remanente que tenía, hace aumentar mucho más el valor del

flujo máximo, por tanto la corriente inrush del nuevo cierre llega inclusive a valores de 40 veces la corriente nominal dependiendo del diseño del transformador [3].

Si no existiese saturación en el núcleo, la corriente de magnetización variaría directamente proporcional al flujo, generándose una señal de corriente de magnetización senoidal y en fase con la señal senoidal del flujo, por lo tanto desfasada 90° con respecto a la señal de voltaje aplicado [4].

III. ENERGIZACIÓN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

El ATP permite la posibilidad de hacer análisis con transformadores saturables, a los que se les puede ingresar una curva de magnetización en términos la corriente inyectada y el voltaje inducido.

Esta herramienta se conoce como Transformador saturable y será la usada para analizar el fenómeno de corriente inrush.

El circuito que permitirá hacer el análisis es el mostrado en la figura 1. La fuente de excitación tiene las fases referenciadas a una señal cosenoidal con el objetivo de controlar los cierres en las condiciones más críticas para la corriente inrush.

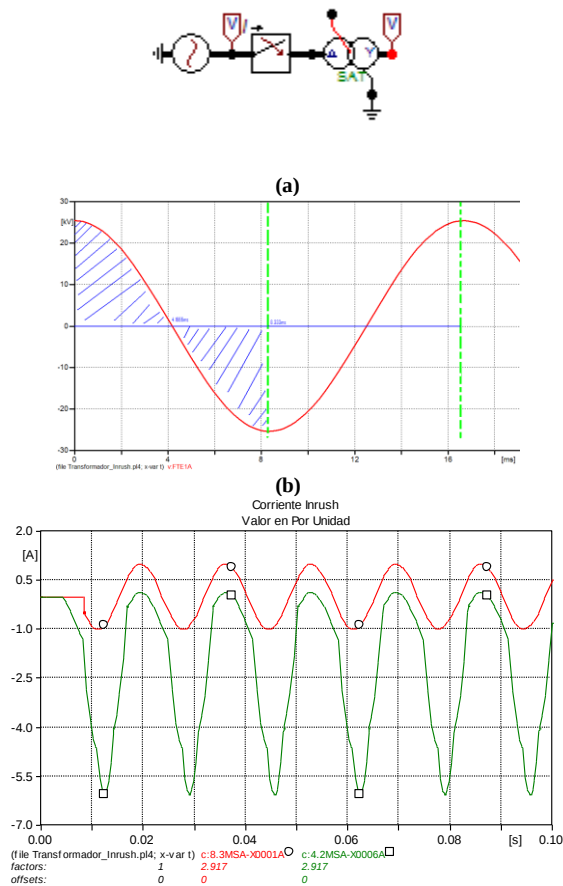


Fig. 1. (a) Circuito para la Energización del Transformador (b) Voltaje de Excitación (c) Corriente Inrush [p.u.] (a cuadros el cierre a los 4.16ms, en círculos el cierre a los 8.3ms)

Se demostró anteriormente que el flujo sería máximo cuando la integral de la señal de voltaje estuviera por su valor máximo, en la figura 1(b), se muestra la señal de excitación y se ve claramente que en los 8.333ms la integral (área bajo la curva) de la señal de excitación es nula, por lo tanto es de esperarse que la corriente inrush sea muy pequeña alcanzando rápidamente el comportamiento estable. Por el contrario en esta misma gráfica se puede apreciar que en tiempos como 4.166ms el área bajo la curva es la máxima que se puede presentar, esperándose entonces que si se energiza el transformador en esta situación la corriente inrush sea máxima, generándose los efectos asociados a la sobrecorriente. La figura 1(c) muestra los resultados de las corrientes por una de las líneas para los dos casos anteriormente mencionados.

El aumento de la corriente fue del orden de 6 veces la magnitud de la corriente nominal, la polaridad de dicha corriente depende naturalmente de la derivada de la señal, pues según sea la tendencia de la señal a aumentar o a disminuir, es decir depende básicamente del punto donde se haga la conmutación, pero esto no afecta en absoluto la magnitud de la sobretensión que es básicamente lo que importa.

En la práctica los cierres tripolares no son exactamente conmutados al tiempo, existen desviaciones que ocasionadas por retrasos, los efectos de la corriente inrush son mucho peores cuando estos retrasos de conmutación hacen que por cada línea se dé la mayor corriente.

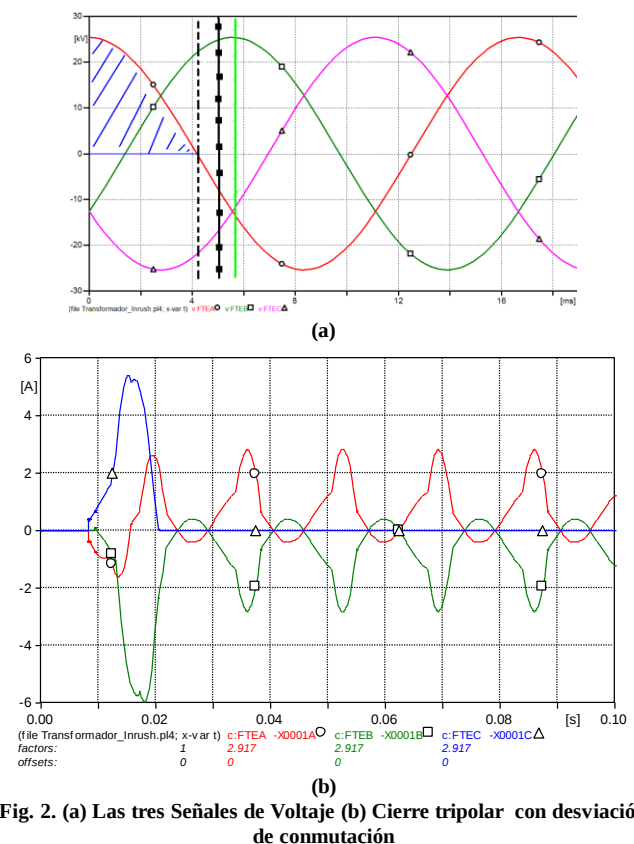


Fig. 2. (a) Las tres Señales de Voltaje (b) Cierre tripolar con desviación de conmutación

En la figura 2 (a), se muestran tres líneas que para las tres señales harán aparecer las mayores corrientes, las tres líneas se suponen son desviaciones en tiempos de conmutación. El peor caso se da cuando uno de los switches está cerrando a dos veces la desviación de conmutación del switch principal, pues es en esta situación en donde se toma más área bajo la curva de las demás fases. Las magnitudes en por unidad de la situación comentada se presentan en la figura 2 (b).

Dentro del análisis por simulación hecho en el ATP, se supondrá un switch tripolar ideal, donde los tres interruptores cierran al tiempo.

Análisis del Espectro en Frecuencia

El contenido espectral armónico de la señal de corriente inrush se muestra en la figura 3, los valores de magnitud fueron obtenidos a partir de una señal en por unidad.

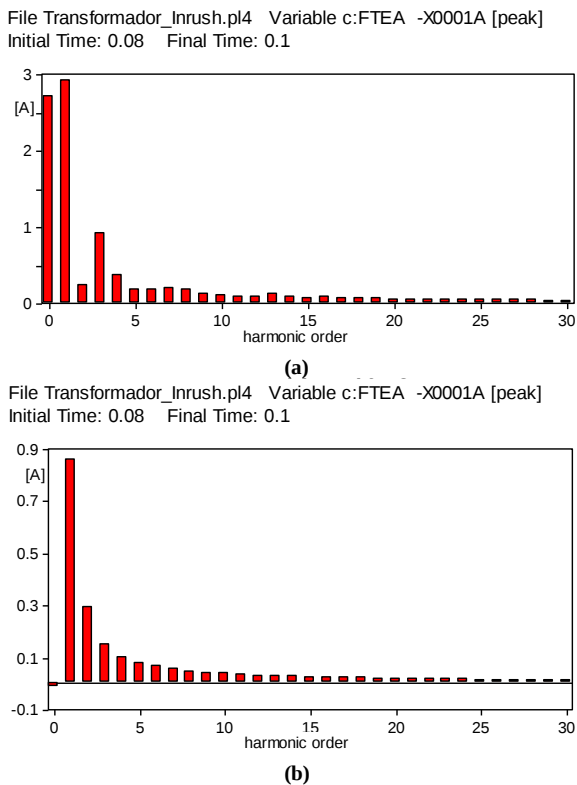


Fig. 3. (a) Contenido Espectral Señal de Corriente de Magnetización Inrush (alimentado por el lado del delta) (b) Contenido Espectral de la Corriente de Magnetización en estado estable (alimentado por el lado del delta)

El espectro en frecuencia muestra un alto contenido de nivel DC, esto es básicamente por la existencia del flujo remanente o flujo inicial que tenía el transformador cuando se hizo la energización.

La razón por la cual existen todos los armónicos, tanto pares como impares es por la falta de simetría de la señal de corriente inrush con respecto a los ejes coordenados y la imprecisión del algoritmo que genera el espectro. Estos espectros son

generados mediante un algoritmo de alta eficiencia llamado “Transformada Rápida de Fourier”, los resultados obtenidos con este algoritmo siempre son aproximaciones, la calidad de la aproximación depende del número de puntos que se tome de la señal digital. Sin embargo es de especial importancia el armónico 3 figura 3(a), pues tiene una amplitud bastante alta comparada con los demás armónicos

El nivel DC encontrado depende directamente del punto donde estaba la señal de excitación cuando se hizo la energización, esto porque según este valor se determina al flujo asociado, por lo que se llega a una conclusión: El nivel DC será máximo cuando la señal de tensión este en los cruces por cero, para una señal de excitación sinodal estará en los múltiplos de π , mientras que para una señal cosenoidal estaría en los múltiplos de $\pi/2$.

Cuando se haga el análisis de espectro en frecuencias de la señal de corriente en estado estable, es de esperarse que el nivel DC de la señal asociada desaparezca, pues la componente transitoria asociada al punto de energización ya habrá desaparecido de la expresión.

Cuando se analiza la corriente de magnetización inrush, se nota claramente el predominio de los armónicos impares contra los armónicos pares. Esta situación se presenta porque la componente de tercer armónico generada por el flujo magnético sinusoidal [4].

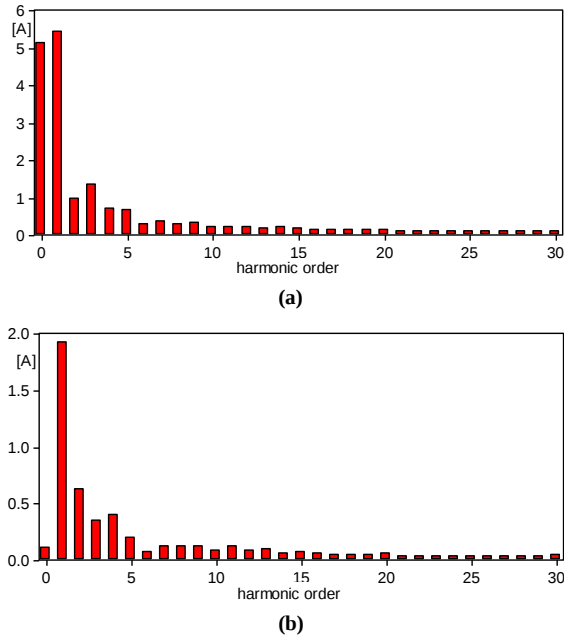
Analizando la corriente en estado estable, aún se observan armónicos, pero en este caso tienen una distribución no tan marcada hacia los armónicos impares. Esta distribución de armónicos se debe básicamente a que debido al comportamiento de la curva de saturación del núcleo nunca se obtendrá una corriente puramente senoidal, pues los transformadores operan en el codo de la curva de histéresis.

Si la energización se hiciese por el lado de la conexión en estrella, apareciendo una componente de tercer armónico generada, la magnitud del tercer armónico debe de aumentar, este efecto de la conexión se puede visualizar tanto para el estado transitorio como para el estado estable en la figura 4(a)-(b) donde se presentan los valores en por unidad.

Efecto de Ferroresonancia

Dentro de los efectos asociados a la energización de transformadores existe uno bastante interesante, denominado la “ferroresonancia”. No se presenta comúnmente pero puede ocurrir por lo que es importante saber determinar cuándo y cómo es que se presenta.

Ocurre cuando por alguna circunstancia aparece una capacitancia que entra en resonancia con la reactancia inductiva del transformador.



La aparición de esta capacitancia se justifica en los cables aislados subterráneos que salen de las subestaciones a los transformadores.

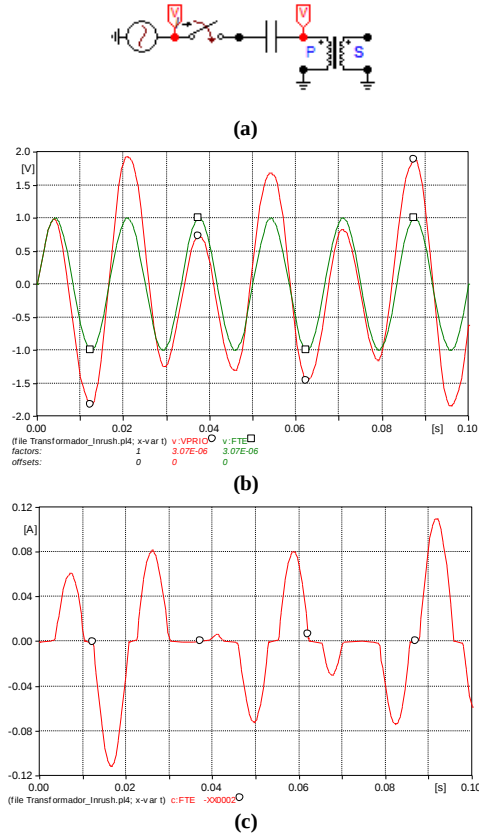


Fig. 4. (a) Circuito para simular el fenómeno de ferroresonancia [p.u.] (b) Voltaje del primario respecto a la fuente. (c) Corriente por el primario.

Para que se presente la ferroresonancia es necesario que exista un circuito LC serie, con un elemento de características no lineales [5].

El circuito que representa el fenómeno se muestra en la figura 5, con la respectiva expresión para calcular la tensión sobre el inductor.

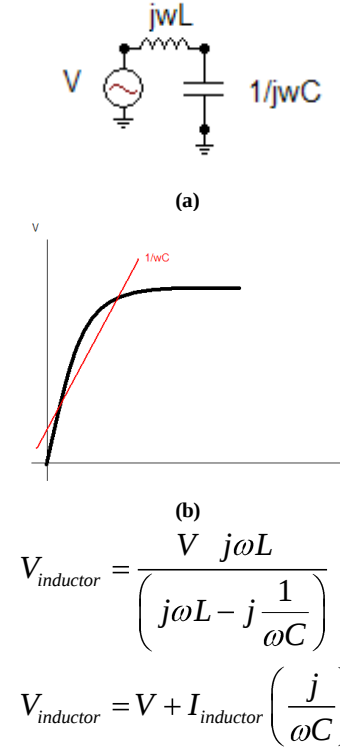


Fig. 5. (a) Circuito para explicar el fenómeno de ferroresonancia. (b) Punto de Operación de posible ferroresonancia.

Se considera que existe fenómeno de ferroresonancia cuando el voltaje en el inductor supera en un 25% el valor de la fuente. La capacitancia que logrará esta situación estará dada por:

$$C = \frac{1}{0.25\omega^2 L}$$

La inductancia se asocia al transformador y por tanto a su núcleo, quedando intrínsecas las características no lineales del mismo, esta expresión es poco productiva en el sentido de que es muy difícil determinar la inductancia para el transformador, sin embargo se presenta con el objetivo de asociar la relación inversa que debe de cumplirse, entre capacitancia e inductancia para que ocurra el fenómeno de ferroresonancia (Si aumenta la inductancia tiene que disminuir la capacitancia y viceversa, el efecto del aumento de inductancia se ve reflejado en el aumento de la reactancia de magnetización).

Analizando el mismo circuito pero en este caso teniendo en cuenta la corriente por el inductor, se puede ver que el voltaje será proporcional a la relación $1/\omega C$, cortando el eje en el voltaje de la fuente V .

La relación de voltaje corriente, también está dada por la curva de magnetización. En este caso, se establecerá el punto de operación cuando la recta corte la curva de magnetización, y se establecerá condición de posible ferroresonancia, cuando la

recta corte puntos de la curva de magnetización que se encuentren en la zona de saturación, figura 5(b) [5].

La capacitancia se determina según el cable. Para las acometidas subterráneas que son las que se están tratando y las que justifican la aparición de la capacitancia, se usa un cable XLPE, con valores de capacitancia del orden de los 132nF/Km.

Para el circuito de la figura 4(a). Se tiene un transformador monofásico saturable y una capacitancia de 1pF asociada a los cables.

Cuando se hace la energización, aparece el fenómeno de ferresonancia y se puede ver claramente que se alcanzan valores hasta de dos veces el valor pico de la fuente de alimentación, figura 4(b).

Se comenzó a variar el valor de capacitancia con el fin de determinar cuáles eran los rangos de la misma para que siguiera existiendo el fenómeno. Los resultados se presentan en la tabla 1.

Capacitancia [nF]	Magnitud máxima de Sobretensión [pu]
1	1.94
2	1.51
3	2.4
4	1.30
5	1.28

Tabla1. Sobretensiones debidas al efecto de ferresonancia, según la capacitancia

El efecto de ir aumentando la capacitancia implica que la recta presentada en la figura 5(b), va disminuyendo su pendiente, por lo tanto corta puntos muy lejanos de la saturación de la curva de magnetización. Estos puntos no serían alcanzados dentro de la operación, por lo que el efecto de la sobretensión disminuye notablemente. La capacitancia que más genera sobretensión es la de 3nF. Esto se explica desde el punto de vista de que es esta la que toca la curva en el punto de operación del transformador.

Ferresonancia en Transformadores de Distribución

Existe una relación muy importante dentro de la ferresonancia en transformadores de distribución. Dicha relación está determinada por la expresión:

$$K = \frac{X_c}{X_m}$$

Si dicha relación es muy elevada no se tienen problemas de resonancia [5]. Sin embargo es factible que se presente la ferresonancia al presentarse una disminución de dicha relación, una disminución se puede presentar, como ya se había descrito anteriormente, por un aumento de X_c o una disminución de X_m .

Se pretende determinar para nueve transformadores diferentes, cuanto debería ser la longitud de un cable de alimentación, con su respectiva capacitancia, para que se dé el fenómeno de ferresonancia.

En el anexo 1, se presentan los valores de los parámetros de cada transformador, según las pruebas de rutina.

Aparecen además dos campos importantes, la columna I_o que hace referencia a la corriente pico de vacío, y un campo adicional F_o que hace referencia al flujo pico de magnetización.

Con estos dos valores se puede determinar la condición inicial de magnetización.

Naturalmente los flujos de magnetización F_o en cada uno de los transformadores son idénticos, esto es debido a que dependen únicamente del voltaje de alimentación por las expresiones:

$$V = \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$\frac{V_{pico}}{2\pi f} = \Phi_{pico}$$

Se define como longitud crítica, aquella longitud máxima que puede tener el cable de alimentación sin que se tenga riesgos de ferresonancia.

Para el cálculo de la reactancia capacitiva se utiliza la expresión:

$$X_c = \frac{10^3}{2\pi f C \ell}$$

Con la longitud en metros, y C el valor de capacitancia del cable por kilómetro.

Mientras que para la reactancia del transformador se hace el cálculo mediante [5]:

$$X_m = \frac{V^2}{[\%I_o] \times S}$$

La longitud crítica en metros queda determinada por:

$$\ell = \frac{10^3 S (\%I_o)}{2\pi f K C V^2}$$

El valor de K debe de ser igual o menor que 2, para que aparezca el fenómeno [5].

El circuito con el que se harán las simulaciones se presenta en la figura 6(a)

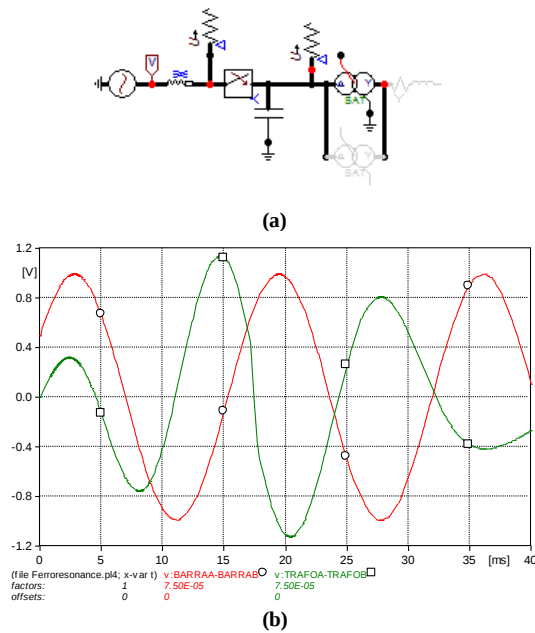


Fig. 6. (a) Circuito para explicar el fenómeno de ferroresonancia en transformadores trifásicos de distribución. (b) Ferroresonancia a la longitud crítica del cable de acometida.

El cierre del switch se hace de manera monopolar, con el objetivo de establecer un “camino” resonante como el que se muestra 5 (a).

Los resultados del cálculo para las longitudes de los cables, según su valor de reactancia de magnetización (reflejado en el valor de la corriente de vacío), se presentan en la tabla 2.

S [KVA]	Voltaje [Kv]	I_0 [A]	I_0 [%]	Longitud [m]
15	13.2	0.31	4.4	38.06
30	13.2	0.62	3.6	62.28
45	13.2	0.93	3.5	90.82
75	13.2	1.55	3.0	129.75
112.5	13.2	2.32	2.6	168.67
150	13.2	3.09	2.4	207.60
225	13.2	4.64	2.1	272.47
300	13.2	6.19	2.0	345.99
400	13.2	8.25	1.9	438.26

Tabla2. Longitudes críticas para la aparición de la ferroresonancia en los transformadores de distribución.

Los valores anteriores de corriente de magnetización son los presentados por la NTC 818 [5].

IV. CONCLUSIONES

- El flujo máximo de un transformador se consigue cuando la señal de tensión de excitación está en su cruce por cero.
- La obtención de la corriente de magnetización debe de hacerse a partir de la curva BH del núcleo del transformador

- En la práctica no se obtendrá una corriente de magnetización puramente senoidal, debido a que los transformadores operan en su codo de saturación, generando no linealidades de la relación flujo – corriente de magnetización.
- Los transformadores se ponen a operar en su codo de saturación por que sale mucho más económico para la construcción.
- Para transformadores donde la reactancia de magnetización es pequeña, se tiene la posibilidad de establecer acometidas subterráneas largas. Contrario a lo que ocurre con transformadores, donde se tienen corrientes bajas de magnetización, pues a estos niveles de reactancia inductiva se encuentran situaciones de ferroresonancia bastante fáciles de aparecer, pues no tienen que ser muy largos los cables para que esto ocurra.

V. REFERENCIAS

- [1] Cardona, L. Fenómenos Transitorios Electromagnéticos, Curso regular de pregrado Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín 2009.
- [2] Shenkman, Arie. “Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook”.
- [3] Harlow, James H. “Electric Power Transformer Engineering”.
- [4] Central Station Engineers of Weasting House Corporation. “Electrical, Transmission and Distribution Reference Book”.
- [5] Aponte, Guillermo. “La ferroresonancia en Transformadores de Distribución”. Universidad del Valle.

Anexo 1

En este anexo se presentan los valores de los parámetros del modelo por fase de los transformadores trifásicos analizados. Estos valores se calcularon a partir de las pruebas de corto circuito y circuito abierto que se tenían como dato previo.

Unidad	S [KVA]	R1 [ohm]	R2 [ohm]	X1 [ohm]	X2 [ohm]	Rc [ohm]	Io pico[A]	Fo [V-seg]
TFR-1	15	174.24	1.61E-02	123.89	3.44E-02	3.87E+06	0.31	49.5
TFR-2	30	87.12	8.07E-03	61.95	1.72E-02	1.94E+06	0.62	49.5
TFR-3	45	58.08	5.38E-03	41.30	1.15E-02	1.29E+06	0.93	49.5
TFR-4	75	34.85	3.23E-03	24.78	6.88E-03	7.74E+05	1.55	49.5
TFR-5	112.5	23.23	2.15E-03	16.52	4.59E-03	5.16E+05	2.32	49.5
TFR-6	150	17.42	1.61E-03	12.39	3.44E-03	3.87E+05	3.09	49.5
TFR-7	225	11.62	1.08E-03	8.26	2.29E-03	2.58E+05	4.64	49.5
TFR-8	300	8.71	8.07E-04	6.19	1.72E-03	1.94E+05	6.19	49.5
TFR-9	400	6.53	6.05E-04	4.65	1.29E-03	1.45E+05	8.25	49.5