



## TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Obtención de parámetros para el análisis de la ferorrresonancia periódica en líneas de distribución

*Obtaining of parameters for the analysis of the periodic ferorrresonance in distribution lines*

Orestes- Hernández Areu  
Héctor Silvio- Llamo Laborí

Raul- Lorenzo Llanes

Recibido: marzo de 2013  
Aprobado: diciembre de 2013

### Resumen/ Abstract

La tendencia mundial actual es incrementar la tensión de los circuitos de distribución a los niveles habitualmente empleados en las líneas de subtransmisión. Esto se hace para evitar los costos de una etapa más de transformación y las pérdidas de energía inherentes a estas. En estos casos, las distancias entre la subestación y los transformadores de distribución aumentan considerablemente, teniendo como inconveniente que, por la extensión de sus líneas, los valores capacitivos que estas alcanzan pueden provocar la resonancia magnética con los transformadores ante una operación de apertura o cierre monopolar de desconectivos o ante cualquier fenómeno desencadenante de la ferorrresonancia. Se presenta un estudio realizado para obtener los parámetros necesarios para predecir de forma analítica, la posibilidad de ferorrresonancia periódica en circuitos de distribución a partir del tipo de estructura, conductor, longitud de línea, configuración y parámetros de vacío de los transformadores empleados.

**Palabras clave:** ferorrresonancia, transformadores, transitorios en transformadores.

*The worldwide present-day tendency is to increment the voltage of distribution circuits to the levels habitually used in the lines of sub-transmission. This is done to avoid the costs of another transformation stage and the inherent energy losses. In these cases, the distances between the substation and distribution transformers increase considerably, having the inconvenience that, for the extension of this lines, the capacitive values that these attain can provoke the magnetic resonance with transformers due to a single-pole opening or closing operation of breakers or any phenomenon that provoke ferorrresonance. A study to obtain the necessary parameters to predict of analytical form, periodic ferorrresonance possibility in distribution circuits as from the kind of structure, conductor, length of line, configuration and no load parameters of the employed transformers, is presented.*

**Key words:** ferorrresonance, transformers, transitory in transformers.

## INTRODUCCIÓN

Cuando aumenta la longitud de las líneas eléctricas de distribución, los valores capacitivos de estas crecen considerablemente y sus reactancias capacitivas pueden disminuir a valores comparables a los de la reactancia de magnetización del transformador que estas alimentan.

.Si además de esto, el circuito asociado presenta alguna de las configuraciones propicias para la ocurrencia de ferorrresonancia, la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno es alta [1]. Existen publicaciones que reportan estudios del fenómeno de ferorrresonancia mediante simulaciones en ATP [2] y con otras herramientas y analíticamente, también es posible llevar a cabo un estudio que permita prever las posibilidades de ferorrresonancia en una red mediante la obtención de sus parámetros en condiciones de explotación.

## MATERIALES Y METODOS

Para cualquier circuito de distribución trifásico susceptible de ocurrencia de la ferorrresonancia existen dos momentos o condiciones en que esta pudiera verificarse [3]:

Estando un transformador trifásico o banco de transformadores des energizado y energización monopolar de una de sus fases.

Estando un transformador trifásico o banco de transformadores energizado y apertura de una de sus fases.

El análisis se realiza sobre la base de la no linealidad de la reactancia de magnetización del transformador que varía en dependencia de la intensidad de campo electromagnético a que esté sometido, pudiéndose establecer un límite superior,  $X_L$ , para la densidad de flujo de operación normal del transformador y un límite inferior,  $X_{LS}$ , cuando el núcleo magnético está en saturación.

En el instante de la conexión o desconexión de una de las fases, la fuente de energía queda alimentando un circuito que involucra las reactancias capacitivas de las líneas eléctricas desde el interruptor hasta el transformador y las reactancias de magnetización de cada fase del transformador en una configuración que dependerá de la conexión del devanado primario y que se transformará en un circuito equivalente donde habrá una reactancia capacitiva equivalente de las líneas,  $X_{CEQ}$  y una reactancia de magnetización equivalente  $X_{LEQ}$ , cuya expresión dependerá de la configuración que ve la fuente de energía en el momento de la conexión o desconexión de la fase.

El fenómeno de ferorrresonancia tiene dos regímenes periódicos. Estos son [4]:

- Régimen periódico fundamental.
- Régimen periódico sub armónico, o armónico  $1/n$ .

Se puede predecir que la ferorrresonancia periódica es imposible de verificarse si se cumple alguna de las premisas que se plantean en las ecuaciones (1 y 2), [4]:

$$X_{CEQ} > X_{LEQ} \quad (1)$$

La anterior relación conlleva a que  $\frac{X_{CEQ}}{X_{LEQ}} > 1$

La otra premisa es cuando:

$$X_{CEQ} < X_{LSEQ} \quad (2)$$

Donde:

$X_{LSEQ}$ : Reactancia de magnetización en saturación equivalente que ve la fuente de energía en el momento de la conexión o desconexión de una fase.

Es decir que  $\frac{X_{CEQ}}{X_{LSEQ}} < 1$

El valor de reactancia de magnetización por fase de un transformador puede ser determinado indirectamente de la característica de inducción magnética, o de los parámetros de la prueba de vacío referidos al lado primario por la siguiente ecuación (3), [5]:

$$X_L = \frac{U_n}{\sqrt{I_0^2 - (P_0/U_n)^2}}, \Omega \quad (3)$$

Donde:

$U_n$ : tensión nominal de línea, en V,

$I_0$ : corriente de vacío a  $U_n$ , en A.

$P_0$ : pérdidas de vacío totales a  $U_n$ , en W.

### Modelación de las líneas para la obtención de sus reactancias capacitivas

El análisis de la ocurrencia del fenómeno de ferorresonancia por el cierre o apertura monopolar una de las fases de la línea eléctrica, debe empezar por el reconocimiento de un sistema de cargas desbalanceadas, cuyo estudio puede hacerse a través del "Método de sistemas de secuencias" [6].

Los parámetros de secuencias involucrados en los circuitos serie a tierra que se generan en estos eventos son los parámetros de secuencia cero, así las capacitancias y reactancias capacitivas de las líneas que interesan son precisamente las de secuencia cero.

El paquete de programas "PARLIN" es una herramienta muy útil para calcular los parámetros de fase y secuencias de las líneas de transporte de energía eléctrica, mediante la modelación de las estructuras de soporte, calibre de los conductores y localización espacial de estos. Con este paquete se modelaron líneas mediante el circuito "Π nominal" [7], asumiendo una resistividad del terreno de 100 Ω-m y estructuras tangentes tipo "A", con cable protector y sin cable protector, por ser el tipo de estructura de las líneas aéreas que serán analizadas. Las figuras 1 y 2 y las tablas 1 y 2 muestran la localización de los conductores de este tipo de estructura en un plano X-Y con cable protector y sin cable protector.

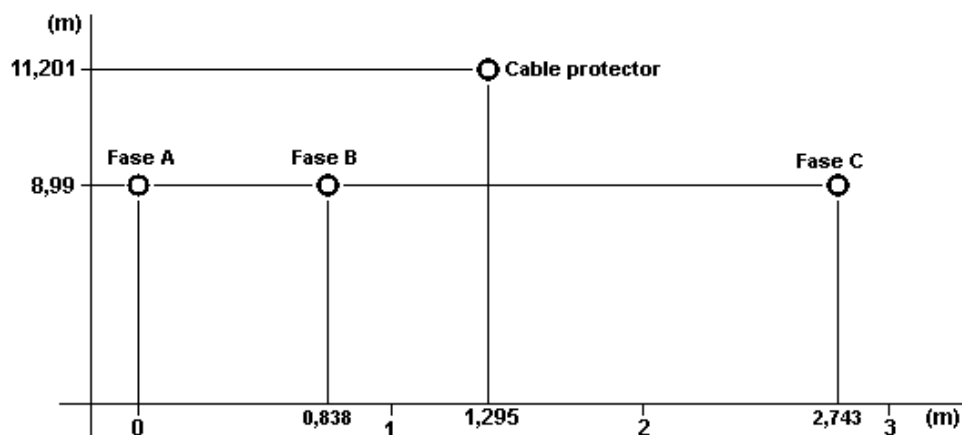


Fig. 1. Distribución espacial de la estructuras tangentes tipo "A", con cable protector.

Tabla 1. Estructuras tangentes tipo "A", con cable protector.		
Conductor	Abscisa (m)	Ordenada (m)
Fase A	0,000	8,991
Fase B	0,838	8,991
Fase C	2,743	8,991
Cable protector.	1,295	11,201

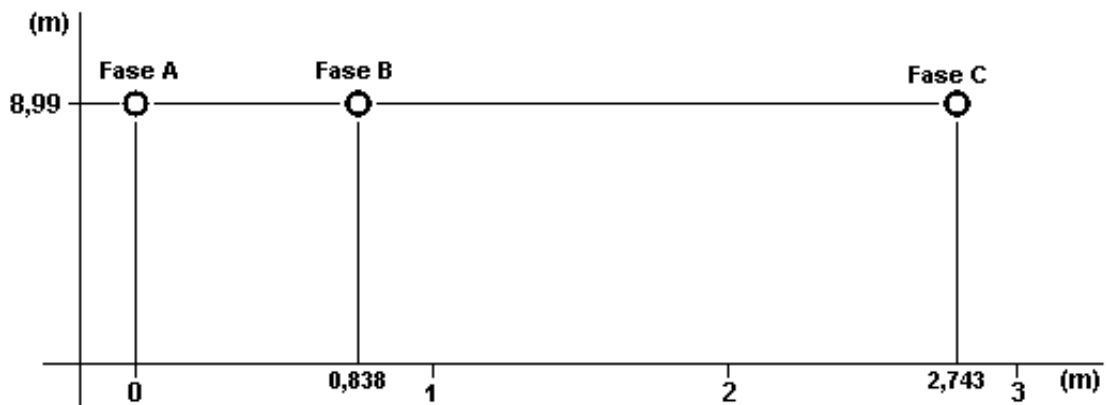


Fig. 2. Distribución espacial de la estructuras tangentes tipo "A", sin cable protector.

Tabla 2. Estructuras tangentes tipo "A", sin cable protector.		
Conductor	Abscisa (m).	Ordenada (m).
Fase A	0,000	8,991
Fase B	0,838	8,991
Fase C	2,743	8,991

La "flecha" es de 0,5 m para los conductores de fase y de 0,4 m para el cable protector que, en todos los casos es de acero del tipo 3/8" 40 A. Se tomó una Corrección de Carson de primer orden dado que el índice de convergencia de la Serie de Carson para esta estructura es:

$\Gamma=0,0476 \ll 0,3$  para la línea con cable protector y  $\Gamma=0,0377 \ll 0,3$  para la línea sin cable protector [8]. A partir de esta modelación se obtienen los valores de capacitancias por kilómetro de línea,  $C(o)$ , susceptancias capacitivas por kilómetro de línea,  $B(o)$  y reactancia capacitiva por kilómetro,  $Xc(o)$ , todos de secuencia cero. Las tablas 3 y 4 muestran los resultados.

<b>Tabla 3. Parámetros de secuencia cero en líneas con cable protector.</b>			
<b>Conductor</b>	<b><math>C(o)</math> (<math>\mu\text{F}/\text{km}</math>)</b>	<b><math>B(o)</math> (S/km)</b>	<b><math>Xc(o)</math> (<math>\text{k}\Omega\text{-km}</math>)</b>
AC50/8	0,00488	$0,184 \times 10^{-5}$	543,478
AC70/11	0,00496	$0,187 \times 10^{-5}$	534,759
AC95/16	0,00504	$0,190 \times 10^{-5}$	526,315
AC120/19	0,00506	$0,191 \times 10^{-5}$	523,560
AC150/19	0,00512	$0,193 \times 10^{-5}$	518,134
AC185/24	0,00517	$0,195 \times 10^{-5}$	512,820
AC240/32	0,00525	$0,198 \times 10^{-5}$	505,050

<b>Tabla 4. Parámetros de secuencia cero en líneas sin cable protector.</b>			
<b>Conductor</b>	<b><math>C(o)</math> (<math>\mu\text{F}/\text{km}</math>)</b>	<b><math>B(o)</math> (S/km)</b>	<b><math>Xc(o)</math> (<math>\text{k}\Omega\text{-km}</math>)</b>
AC50/8	0,00432	$0,163 \times 10^{-5}$	613,496
AC70/11	0,00438	$0,165 \times 10^{-5}$	606,060
AC95/16	0,00443	$0,167 \times 10^{-5}$	598,802
AC120/19	0,00448	$0,169 \times 10^{-5}$	591,715
AC150/19	0,00451	$0,170 \times 10^{-5}$	588,235
AC185/24	0,00456	$0,172 \times 10^{-5}$	581,395
AC240/32	0,00461	$0,174 \times 10^{-5}$	574,712

## RESULTADOS

Se hará el análisis de dos líneas de distribución existentes en Cuba, de 34,5 kV con estructuras "A" tangentes, con cable protector, cuyas características son mostradas en la tabla 5.

<b>Tabla 5. Características de las líneas analizadas.</b>						
<b>Denominación de la línea.</b>	<b>Conductor (calibre)</b>	<b><math>C(o)</math> (<math>\mu\text{F}/\text{km}</math>)</b>	<b><math>B(o)</math> (S/km)</b>	<b><math>Xc(o)</math> (<math>\text{k}\Omega\text{-km}</math>)</b>	<b>Long. (km)</b>	<b><math>Xc(o)</math> (<math>\text{k}\Omega</math>)</b>
Holguín – Holguín	AC150/19	0,00512	$0,193 \times 10^{-5}$	518,134	0,30	1727,11
Nicaró - Fábrica 2	AC150/19	0,00512	$0,193 \times 10^{-5}$	518,134	5,54	93,52

La línea nombrada Holguín – Holguín termina en un banco de tres transformadores monofásicos marca Latino de 25 kVA en conexión Y -  $\Delta$ . La línea nombrada Nicaro – Fábrica 2 termina en un banco de tres transformadores monofásicos marca Latino de 50 kVA en conexión  $\Delta$  - Y.

En la tabla 6, se muestran valores de parámetros de magnetización referidos al devanado primario de transformadores Latino de tensión primaria 19,1 kV.

Tabla 6. Parámetros de transformadores Latino.						
kVA	$P_o$ (W)	$I_o$ (A)	$X_L$ (k $\Omega$ )	$P_{os}$ (W)	$I_{os}$ (A)	$X_{Ls}$ (k $\Omega$ )
25,0	110	0,013	1638,8	148	0,082	259,9
50,0	167	0,021	997,8	225	0,126	174,3

En la tabla:

$P_o$  (W): Pérdidas de magnetización a tensión nominal, en W.

$I_o$  (A): Corriente de magnetización a tensión nominal, en A.

$X_L$ (k $\Omega$ ): Reactancia de magnetización a tensión nominal, en k $\Omega$ .

$P_{os}$  (W): Pérdidas de magnetización al inicio de la saturación, en W.

$I_{os}$  (A): Corriente de magnetización al inicio de la saturación, en A.

$X_{Ls}$ (k $\Omega$ ): Reactancia de magnetización al inicio de la saturación, en k $\Omega$ .

Para el caso de la línea “Holguín – Holguín” la configuración del circuito hasta el banco de transformadores es mostrada en la figura 3:

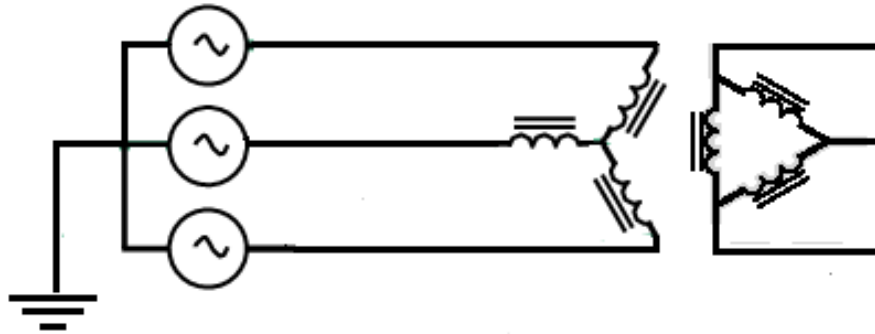


Fig. 3. Configuración de la línea “Holguín – Holguín”.

Para la condición (transformador trifásico des energizado y energización monopolar de una fase), la configuración del circuito, despreciando la resistencia de la línea, es mostrada en la figura 4:

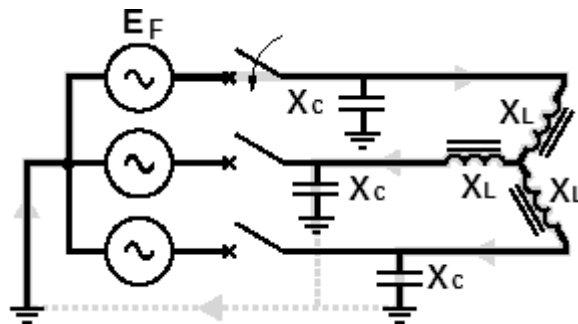


Fig. 4. Configuración del circuito con dos fases abiertas y el cierre de una fase.

El circuito equivalente para el instante de cierre, quedará como se muestra en la figura 5:

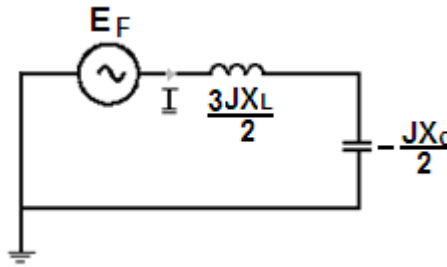


Fig. 5. Circuito equivalente para el instante de cierre de la fase.

Haciendo el análisis sólo para la frecuencia nominal (obviando el régimen sub armónico), se entiende que la improbabilidad de ferorrresonancia es resultado del cumplimiento una de las siguientes premisas:

$X_{CEQ} > X_{LEQ}$  según la ecuación 1 o  $X_{CEQ} < X_{LSEQ}$  según la ecuación (2).

En valores equivalentes, las ecuaciones (1 y 2) se transforman en:

$$1) \frac{jX_C}{2} > \frac{3jX_L}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_L} > 3$$

$$2) \frac{jX_C}{2} > \frac{3jX_{LS}}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_{LS}} > 3$$

Verificando el cumplimiento de la primera premisa queda:

$$\frac{jX_C}{jX_L} = \frac{1727,11 \text{ k}\Omega}{1638,80 \text{ k}\Omega} = 1,05 \not> 3$$

Como no se cumple esta premisa, se verificará la otra:

$$\frac{jX_C}{jX_{LS}} = \frac{1727,11 \text{ k}\Omega}{259,9 \text{ k}\Omega} = 6,64 \not< 3$$

Esto quiere decir que al no cumplirse ninguna de las dos premisas, existe la posibilidad real de ferorrresonancia periódica para 60 Hz para la condición de energización monopolar de una fase.

La configuración de la segunda condición (transformador energizado y apertura de una fase), despreciando la resistencia de la línea, es la mostrada en la figura 6:

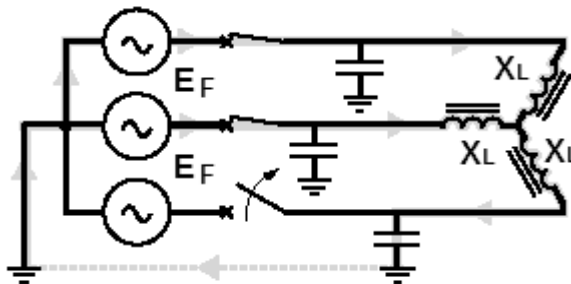


Fig. 6. Configuración del circuito con dos fases cerradas y la apertura de una fase.

El circuito equivalente para el instante de apertura, quedará como se muestra en la figura 7:

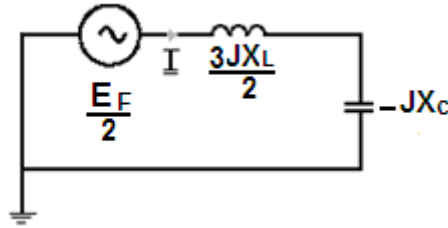


Fig. 7. Circuito equivalente para el instante de apertura de la fase.

Para que no haya ferorrresonancia debe verificarse, como premisa, las ecuaciones (1 ó 2):

- 1)  $X_{CEQ} > X_{LEQ} = jX_C > \frac{3jX_L}{2}, \frac{jX_C}{jX_L} > 1,5$
- 2)  $X_{CEQ} < X_{LSEQ} = jX_C < \frac{3jX_{LS}}{2}, \frac{jX_C}{jX_{LS}} < 1,5$

Verificando el cumplimiento de la primera premisa queda:

$$\frac{jX_C}{jX_L} = \frac{1727,11 \text{ k}\Omega}{1638,80 \text{ k}\Omega} = 1,05 \not> 1,5$$

Como no se cumple esta premisa, se verificará la otra:

$$\frac{jX_C}{jX_{LS}} = \frac{1727,11 \text{ k}\Omega}{259,9 \text{ k}\Omega} = 6,64 \not< 1,5$$

Al no cumplirse ninguna de las premisas, existe también la posibilidad real de ferorrresonancia periódica para 60 Hz cuando con el transformador energizado se interrumpa una fase.

En el caso de la línea "Nicaro – Fábrica 2" la configuración del circuito hasta el banco de transformadores es mostrada en la figura 8:

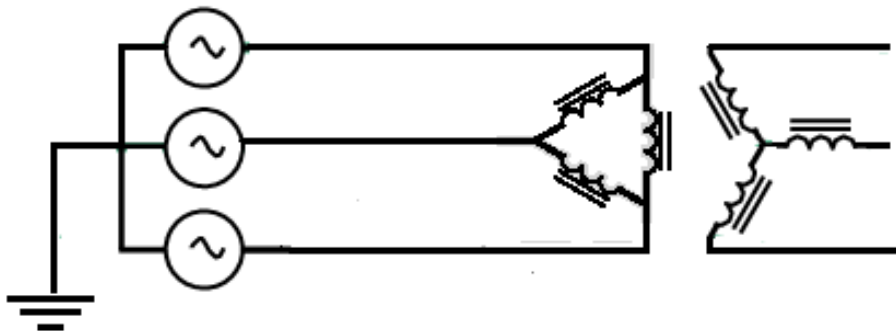


Fig. 8. Configuración de la línea "Nicaro – Fábrica 2".

Para la condición de transformador desenergizado y el cierre de una fase, la configuración del circuito, despreciando la resistencia de la línea, es la mostrada en la figura 9:



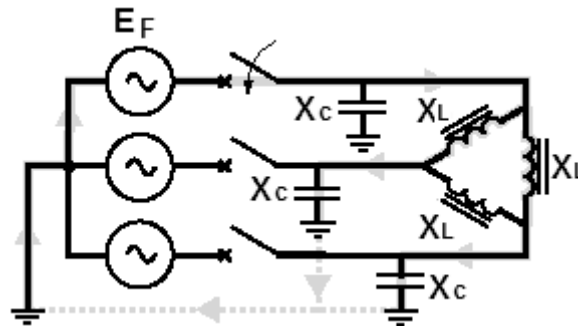


Fig. 9. Configuración del circuito con dos fases abiertas y el cierre de una fase.

El circuito equivalente para el instante del cierre, quedará como se muestra en la figura 10:

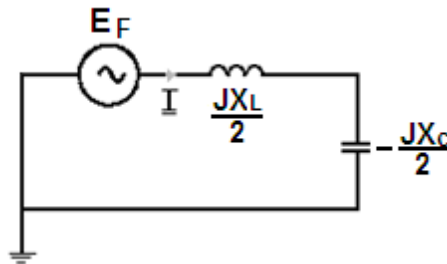


Fig. 10. Circuito equivalente para el instante de cierre de la fase.

En valores equivalentes, las ecuaciones (1 y 2), se transforman en:

$$1) \quad X_{CEQ} > X_{LEQ} = \frac{jX_C}{2} > \frac{jX_L}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_L} > 1$$

$$2) \quad X_{CEQ} < X_{LSEQ} = \frac{jX_C}{2} < \frac{jX_{LS}}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_{LS}} < 1$$

Entonces:

$$\frac{jX_C}{jX_L} = \frac{93,52 \text{ k}\Omega}{997,8 \text{ k}\Omega} = 0,093 \not> 1$$

Como no se cumple esta premisa, se verificará la otra.

$$\frac{jX_C}{jX_{LS}} = \frac{93,52 \text{ k}\Omega}{174,3 \text{ k}\Omega} = 0,236 \not< 1$$

Al cumplirse una de las premisas, no hay posibilidad de ferresonancia periódica para 60 Hz para la primera condición (energización monopolar de una fase.).

Para la segunda condición (transformador energizado y apertura de una fase), la configuración del circuito, despreciando la resistencia de la línea, es la mostrada en la figura 11:

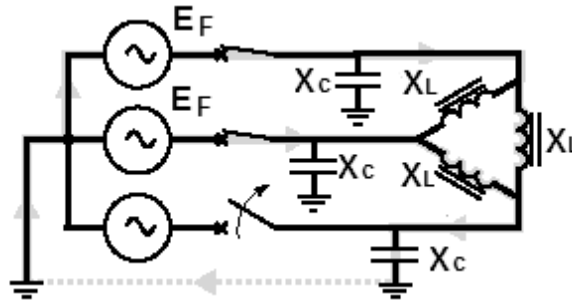


Fig. 11. Configuración del circuito con dos fases cerradas y la apertura de una fase.

El circuito equivalente para el instante de apertura, quedará como se muestra en la figura 12:

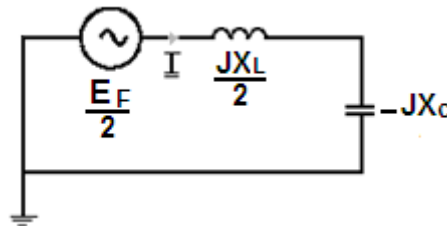


Fig. 12. Circuito equivalente para el instante de apertura de la fase.

En valores equivalentes, las ecuaciones (1 y 2), se transforman en:

$$1) \quad X_{CEQ} > X_{LEQ} = jX_C > \frac{jX_L}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_L} > 0,5$$

$$2) \quad X_{CEQ} < X_{LSEQ} = jX_C < \frac{jX_{LS}}{2}, \quad \frac{jX_C}{jX_{LS}} < 0,5$$

Entonces:

$$\frac{jX_C}{jX_L} = \frac{93,52 \text{ k}\Omega}{997,8 \text{ k}\Omega} = 0,093 \neq 0,5$$

Como no se cumple esta premisa, se verificará la otra.

$$\frac{jX_C}{jX_{LS}} = \frac{93,52 \text{ k}\Omega}{174,3 \text{ k}\Omega} = 0,236 \neq 0,5$$

Este incumplimiento anuncia que existe también la posibilidad de ferorrresonancia periódica para 60 Hz cuando con el transformador energizado se interrumpa una fase.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Basado en el análisis anterior se pueden establecer los márgenes dentro de los cuales habrá posibilidad de ferorrresonancia periódica fundamental y donde los valores de reactancia capacitiva pudieran provocar ferorrresonancia. La tabla 7, los muestra.

<b>Tabla 7. Márgenes con posibilidad de ferorrresonancia periódica fundamental.</b>			
<b>Conexión del primario del transformador.</b>	<b>Condición operacional.</b>	<b>Márgenes donde existe posibilidad de ferorrresonancia</b>	<b>Valores peligrosos de <math>X_c</math>.</b>
<b>Estrella</b>	Cierre de una fase	$3 X_{LS} < X_c < 3 X_L$	$1,5 X_{LS} < X_c < 3 X_L$
	Apertura de una fase	$1,5 X_{LS} < X_c < 1,5 X_L$	
<b>Delta</b>	Cierre de una fase	$X_{LS} < X_c < X_L$	$0,5 X_{LS} < X_c < X_L$
	Apertura de una fase	$0,5 X_{LS} < X_c < 0,5 X_L$	

## CONCLUSIONES

1- A partir del tipo de estructura, conductor, longitud de línea, configuración y parámetros de vacío de los transformadores empleados, el proyectista puede realizar el estudio analítico de las posibilidades de ferorrresonancia periódica en un circuito de distribución.

2. Para que no haya ferorrresonancia periódica fundamental en un circuito con transformador cuyo primario esté en estrella aislada, el valor de la reactancia capacitiva de secuencia cero de la línea no puede estar en el margen comprendido entre 1,5 veces el valor de la reactancia de magnetización por fase del transformador en saturación y 3 veces el valor de su reactancia de magnetización en operación normal.

3. Para que no haya ferorrresonancia periódica fundamental en un circuito con transformador cuyo primario esté en delta, el valor de la reactancia capacitiva de secuencia cero de la línea no puede estar en el margen comprendido entre 0,5 veces el valor de la reactancia de magnetización por fase del transformador en saturación y el valor de su reactancia de magnetización en operación normal.

4. El margen existente y la probabilidad para la ocurrencia de ferorrresonancia periódica fundamental es mayor en circuitos con transformadores cuyos primarios estén en estrella aislada que en delta.

5. Este análisis no debe limitarse a la frecuencia nominal del sistema ya que los casos de resonancia periódica subarmónica pueden presentarse en todas las configuraciones estudiadas, para este caso es necesario recalcular las reactancias inductiva y capacitiva para las frecuencias de los armónicos que se vayan a analizar.

## REFERENCIAS

[1]. WALLING, R.A., "Ferroresonance in Low-Loss Distribution Transformers". IEEE Power Engineering Society General Meeting, Conference Proceedings, 2003, vol.2, [consulta: noviembre 2012], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1270502>, Print ISBN: 0-7803-7989-6.

[2]. HERNÁNDEZ, O.; *et al.*, "Investigación de la falla masiva de transformadores de distribución en la OBE. Jagüey Grande". Revista Ingeniería Energética. 2004, vol.25, n.3, p. 54-63, ISSN 1815-5901.

- [3]. Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingeniería. "Análisis de la ferorrresonancia en transformadores de distribución tipo normal y pedestal". Proyecto Colciencias-Univalle-Magnetron, S.A. Informe Final, Santiago de Cali, Colombia, 2001, p. 54-62.
- [4]. FERRACI, P., "La Ferrorrresonancia". Cuaderno Técnico No. 190, Biblioteca Técnica Schneider Electric, España, 2000, p. 2-11.
- [5]. PATEL, B.; *et al.*, "Simulation of ferorrresonance with hysteresis model of transformer at no-load measured in laboratory". IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, Hyderabad, 19-21 nov. 2008, p. 1-6, [consulta: noviembre 2012], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4766386>.
- [6]. GRAIGER, J.J.; STEVENSON, W.D., "PowerSystems Analysis". London, England: McGraw-Hill Inc., 1994, ISBN: 0-07-061243-5.
- [7]. LLAMO, H. S., "Cálculo automatizado para el diseño de las líneas de transmisión de energía eléctrica". [Tesis de Doctorado], La Habana, Cuba, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, (Cujae), 1995, p. 101-106.
- [8]. RABAH, D., "Evaluation of the zero sequence impedance of overhead high voltage lines". World Academy of Science, Engineering and Technology, 2013, vol.78, [consulta: septiembre 2013], Disponible en: <http://waset.org/Publications/evaluation-of-the-zero-sequence-impedance-of-overhead-high-voltage-lines/8395>, ISSN 2010-376X, 2010-3778.

## AUTORES

### **Orestes Hernández Areu**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador Titular del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.  
e-mail: oresteh@electrica.cujae.edu.cu

### **Héctor Silvio Llamo Laborí**

Ingeniero Electricista, MSc en Sistemas Electroenergéticos, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.  
e-mail: hllamo@electrica.cujae.edu.cu

### **Raul Lorenzo Llanes**

Ingeniero Electricista. Profesor Asistente del Dpto. Docente del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.