

## APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

# Investigación de la falla masiva de transformadores de distribución en la OBE JAGÜEY GRANDE

Orestes Hernández  
Dora Terrero  
José G. Sánchez

Recibido: Septiembre del 2004  
Aprobado: Noviembre del 2004

### Resumen / Abstract

Se presentan los resultados del estudio realizado en la Organización Básica Eléctrica de Jagüey Grande de la provincia de Matanzas de Cuba a transformadores de distribución que fallaron masivamente. Estos equipos se encontraban instalados para alimentar las bombas del sistema de regadío de un plan citrícola de esta región. Se trataba de un gran número de transformadores de la fábrica Magnetron completamente nuevos que fallaban en el momento de su energización o a partir de algún tipo de manipulación u operación. Todos estos equipos poseían sus certificaciones de haber pasado satisfactoriamente las pruebas de rutina y prototipo. Existía el testimonio de operarios de que en los momentos de ocurrencia de las averías no había descargas atmosféricas ni indicios de contingencias en el sistema eléctrico. Con todos estos elementos y ante una reclamación hecha del OBE a la Fábrica de Transformadores Latino, se comenzaron las pesquisas en este trabajo, las cuales conducían a que se estaba en presencia del fenómeno de ferorresonancia.

Palabras clave: ferorresonancia, transitorios en transformadores, transformadores

*The results of the study are presented carried out in the Electric Basic Organization (EBO) of Jagüey Grande of the Country of Matanzas from Cuba to distribution transformers that failed massively. These equipments were installed to feed the bombs of the system of irrigable of a big citric fruit project of this region. They were a great number of totally new transformers of the factory Magnetron that failed in the moment of their connection or starting from some type of manipulation or operation. All these equipments possessed their certifications of having passed the routine tests and prototype satisfactorily. It existed the testimony of operatives that in the moments of occurrence of the damage there were not atmospheric discharges neither indications of contingencies in the electric system. With all these elements and before a reclamation made from the EBO to the Latin Factory of Transformers, the investigations were begun in this work, which drove to the ferorresonance phenomenon*

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

### INTRODUCCIÓN

Durante la visita al OBE Jagüey Grande, con motivo de una falla masiva de transformadores de distribución se pudieron realizar las siguientes observaciones:

- Habían fallado 23 transformadores, algunos con signos de sobrecorrientes mantenidas, otros con fallas limpias de sobretensión.
- Durante la recepción de los equipos en el OBE, se les midió la resistencia de aislamiento, teniendo todos valores del orden de gigaohms.

- Todos los transformadores eran nuevos habiendo pasado satisfactoriamente las pruebas de rutina.
- Todas las contingencias se verificaron en bancos de transformadores trifásicos, con servicio de 4 hilos y en solo uno de los equipos que los formaban.
- Los equipos eran todos marca Magnetron, de 19100 / 240 - 480 V, de BIL 150 kV.
- De estos, 6 de 75 kVA, 11 de 50 kVA, 2 de 37.5 kVA, y 4 de 25 kVA.

- Se acuerda enviar los equipos fallados para la Fábrica Latino a fin de que sean estudiados conjuntamente con el CIPEL.

Se realizó una segunda visita al OBE Jagüey Grande con un especialista de la Fábrica Magnetrón y se tomaron, entre otros, los siguientes acuerdos:

- Se reconocen debilidades en la instalación y manipulación de los equipos.
- Reforzar el aislamiento entre el núcleo y las bobinas.
- Aumentar las distancias aislantes entre las partes vivas de los terminales de alta tensión hasta 33,00 cm y entre las campanas de los propios aisladores a 20,30 cm.
- Teniendo en cuenta los problemas que tradicionalmente ha presentado la zona de Jagüey en cuanto a sus valores de aterramiento, nivel cerámico y sobretensiones por diversos orígenes, se acuerda, solicitar los próximos transformadores con un BIL DE 200 kV, como también se norma para la clase de aislamiento 34,5 kV.
- Coordinar un estudio de tierras y ferorrresonancia entre el CIPEL y la Fábrica Latino.

## DESARROLLO

### Generalidades

El término de ferorrresonancia apareció por primera vez en la literatura<sup>1</sup> en el año 1920.

Este término caracteriza a todos los fenómenos oscilatorios que aparecen en un circuito eléctrico que tenga al menos:

- Una inductancia no lineal (ferromagnética saturable).
- Una capacitancia de valor apreciable.
- Una fuente de energía (generalmente sinusoidal).
- Pocas pérdidas.

Las redes eléctricas son susceptibles de presentar configuraciones propicias para la ocurrencia de ferorrresonancia dado que en estas existen:

a) Inductancias saturables en los transformadores de potencia, transformadores de tensión o potencial (que sean inductivos), en las reactancias *shunt* del sistema.

b) Capacitancias en los cables, líneas largas, transformadores de tensión o potencial (capacitivos), aisladores y sistema de aislamiento propio del transformador, condensadores de compensación serie o paralelo, condensadores de las cámaras de extinción de arcos en interruptores automáticos, etcétera.

La principal característica de este fenómeno es la de transitar bruscamente de un régimen estable, al menos, a otro régimen estable:

1. Estado estable normal con tensión sinusoidal a la frecuencia de la red.
2. Estado estable anormal ferorrresonante con sobretensiones.
3. Estado estable anormal ferorrresonante con sobrecorrientes de gran contenido y amplitud de armónicos muy peligrosos para los equipos, conocido como resonancia armónica.

Aparece después de algún proceso transitorio que puede ser:

- Sobretensiones externas (atmosféricas).
- Conexión o desconexión de transformadores.
- Conexión o desconexión de cargas.
- Aparición o eliminación de fallas.
- Trabajos con líneas energizadas.

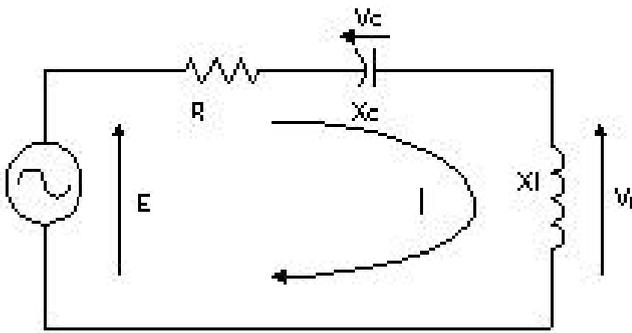
La probabilidad de que un sistema eléctrico tenga averías en sus equipos o irregularidad en la prestación del servicio por causa de sobretensiones originadas por ferorrresonancia, está determinada considerablemente por la configuración del sistema y la manera en que esté operando, así como por las características de los equipos instalados en él. Actualmente, en los sistemas de distribución, los transformadores conectados con cables monopares apantallados han encontrado gran aplicación y es así como se pueden encontrar en las áreas más congestionadas de las ciudades.

Estas aplicaciones están caracterizadas normalmente por un transformador trifásico, bancos trifásicos o transformador monofásico alimentados por medio de cables subterráneos, desde un circuito de distribución primario. En ciertas condiciones especiales, la configuración (cable - transformador) puede presentar sobretensión como resultado de la resonancia entre la capacitancia asociada al cable de conexión y la inductancia del transformador.

También cuando en un circuito trifásico la energización o desenergización de una o dos fases del sistema, se realiza utilizando dispositivos de interrupción monopares o por la operación de protecciones como fusibles, las reactancias capacitivas quedan conectadas en serie con la reactancia inductiva del transformador, creándose las condiciones para la ferorrresonancia.

### Definición de resonancia serie

Dentro del fenómeno de resonancia, se encuentra el caso de resonancia serie en régimen sinusoidal, donde  $V = E \sin W t$  (figura 1).



Resonancia serie.

1

La relación entre las tensiones se puede expresar con la siguiente forma vectorial:

$$V = V_R + V_L + V_C \quad \dots(1)$$

En este caso particular, cuando las reactancias inductiva y capacitiva son iguales, las tensiones en los terminales del condensador y de la inductancia son iguales y se compensan, solo queda la tensión  $V_R$  en la resistencia. Se dice entonces, que el circuito está en resonancia. Es decir, que la resonancia ocurre cuando:

$$V_L = V_C, \text{ o sea que; } IX_L = IX_C \text{ o también; } \\ I W_L = I / WC.$$

La frecuencia angular  $W_n$  para la que esto ocurre, es tal que  $LC(W_n)^2 = 1$  y es  $W_n = 1 / \sqrt{LC}$ .

La amplitud de la corriente  $I$  es igual a:  $I = E / R$ .

La amplitud de la tensión en los terminales del condensador de la inductancia es igual a  $k E$ . El factor  $k$  tiene la siguiente expresión:

$$k = L W_n / R = 1 / (R C W_n). \text{ Se conoce como factor de calidad.}$$

Según el valor de  $k$  la amplitud de la tensión  $V_L$  o  $V_C$  puede ser superior o inferior a la amplitud  $E$  de la tensión de excitación  $V$ .

Se verifica también la resonancia armónica cuando ciertos equipos (motores de velocidad variable, rectificadores estáticos, etc.) generan una frecuencia angular de resonancia igual a  $n W_o$ , siendo  $W_o$  la frecuencia angular de la red.

La resonancia armónica puede también dañar el material aislante y el equipo como tal.

### Definición de ferorrresonancia

La ferorrresonancia,<sup>2</sup> es un caso especial de resonancia serie que ocurre en circuitos como el de la figura 1 en el cual la resistencia es despreciable y cuando las magnitudes de la reactancia capacitiva e inductiva se acercan en su valor, por tener signos opuestos, la impedancia total vista por la fuente se reduce, provocando corrientes elevadas que pueden ocasionar la desconexión del circuito o causar tensiones elevadas tanto en  $X_L$  como en  $X_C$ . La característica de la inductancia determina la diferencia entre resonancia simple y ferorrresonancia.

Las diferencias fundamentales de un circuito ferorrresonante respecto a un circuito resonante lineal son, para una frecuencia angular dada:

1. La posibilidad de resonar dentro de una gran gama de valores de  $C$ .
2. La frecuencia de las ondas de tensión y las corrientes que pueden ser diferentes de las de la fuente de tensión sinusoidal.
3. La existencia de varios regímenes permanentes estables para una configuración y valores de parámetros dados. Uno de estos regímenes es el régimen normal estable, los otros regímenes anormales son peligrosos para el equipamiento. El régimen que se alcance depende de las condiciones iniciales (cargas eléctricas de los condensadores, flujo remanente del núcleo magnético, el instante de conexión).

### Ferorrresonancia en sistemas de distribución<sup>2</sup>

Si la energización de un transformador se realiza en forma secuencial, cerrando una por una sus líneas, pudiendo estar el devanado primario aterrado o no y preferentemente si la fuente del sistema está sólidamente aterrada, las capacitancias a tierra de las fases no cerradas actúan como un cortocircuito, de tal manera que las fases del transformador conectadas a la línea cerrada comienzan a tomar su corriente de inrush o corrientes de excitación.

Una fase energizada en serie con la inductancia del devanado del transformador y con la capacitancia a tierra del circuito conforma un circuito eléctrico que puede reunir las condiciones de resonante.

En dependencia de la magnitud del flujo residual en el núcleo o de si el cierre del circuito se hace cercano o en el momento en que la onda de tensión pasa por cero, el núcleo puede ser llevado a saturación. En este caso un gran pico de corriente fluye en los devanados energizados, teniendo su trayectoria a tierra

a través de las capacitancias a tierra de las líneas abiertas. En el siguiente medio ciclo, el núcleo se satura pero en la dirección opuesta.

Las figuras 2 y 3 ilustran posibles circuitos LC serie que se presentan ante la interrupción de una o dos fases con una fuente trifásica sólidamente aterrada que alimenta un transformador conectado entre fases.

Cuando la ferorrresonancia se presenta en un sistema de distribución puede causar las siguientes anomalías, fácilmente medibles y observables:

- Altas tensiones de línea o de fase, con picos que pueden superar en muchas veces el voltaje de condiciones normales.
- Excesivo ruido audible en el transformador debido principalmente a magnetostricción.
- Ondas de tensión y corriente extremadamente distorsionadas.

Las sobretensiones, sobrecorrientes y distorsiones en las ondas, provocan sobreesfuerzos térmicos o dieléctricos frecuentemente peligrosos para los materiales eléctricos (destrucción, pérdida de propiedades y envejecimiento acelerado).

#### ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA FERORRESONANCIA

La operación de un transformador en condiciones de ferorrresonancia<sup>2</sup> puede ser explicada gráficamente. Si el transformador se encuentra en vacío y se asume que la resistencia del circuito de la figura 1 es igual a cero, se obtiene el comportamiento estacionario de la tensión.

$$E = V_L + V_C \quad \dots(2)$$

$$V_L = E - V_C \quad \dots(3)$$

Como:

$$V_C = - I / WC.$$

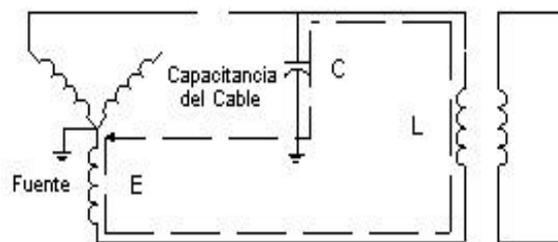
Entonces:

$$V_L = E + (I / WC) \quad \dots(4)$$

Como también, la relación entre la tensión y la corriente del transformador está dada por la curva de magnetización, entonces los puntos de operación en resonancia quedan definidos como las intersecciones de la característica de magnetización con la curva que representa el efecto combinado de la fuente y la capacitancia, o sea, el término  $E + (I / WC)$  de la ecuación 4, que corresponde a una recta con pendiente  $1 / WC$  (figura 4).

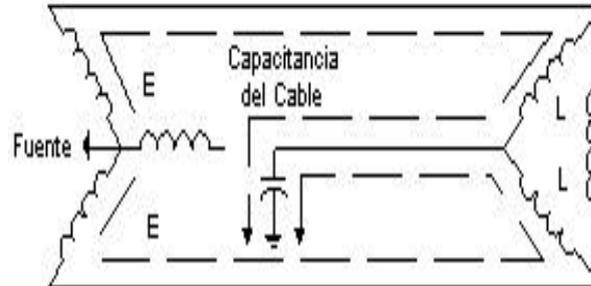
En la figura 4 se observan tres puntos de intersección que satisfacen la ecuación (4) y son definidos como los puntos de operación en resonancia.

Si se incrementa la capacitancia hasta un valor suficiente que se define como capacitancia crítica, los puntos de operación A y B se pueden eliminar dejando solo la solución en el punto de operación C. Si esto sucede, entonces el circuito se encuentra operando solamente en ferorrresonancia y la corriente se encontrará adelantada al voltaje, por lo que el circuito será predominantemente capacitivo (figura 5).



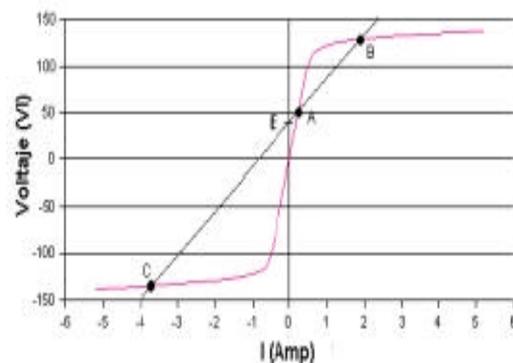
Transformador monofásico con una línea energizada.

2



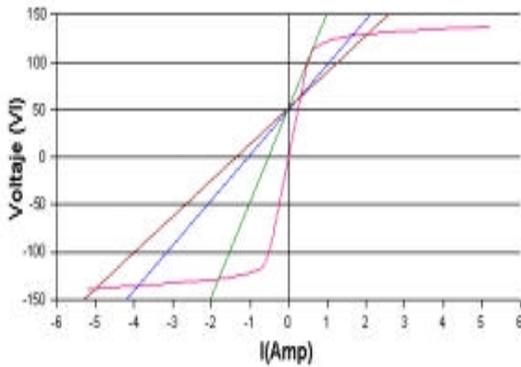
Transformador trifásico con dos fases energizadas.

3



Puntos de operación en ferorrresonancia.

4



Solución del circuito variando la capacitancia.

5

**ANÁLISIS FÍSICO DE LA FERRORESONANCIA**

El estudio de las oscilaciones libres del circuito de la figura 6a) permite ilustrar este comportamiento particular. Las pérdidas se consideran despreciables y la característica  $\Phi(i)$  simplificada de la bobina con núcleo de hierro es la representada en la figura 6b).

A pesar de estas hipótesis simplificativas, las formas de onda correspondientes (figura 6c), son características de un régimen de ferorrresonancia periódica.

Al principio, la tensión en los bornes de la capacitancia se supone igual a  $V_0$ .

En el instante  $t_0$ , el interruptor  $K$  se cierra y se establece una corriente que oscila a la  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ . Las expresiones del flujo dentro de la bobina y de la tensión  $V_c$  en los bornes del capacitor son entonces:

$$\Phi = (V_0 / W_1) \text{sen } W_1 t$$

$$V_c = V_0 \text{cos } W_1 t$$

- Si  $V_0 / W_1 > \Phi_{\text{sat}}$ , al final del tiempo  $t_1$  el flujo  $\Phi$  alcanza el flujo de saturación  $\Phi_{\text{sat}}$ , la tensión  $V$  alcanza  $V_1$  y la inductancia de la bobina saturada pasa a ser  $L_s$ . Como  $L_s$  es mucho menor que  $L$ , el capacitor se descarga bruscamente a través de la bobina, bajo la forma de una oscilación de pulsación

$$W_2 = 1/\sqrt{L_s C}$$

- La corriente y el flujo pasan por un máximo cuando la energía electromagnética almacenada por la bobina es igual a la energía electrostática  $1/2 C V_1^2$  devuelta por el capacitor.
- En el instante  $t_2$ , el flujo vuelve a ser el de saturación  $\Phi_{\text{sat}}$ , la inductancia toma de nuevo el valor  $L$  y como las pérdidas se han considerado despreciables, la tensión  $V$ , que es inversa, es igual a  $-V_1$ .

- En el instante  $t_3$ , el flujo alcanza  $\Phi_{\text{sat}}$  y la tensión  $V$  es igual a  $V_2$ .
- Como en la práctica  $W_1$  es muy pequeña, se puede considerar  $V_2 \approx V_1 \approx V_0$ .

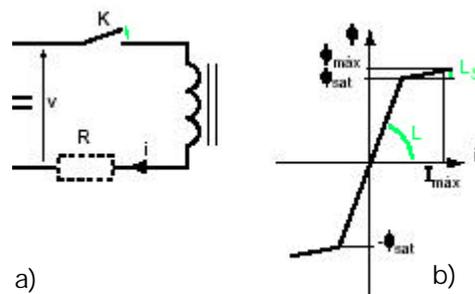
Por consiguiente, el periodo  $T$  de oscilación queda comprendido entre  $2 \pi \sqrt{LC}$  en el caso de no saturación, y  $2 \pi \sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$  en el caso de saturación (siendo  $t_3 - t_2 \sim 2 \Phi_{\text{sat}} / V_0$ ).

La frecuencia  $f$  correspondiente ( $f = 1/T$ ) es tal que:

$$1/(2 \pi \sqrt{LC}) < f < 1/(2 \pi \sqrt{L_s C})$$

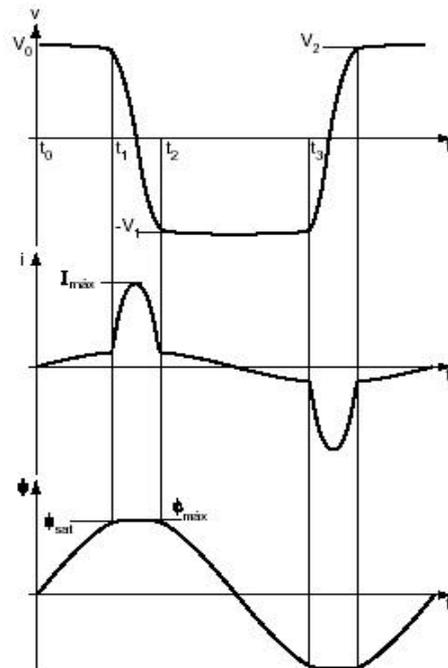
Esta frecuencia inicial depende del flujo de saturación, es decir, de la no linealidad y de la condición inicial  $V_0$ .

En la práctica, debido a las pérdidas por efecto Joule, en la resistencia  $R$  (sobre todo en cada inversión de tensión), la amplitud de la tensión decrece ( $V_2 < V_1 < V_0$ ).



a)

b)



Oscilaciones libres de un circuito ferorrresonante serie:

- a) Esquema de principio; b) Característica simplificada;
- c) Tensión, corriente y flujo en función del tiempo.

6

## CÓMO IDENTIFICAR LA FERRORESONANCIA

La ferorrresonancia se manifiesta por varios de los siguientes síntomas:<sup>1</sup>

- Sobretensiones permanentes elevadas entre fases o entre fases y tierra.
- Sobrecorrientes permanentes elevadas.
- Grandes distorsiones de las formas de onda de tensión y corriente.
- Desplazamiento de la tensión del punto neutro.
- Calentamiento de los transformadores aunque funcionen sin carga.
- Ruido permanente y excesivamente fuerte dentro de los transformadores.
- Destrucción de materiales eléctricos por efectos térmicos o por roturas dieléctricas. Un síntoma característico de la destrucción de los transformadores por ferorrresonancia es que el enrollamiento primario está destruido y el secundario intacto.
- Disparo de protecciones que puede parecer innecesario.

Alguno de estos síntomas no son únicamente propios del fenómeno de ferorrresonancia. El desplazamiento permanente del punto neutro de una red con neutro aislado puede ser también consecuencia, por ejemplo, de un defecto entre una fase y tierra.

Ante la dificultad del diagnóstico por falta de datos, cuando se presenten los síntomas, lo primero que debe observarse es la configuración de la red, así como los acontecimientos que los preceden (conexión de transformadores, momento concreto del desarrollo de los procesos industriales, pérdida de carga, etc.) y que han podido iniciar el fenómeno.

Por lo tanto, es necesario determinar si se reúnen las tres condiciones necesarias, pero no suficientes, para la existencia de la ferorrresonancia:

1. Conexión simultánea de capacitores y bobinas de inductancia no lineal.
2. Existencia dentro de la red de al menos un punto cuyo potencial no es fijo (neutro aislado, fusión de un fusible, maniobra unipolar, etcétera).
3. Componentes de la red poco cargados (transformadores de potencia bajos cargados o en vacío) o fuentes de pequeña potencia de cortocircuito (generadores).

Si no se verifica alguna de estas condiciones, la ferorrresonancia es muy poco probable. En caso contrario se necesitarán estudios más exhaustivos; así mismo, se puede efectuar un estudio preventivo.

Una comparación con los ejemplos de situaciones típicas de redes propicias a la ferorrresonancia puede

facilitar la identificación de una configuración propensa al riesgo.

### Ejemplos de situaciones de redes eléctricas propicias a la ferorrresonancia

Dada la multitud de capacitancias e inductancias que se hallan en una red real y la gran variedad de condiciones de explotación, las condiciones propicias a la ferorrresonancia son innumerables.

La experiencia hace posible citar las configuraciones más típicas que muestran una propensión a la ferorrresonancia. A continuación se dan algunos ejemplos típicos:

a) Transformador de potencial alimentado a través de la capacitancia de uno o varios interruptores automáticos abiertos.<sup>3</sup>

En las maniobras de apertura de un interruptor automático por separación de juego de barras o para aislar una falla, se puede provocar la ferorrresonancia de los transformadores de potencial conectados entre fase y tierra.

Esta configuración se ilustra en el circuito de la figura 7.

La apertura del interruptor automático *D* inicia el fenómeno al provocar la descarga de la capacidad *C* a través de *TT* que se satura. La alimentación del *TT* a través de los condensadores *Cd* (de distribución de tensión entre las cámaras de extinción de arco del interruptor automático) inicia el fenómeno.

La capacidad *C* representa el conjunto de las capacidades a tierra del *TT* y de la conexión alimentada mediante las capacidades del o de los interruptores automáticos abiertos.

b) Transformadores de potencial (*TT*) conectados a una red con neutro aislado.

Este régimen de neutro aislado puede presentarse por el acoplamiento de una fuente de emergencia con el neutro aislado o por un fallo del sistema de puesta a tierra.

Las sobrecorrientes o sobretensiones transitorias debidas, por ejemplo, a ciertas maniobras en la red (pérdidas de carga, eliminación de fallas) o a fallos de tierra pueden iniciar el fenómeno saturando el circuito magnético de uno o de dos de los *TT* del circuito ferorrresonante paralelo de la figura 8.

El régimen ferorrresonante se evidencia por las tensiones entre fases y tierra y por la tensión del punto neutro ( $V_0$ ).

Hay desplazamiento del punto neutro y una subida de la tensión respecto a la tierra de una o de dos fases. Esto puede dar la impresión de un defecto de aislamiento fase tierra en la red.

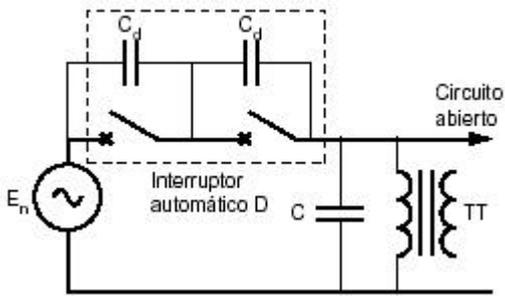
Los valores de las sobretensiones pueden sobrepasar en régimen estable los valores de la tensión compuesta y provocar una destrucción dieléctrica del material eléctrico.

c) Transformador de potencia alimentado accidentalmente sobre una o dos fases.

En la figura 9 se presentan algunos ejemplos de configuraciones propicias a la ferorrresonancia. Estas aparecen cuando un transformador en vacío o muy poco cargado:

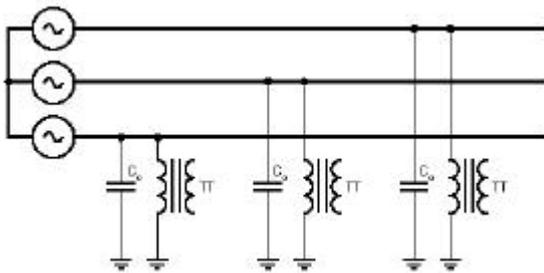
- Se alimenta de una red con una o dos fases.
- Después de la fusión de un fusible.
- Cuando se rompe un conductor o se realizan trabajos en caliente que impliquen conexión o desconexión de líneas.

Las capacidades, como ya se dijo, pueden ser las de los aisladores y sistema de aislamiento, las de una línea o un cable que alimente a un transformador cuyos arrollamientos primarios están conectados en estrella con neutro aislado, con neutro a tierra, o en delta.



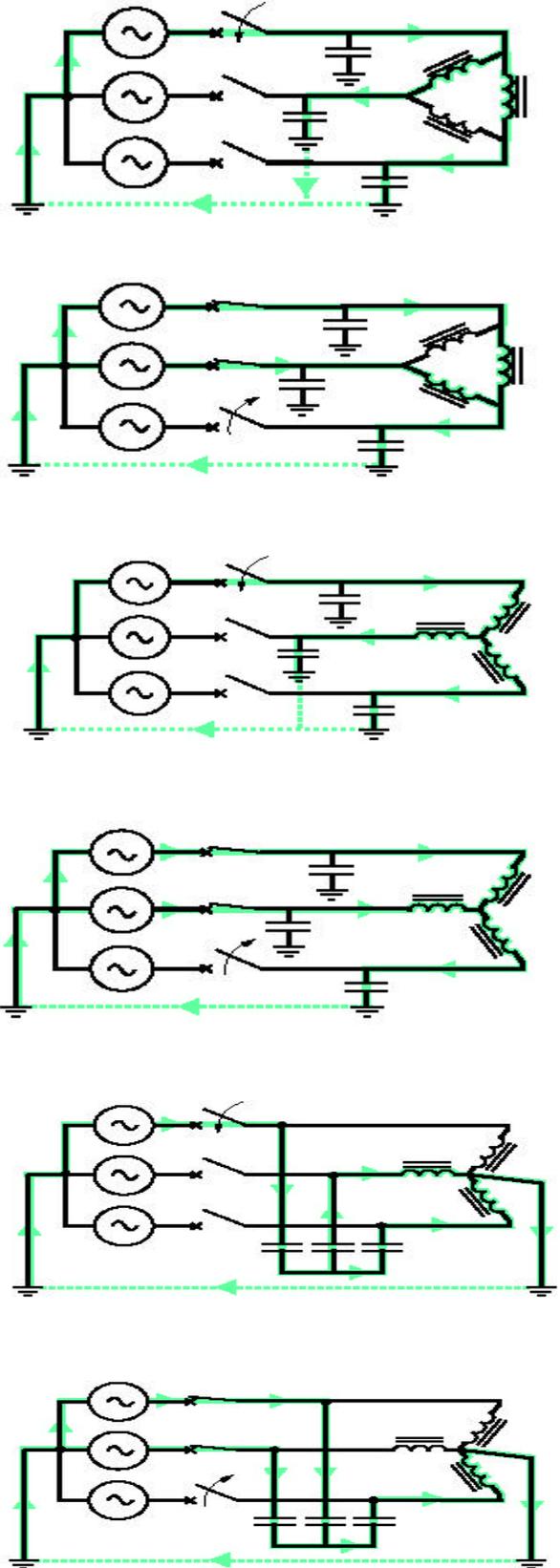
Ferorrresonancia de un transformador de potencial con un interruptor abierto.

7



$C_o$ : Capacidad monofásica de la red. Ferorrresonancia de un transformador de potencial en serie con un disyuntor abierto.

8



Ejemplos de conexiones en transformadores de potencia con riesgo de ferorrresonancia.

9

Por ejemplo, un circuito ferorrresonante serie se constituye al poner en serie la capacidad fase-tierra de la fase abierta y la impedancia magnetizante del transformador.

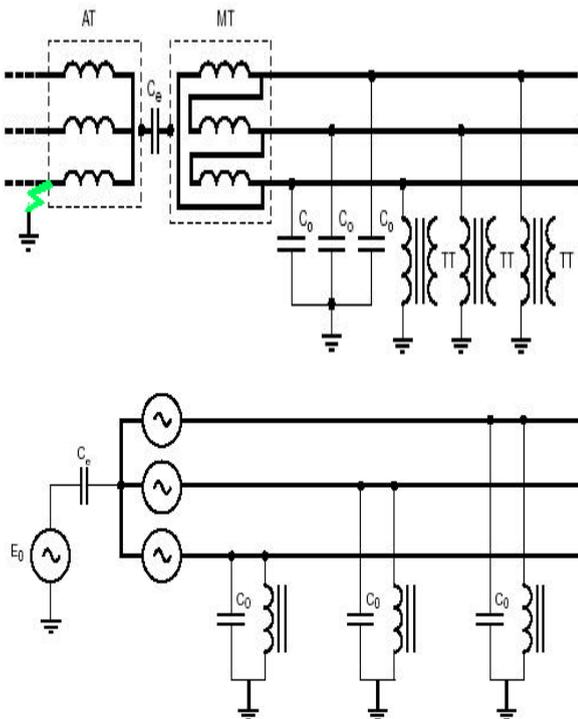
Para evitar riesgos, es conveniente utilizar elementos de seccionalización o corte trifásicos.

d) Transformador de potencial y transformadores de potencia AT/MT con neutro aislado.

El fenómeno puede producirse cuando los neutros *AT* y *MT* están aislados de tierra y los *TT* se conectan al lado *MT* entre fase y tierra y no están alimentando ninguna carga (figura 10).

Cuando hay un fallo a tierra por el lado de *AT* aguas arriba de la subestación de transformación, el neutro del lado de *AT* alcanza un potencial elevado.

Por efecto capacitivo entre primario y secundario aparecen unas sobretensiones en el lado *MT* y pueden provocar la ferorrresonancia del circuito constituido por la fuente de tensión  $E_0$ , las capacidades  $C_e$  y  $C_0$  y la inductancia de magnetización de un transformador de potencial (figura 10).



Ferorrresonancia de transformadores de potencial entre fase y tierra con transformador de potencia con neutro aislado: a) Red con un fallo por el lado de alta tensión; b) Esquema equivalente.

$E_0$ : Tensión monofásica del lado de *AT*.

$C_e$ : Capacitancia entre el devanado de *AT* y *MT*.

$C_0$ : Capacitancia monofásica de la red de *MT*.

Después de que haya desaparecido el fallo por *AT*, la tensión del neutro *AT*, debido a un desequilibrio natural de la red puede ser suficiente para mantener el fenómeno.

e) Transformador de potencia alimentado por una red muy capacitiva y de poca potencia de cortocircuito.

El fenómeno de la ferorrresonancia puede aparecer cuando un transformador de potencia, en vacío, se alimenta bruscamente con una fuente de baja potencia de cortocircuito con respecto a la potencia nominal del transformador mediante un cable o una línea larga.

Este es el caso, por ejemplo, del restablecimiento del servicio de una red de media tensión, residencial o industrial, pero también cuando se conecta una red de media tensión rural muy larga (figura 11) o cuando la proporción de cables subterráneos aumenta (por fiabilidad y por respeto al medio ambiente).

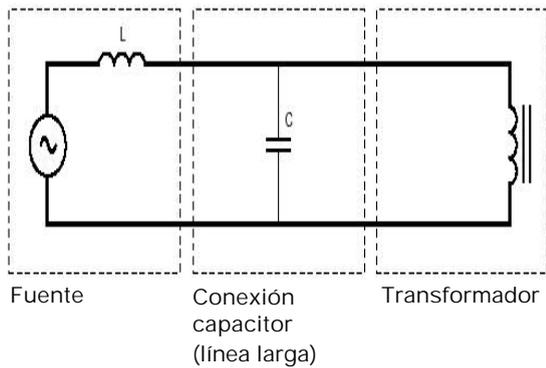
Esta ferorrresonancia paralela (capacidad en paralelo con la inductancia magnetizante del transformador) es generalmente trifásica.

En resumen, las configuraciones de redes eléctricas que pueden quedar afectadas por la ferorrresonancia son innumerables. La experiencia permite identificar algunas que merecen una especial atención, estas son:

1. Transformador de potencial entre fase y tierra en una red con neutro aislado.
2. Conexiones largas y(o) capacitivas que alimentan un transformador de potencia.
3. Protección con fusibles cuya fusión produce un corte no omnipolar.
4. Transformador de potencia o de potencial en vacío o poco cargado.

Los fenómenos que más frecuentemente pueden provocar la ferorrresonancia son:

- a) Maniobra de capacitores y de líneas sin carga.
- b) Fallos de aislamiento.
- c) Descargas atmosféricas.
- d) Maniobra de transformadores sin carga.



Esquema equivalente de un transformador de potencia en vacío alimentado por una red capacitiva.

11

### ¿CÓMO EVITAR O AMORTIGUAR LA FERRORESONANCIA?

La publicación 71 de la IEC<sup>4</sup> especifica que las sobretensiones temporales de la ferorrresonancia "se deben evitar y limitar". "No se deben considerar como base para la elección de la tensión de un pararrayos o para el diseño de aislantes si estos medios no son suficientes". Esto significa que el procedimiento de coordinación de aislamiento no considera los niveles de sobretensiones debidos a la ferorrresonancia y por consiguiente los pararrayos (cuya tensión residual es en general mucho mayor que las sobretensiones debidas a la ferorrresonancia) no constituyen una protección contra este fenómeno.

#### Soluciones prácticas

La aplicación de estos principios lleva a recomendar soluciones prácticas,<sup>5</sup> algunas de las cuales se detallan a continuación, especialmente para el caso de configuraciones propicias a la aparición de ferorrresonancia.

1. Evitar, por diseño y(o) por las maniobras apropiadas, encontrarse en una configuración propensa a la ferorrresonancia. Esto implica la eliminación de ciertos esquemas de explotación, de ciertas maniobras en las redes y el uso de desconectivos tripolares.
2. En una red con neutro aislado, evitar conectar los primarios de transformadores de potencial en estrella con neutro primario a tierra, ya sea dejando el neutro de los primarios de los transformadores de potencial aislados o conectándolos en delta.
3. Usar una carga resistiva permanente en el banco de transformadores que sea del 1,3 % de la capacidad nominal del banco.

### ANÁLISIS DE LOS CASOS OBJETO DE ESTUDIO

En este caso específico:

- Todas las contingencias se verificaron en bancos de transformadores trifásicos, con servicio de 4 hilos y en solo uno de los equipos que los formaban.

- Los bancos tenían conexión estrella aislada por el primario – delta por el lado de baja tensión, con tap central aterrado en una de las fases y el sistema de alimentación por alta tensión, aterrado también, aunque sin neutro presente en el circuito.

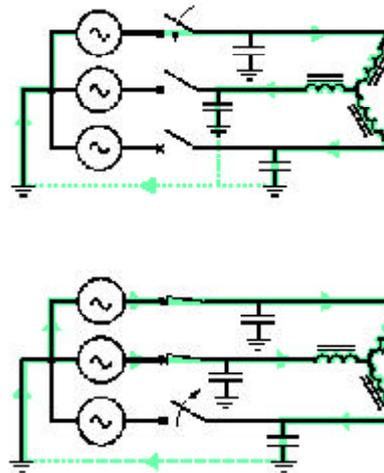
- En el momento de la conexión, habían ocurrido 7 fallos en los casos restantes, las averías se verificaban con algún tipo de operación o manipulación en el sistema o el banco de transformadores.

- En todos los casos la conexión del banco de transformadores se realiza con interruptores portafusibles (*drop outs*) monopolares y estando los equipos en vacío.

- El régimen de carga de los puntos de transformación es muy bajo.

- La mayoría de las líneas tienen una extensión de más de 80 km.

Los circuitos que se forman cuando se realiza la manipulación de los *drop outs* de forma monopolar son los que se presentan en la figura 12.



Circuitos que se forman cuando se realiza la manipulación de los *drop out* de forma monopolar:

- a) Cuando cierra el primer portafusible;
- b) Cuando se abre un portafusible.

12

Modelación en ATP de los circuitos donde **ocurrieron los fallos**

Mediante el ATP se simularon los circuitos objeto de estudio.

A las líneas de estos circuitos, de acuerdo con su configuración, longitud, calibre del conductor, altura de las líneas y estructuras; se les determinaron los valores inductivos, resistivos y capacitivos.

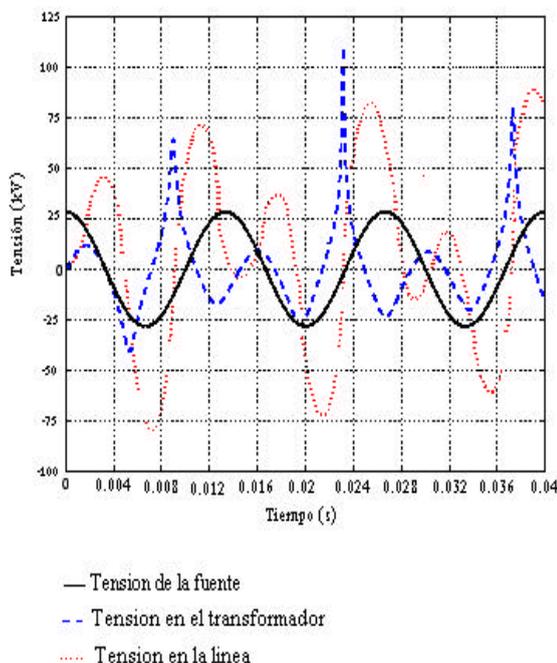
De cada transformador fallado se obtuvo la característica de inducción electromagnética en valores de concatenaciones del flujo (Wb - vuelta) y corriente de excitación (A).

Se corrieron todos los modelos obtenidos y todos los valores de tensiones que aparecían en el devanado primario del transformador, excedían en más de 3 pu la tensión de la fuente o sistema durante tiempos prolongados.

Los picos de corriente verificados, son muestra de que se encuentran en resonancia en serie las capacitancias inherentes al circuito y las inductancias de los transformadores.

A continuación se muestra un ejemplo gráfico de los resultados de la simulación en un circuito de 75 km de longitud, con conductor de aluminio de calibre 150 mm<sup>2</sup>.

Las estructuras son de tipo A (con cruceta de 9 pies), o sea, todos los aisladores están a una misma altura. Los parámetros del transformador son: Transformador monofásico, en banco trifásico, marca Magnetron, de 50 kVA, 19 100 / 240 – 480 V. Los resultados se muestran en la figura 13.



Gráfica de resultados.

13

## CONCLUSIONES

1. Existen las condiciones necesarias y suficientes para que se pueda verificar el fenómeno de ferorrresonancia en todos los casos analizados de acuerdo con las situaciones de operación que presentan.

2. Se realizaron estudios de la totalidad de los circuitos donde ocurrieron los fallos, simulando los mismos en ATP. El resultado fue conclusivo en que, en todos los casos, fue la ferorrresonancia la que originó el fallo masivo.

## RECOMENDACIONES

De acuerdo con las condiciones materiales que presenta el OBE, como recomendación se propone adoptar la configuración estrella abierta – delta abierta.

Esta configuración permite, que para el mismo lugar de localización del punto de transformación, haya un cambio sustancial en las magnitudes equivalentes de reactancias capacitiva e inductiva alejándolos de los valores que provocaban la resonancia.

La opción es factible si se tiene en cuenta que los transformadores están trabajando en un régimen de carga muy bajo, lo cual permite reducir la capacidad del banco.

## REFERENCIAS

1. Ferrari, P.: *Cuaderno Técnico Schneider*, No. 190, p. 4, Francia, 1997.
2. UNIVALLE y MAGNETRON. *Análisis de ferorrresonancia en transformadores de distribución conectados con cables*, Colombia, 2001.
3. Dupraz, J. P.: *Transformateurs de mesure - Généralités*. Théorie, Fonctionnement, Francia, 1995.
4. IEC 71 1994 . *Coordinación del aislamiento*.
5. *Publicación E - 760 de la Ebasco*, EE. UU., 1992.

## AUTORES

Orestes Hernández Areu

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

Dora Terrero Janer

Ingeniero Electricista, Fábrica de Transformadores Latino, Ciudad de La Habana, Cuba  
 e-mail:latino@obe.ch.cu

José G. Sánchez Glean

Ingeniero Electricista, Departamento de Alta Tensión, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana Cuba  
 e-mail:jguillermo@electrica.cujae.edu.cu