

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 734 214**

51 Int. Cl.:

**H02H 5/04** (2006.01)  
**H02H 3/04** (2006.01)  
**H02H 3/253** (2006.01)  
**H02K 11/00** (2006.01)  
**G01R 31/02** (2006.01)  
**G01R 31/06** (2006.01)  
**H02H 3/16** (2006.01)  
**H02P 29/024** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.02.2014 PCT/US2014/017678**  
 87 Fecha y número de publicación internacional: **27.08.2015 WO15126412**  
 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.02.2014 E 14882846 (0)**  
 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.04.2019 EP 3108556**

54 Título: **Método para detectar una condición de fase abierta de un transformador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**04.12.2019**

73 Titular/es:  
**THE UAB RESEARCH FOUNDATION (100.0%)  
701 20th Street South, 770 Administration  
Building  
Birmingham, AL 35294-0107, US**

72 Inventor/es:  
**ARRITT, ROBERT, F.;  
DUGAN, ROGER, C.;  
JOHNSON, WAYNE, E. y  
FRANKLIN, GREGORY, A.**

74 Agente/Representante:  
**SÁEZ MAESO, Ana**

ES 2 734 214 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método para detectar una condición de fase abierta de un transformador

- 5 Las fallas recientes del sistema de suministro de energía han resaltado la necesidad de detectar condiciones de fase abierta que pueden ocurrir en tales sistemas. Particularmente, se necesita un método para detectar tales condiciones con respecto a la respuesta de los transformadores auxiliares del sistema durante las condiciones de fase abierta, para permitir la protección del sistema.
- 10 En una ocasión, un componente auxiliar se disparó debido a una baja tensión del bus. La causa del evento fue el fallo de la pila de aislante de fase C para el transformador de medición de ingresos del transformador auxiliar del sistema. Parte de la pila de aislante cayó al suelo, lo que resultó en una condición de desequilibrio simultáneo: fallas de fase a tierra fase C abierta C. Esta condición dio como resultado un desequilibrio de la tensión que cayó en cascada hacia los buses de la estación a través del transformador auxiliar del sistema. La condición de fase abierta resultante no causó la operación de ninguno de los relés de protección del transformador, lo que permitió que la condición existiera durante un período prolongado. La corriente de falla a tierra, una combinación de la contribución del motor de media tensión y el acoplamiento magnético del diseño del transformador de forma de núcleo de tres patas, surgió de los transformadores auxiliares del sistema, pero la magnitud de la corriente fue de aproximadamente 60 A, que está muy por debajo del nivel de selección de los relés de sobrecorriente de fase que protegen el transformador.
- 15 20 En otra ocasión, en la misma planta, un aislador de porcelana con suspensión de 345-kV en la estructura del bastidor A del transformador auxiliar del sistema falló debido a un defecto de fabricación. La línea de 345-kV cayó al suelo, lo que provocó una falla de fase a tierra que disparó el esquema de bloqueo del transformador auxiliar del sistema, lo que provocó que los buses de 6,9-kV se transfirieran rápidamente al transformador auxiliar de la unidad y que los buses de características de seguridad de emergencia se desenergizarán y luego se volvieran a energizar con generadores diésel.
- 25 Es posible detectar condiciones de fase abierta en ciertos transformadores mediante el uso de la retransmisión convencional. El documento EP3054304 A1 describe un dispositivo para detectar una fase abierta de una línea de conexión de un transformador de reserva en una planta de energía nuclear mediante el uso de una bobina Rogowski. Sin embargo, para otros transformadores, incluidos los que incorporan una conexión en estrella del lado de alta tensión, es difícil detectar la presencia de un conductor o conductores de fase abierta en el lado de la red del transformador debido a la regeneración de alta tensión en el lado primario y secundario del transformador debido al flujo magnético en el núcleo del transformador. El monitoreo de tensión, tal como la transmisión de la tensión convencional, no detectará una condición de conductor abierto en estas circunstancias.
- 30 35 Johnson y otros en "Effect of transformer connection and construction on single phasing detection", dado a conocer en la 66ta Conferencia Anual de 2013 de Ingeniería de Relés de Protección, describió una solución de relé basada en microprocesador a la visita del grupo el 30 de enero de 2012 y a la pérdida de energía externa experimentada en la Estación Generadora de Byron.
- 40 Norouzi, y otros en "Open Phase Conditions in Transformers Analysis and Protection Algorithm", descrita en la Conferencia Anual de Sistemas de Energía de Minnesota en Noviembre de 2013, describió el análisis de las condiciones de fase abierta en transformadores de energía trifásicos, y describen por qué y cómo, ante la pérdida de una sola fase en el lado alto o primario de un transformador, las tensiones y corrientes en el lado bajo o secundario dependen en gran medida no solo de la configuración de embobinados sino también a veces de la construcción del núcleo del transformador.
- 45 Adicionalmente, los transformadores en condiciones de carga liviana y/o carga cero con respecto a la demanda de energía, son problemáticos para detectar condiciones de fase abierta. Los ejemplos de transformadores de carga liviana y sin carga son aquellos en modo de reserva, tal como los transformadores auxiliares o de arranque. Las condiciones de carga baja y sin carga prevalecen en la mayoría de los transformadores auxiliares de la estación.
- 50 Por lo tanto, existe la necesidad de detectar condiciones de fase abierta que puedan ocurrir en los transformadores de los sistemas de suministro de energía para su uso en esquemas de protección de sistemas de suministro de energía. La Figura 1 es un diagrama esquemático de una sola línea de un sistema que tiene un transformador, que indica un punto neutral para el monitoreo de fase abierta. La Figura 2 es un diagrama esquemático de una sola línea de sistemas ilustrativos que incluyen varios tipos de transformadores adecuados para el monitoreo por el método en cuestión. La Figura 3A es un gráfico de forma de onda que representa una respuesta de corriente neutral antes y después de un evento de fase abierta. La Figura 3B es un gráfico de barras que representa los armónicos de corriente de magnetización antes y después de un evento de fase abierta. La Figura 4A es una captura de pantalla que representa las mediciones de los armónicos de corriente de magnetización antes de un evento de fase abierta. La Figura 4B es una captura de pantalla que representa las mediciones de los armónicos de corriente de magnetización después de un evento de fase abierta.
- 55 60 65

La Figura 5A es un diagrama esquemático de una sola línea que indica un punto neutro para el monitoreo de fase abierta de un transformador del sistema.

La Figura 5B es un gráfico de líneas que representa la corriente neutral antes y después de un evento de fase abierta, y un arranque (carga) del motor durante la condición de fase abierta.

5 La Figura 5C es un diagrama esquemático que representa un sistema ilustrativo de detección de fase abierta de inyección neutral.

La Figura 6 es un esquema de un transformador monitoreado bajo condiciones normales de operación.

La Figura 7 es un esquema de un transformador monitoreado que opera después de pasar por una condición de fase abierta.

10 La Figura 8A y la Figura 8B son diagramas de una sola línea que representan configuraciones ilustrativas de transformadores sometidos a pruebas de laboratorio.

La Figura 9A es una captura de pantalla que representa una señal de la fuente de inyección y una corriente neutral primaria sin una condición de fase abierta.

15 La Figura 9B es una captura de pantalla que representa una señal de la fuente de inyección y una corriente neutral primaria con una condición de fase abierta.

Se proporciona un método, de acuerdo con la reivindicación 1, para detectar una condición de fase abierta de un transformador que tiene una conexión de lado de alta tensión con conexión a tierra que comprende inyectar una señal en la conexión neutral del transformador, y monitorear la corriente que fluye en una conexión neutral en el lado de alta tensión del transformador para identificar una firma de condición de fase abierta en una señal capaz de caracterizar el cambio de la magnitud de la corriente.

20

La Figura 1 muestra un diagrama esquemático que indica una conexión neutral para el monitoreo de fase abierta. El sistema 10 se acopla física y eléctricamente al transformador 12. El transformador 12 comprende un lado de alta tensión 14 y un lado de baja tensión 16. El dispositivo de detección de fase abierta 18 mantiene un contacto eléctrico neutro con el punto de conexión neutro 20.

25

De acuerdo con ciertas modalidades ilustrativas el transformador puede ser un transformador auxiliar de la estación o un transformador de arranque. Además, los transformadores pueden ser transformadores generadores que elevan la tensión hasta el nivel de transmisión; sin embargo, al tomar la tensión del sistema de transmisión, los transformadores reducen la tensión de transmisión en las subestaciones de transmisión para uso industrial, comercial o residencial.

30

El método en cuestión es adecuado para la detección de una condición de fase abierta donde el transformador es un transformador estrella-delta, un transformador de núcleo de tres patas estrella-estrella, un núcleo de tres patas estrella-estrella con un transformador delta enterrado, o un núcleo acorazado estrella-estrella con transformador delta enterrado.

35

La Figura 2 es un diagrama esquemático de una sola línea de sistemas ilustrativos que incluyen varios tipos de transformadores adecuados para el monitoreo por el método en cuestión. La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de un sistema del transformador con varios tipos de configuraciones de transformador. La fuente de energía 21 se conecta a la red de media/baja tensión 23 mediante el sistema del transformador 22. El sistema del transformador 22 comprende un núcleo del transformador 24 con varias configuraciones de cableado. El transformador 24 puede comprender un bobinado estrella-delta de cualquier tipo de núcleo 25, en estrella-estrella con un núcleo de tres patas 26, un núcleo de tres patas estrella-estrella con delta enterrado 27, o un núcleo acorazado estrella-estrella con delta enterrado 28.

40

En estos últimos transformadores, el tercer o terciario bobinado se conecta en delta, pero no se sacan terminales para la conexión de carga. Más bien, está enterrado dentro del recinto. Las bobinas terciarias conectadas con delta enterrado llevan las corrientes del tercer armónico, que están todas en fase. Esto evita que las corrientes del tercer armónico entren en las líneas externas y mejora la calidad de la energía en sistemas de distribución de cuatro cables conectados en estrella.

45

50

La detección de un evento de fase abierta es un problema con estos transformadores, ya que es difícil detectar la presencia de uno o más conductores abiertos en el lado de la red de un transformador auxiliar de la estación, por ejemplo, cuando la tensión se regenera en el lado secundario y el primario de un transformador debido al flujo magnético en un núcleo del transformador, como se experimenta con estos tipos de transformadores. También se discute la detección de condiciones de fase abierta de transformadores susceptibles bajo condiciones de carga ligera y sin carga (reserva).

55

El método, de acuerdo con la invención, usa una señal de inyección en la conexión neutral para monitorear activamente una condición de fase abierta en el lado de la red del transformador, *i.e.*, un método de inyección neutral.

60

En ciertas modalidades el método incluye el monitoreo de la tensión y/o el monitoreo de la corriente en el terminal neutral del transformador. El relé de la tensión y/o el relé de la corriente pueden adaptarse para detectar un desequilibrio en la tensión o en la corriente creada por el evento que causa la condición de fase abierta. Las condiciones de fase abierta pueden detectarse mediante el uso de relés de microprocesador que tienen capacidades de procesamiento de señal digital y entrada analógica que acepta el tipo de salida de la sonda de medición de la corriente, u otro equipo de adquisición de datos conocido en la industria.

65

## ES 2 734 214 T3

En ciertas modalidades el presente método incluye monitorear la impedancia de secuencia cero de la red del transformador, donde la firma de fase abierta comprende un aumento en la impedancia de cientos o miles de Ohmios a Mega Ohmios.

- 5 La corriente neutral a través de un transformador es diferente cuando el lazo de corriente está bajo condiciones normales y equilibradas y cuando el lazo de corriente está sujeto a una condición de fase abierta. En los transformadores trifásicos en condiciones normales y equilibradas, la corriente se divide equitativamente entre cada una de las tres fases. La frecuencia de operación típica del sistema típicamente sería de 50 Hz o 60 Hz.
- 10 En condiciones normales de equilibrio, la red de transformadores se denomina red de secuencia cero. La red de secuencia cero equilibrada se caracteriza por una baja impedancia de corriente. La impedancia en una red de secuencia cero puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 300Ω a aproximadamente 1000Ω.
- 15 En una condición de fase abierta una de las tres fases está eléctricamente abierta, mientras que las otras dos fases están cerradas. Cuando una fase está abierta, la red de transformadores se caracteriza por un estado de alta impedancia, dominado por las propiedades de impedancia de magnetización del transformador. La impedancia en una red de transformadores con una condición de fase abierta puede estar típicamente en el intervalo de MegaOhm, tal como de aproximadamente 0,5 MΩ a aproximadamente 3 MΩ.
- 20 Además, las condiciones de fase abierta pueden detectarse mediante el examen de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de los armónicos del sistema del transformador. A medida que un sistema cambia de una red de secuencia cero a una condición de fase abierta, se muestra una disminución en el tercer número armónico y los aumentos concurrentes se muestran en los primer, quinto y séptimo números armónicos.
- 25 Cuando la frecuencia de la corriente neutral o inyectada es de 60 Hz la firma de la condición de fase abierta puede comprender al menos una disminución en un componente de 180 Hz (tercer armónico) de la corriente neutral, un aumento en un componente de 60 Hz de la corriente neutral, o un aumento en un componente de 300 Hz (quinto armónico) de la corriente neutral.
- 30 El análisis de armónicos puede realizarse en el dominio de la frecuencia mediante el uso de técnicas de estado estable sinusoidal. Los armónicos pueden determinarse mediante cálculos de circuito que conducen a la onda de salida del dispositivo y luego a la modalidad del análisis de la serie de Fourier, o con mediciones mediante el uso de un analizador de espectro de armónicos o un analizador de calidad de energía.
- 35 La Figura 3A representa el comportamiento simulado de la frecuencia de la corriente neutral en un transformador estrella-estrella con delta enterrado antes y después de que ocurra una condición de fase abierta. Antes de que ocurra un evento de fase abierta 32, la frecuencia FFT de los armónicos de corriente neutral es principalmente el tercer armónico 31 a 180 Hz. La frecuencia de la corriente neutral 30 se caracteriza por un cambio en los armónicos durante la condición de fase abierta.
- 40 La Figura 3B representa la respuesta simulada de los números armónicos de la frecuencia de la corriente neutral a la condición de fase abierta. Los números de armónicos FFT de la frecuencia de la corriente neutral antes de una condición de fase abierta 35 se caracterizan por los números de armónicos tercero y noveno (180 Hz y 540 Hz). Los números de armónicos de FFT durante la condición de fase abierta 36 se caracterizan por un aumento en los números de armónicos primero, quinto y séptimo (60 Hz, 300 Hz y 420 Hz), junto con una reducción en el número de tercer armónico.
- 45 Las Figuras 4A y 4B son capturas de pantalla de computadora que representan mediciones de los armónicos en un transformador de prueba de núcleo de 3 patas estrella-estrella (sin delta enterrado) antes y después de una condición de fase abierta. Como se muestra en la Figura 4A, antes de que ocurra una condición de fase abierta, se muestra que el espectro de frecuencia de la corriente neutral es predominantemente de 180Hz, el tercer armónico 41. Como se muestra en la Figura 4B, durante la condición de fase abierta, se muestra que el espectro de frecuencia de la corriente neutral es predominantemente de 60Hz.
- 50 De acuerdo con la invención el método incluye una señal de inyección neutral para monitorear las condiciones de fase abierta. Un módulo del transformador de la corriente de inyección puede acoplarse magnéticamente a una conexión neutral del transformador, en donde la condición neutral de la conexión no se altera. Para fines de ilustración, pero no de limitación, puede inyectarse una señal de aproximadamente 1 Voltio a aproximadamente 10 V, y de aproximadamente 10 mA a 100 mA a través de la conexión neutral. En una red de secuencia cero las tensiones y las corrientes resultantes permanecen cerca de los valores de entrada originales. En una condición de fase abierta la señal inyectada puede caer más de 20 dB.
- 60 Para proporcionar una inyección de señal, se coloca un núcleo alrededor de la conexión neutral con la cantidad de vueltas necesarias para inducir la tensión deseada para la inyección de la corriente en el neutro a través del acoplamiento magnético, sin romper la conexión neutral. El método inyecta una pequeña señal, pero monitorea un gran cambio en la impedancia, lo que indica una condición de fase abierta.
- 65

La Figura 5A representa un diagrama esquemático de una sola línea que muestra una conexión para la medición y la inyección de la corriente en un buje neutral de un transformador de núcleo de 3 patas estrella-estrella. El suministro de energía 51 se acopla física y eléctricamente al transformador 52 con un punto de medición/inyección 58 en un buje neutral estrella 56, y una conexión neutral secundaria 57. El transformador 52 se conecta física y eléctricamente al motor de inducción 53 y a la carga resistiva 54.

La Figura 5B ilustra el cambio en la corriente neutral de 60Hz en el lado de alta tensión creado por una condición de fase abierta. La zona sin carga eléctrica 60 se muestra antes del arranque de un motor 62 de 250 hp. Una condición de fase abierta 61 ocurre antes del arranque del motor 62 de 250 hp, a los 10 segundos, lo que se indica por un pequeño aumento en la corriente (A). En la región de operación del motor 63 de 250 hp, puede detectarse un aumento más pronunciado en la corriente neutral de 60Hz bajo carga. Después de que se produce la condición de fase abierta 61, hay un aumento en el componente de 60 Hz de la corriente neutral. Si no existiera la condición de fase abierta 61, el componente de 60Hz de la corriente en la región de operación del motor 63 de 250 hp sería casi cero.

La Figura 5C ilustra un sistema de detección de fase abierta de inyección neutral 70 útil para practicar el método en cuestión, que comprende una fuente de corriente alterna (AC) (cuya frecuencia es diferente a la frecuencia del sistema de energía) conectada a un transformador de corriente junto con una sonda de medición de la corriente 67 y controlador electrónico 66. El transformador de la corriente de inyección 65 puede ubicarse de tal manera que pueda acoplarse magnéticamente la fuente de la señal de inyección 64 a un conductor 69 que se conecta a la conexión neutral del transformador 68 de los embobinados conectados en estrella para los cuales puede detectarse una condición de fase abierta. La sonda de medición de la corriente 67 puede medir la corriente en la conexión neutral del transformador 68 o en el embobinado del transformador de la corriente de inyección 65. Esta sonda de medición de la corriente neutral 67 puede conectarse a un controlador electrónico 66.

El sistema detecta una condición de fase abierta en el transformador trifásico al monitorear la corriente neutral del transformador, como se describió en la presente descripción. En condiciones normales se establecen los niveles de base de la corriente de inyección y sus armónicos. Cuando se produce una condición de fase abierta en los embobinados del transformador conectados en estrella, la impedancia eléctrica de la trayectoria de la corriente aumenta, como se ve en la fuente de la señal de inyección 64. Este aumento en la impedancia eléctrica da como resultado una disminución en el nivel de la corriente de la fuente de inyección, que es detectada por el controlador electrónico 66. Coincidentemente, con la disminución de la corriente de la fuente de inyección se produce un aumento en la corriente de la frecuencia de la energía en la conexión neutral del transformador 68 como resultado del desequilibrio de la corriente de fase causado por la condición de fase abierta.

En ciertas modalidades junto con el aumento de la corriente de la frecuencia de la energía en el transformador neutral también pueden ocurrir cambios en los armónicos de la corriente de la frecuencia de la energía cuando se produce una condición de fase abierta. La corriente de la frecuencia de la energía junto con los componentes armónicos de la corriente de la frecuencia de la energía también puede monitorearse y puede usarse para detectar una condición de fase abierta. Por lo tanto, el sistema de detección de fase abierta de inyección neutral puede utilizar tres mediciones para detectar una condición de fase abierta en los embobinados conectados en estrella de un transformador trifásico: 1) cambio en el nivel de corriente de la fuente de inyección en la conexión neutral del transformador, 2) cambio en el nivel de corriente de la frecuencia de la energía en la conexión neutral del transformador y 3) cambio en los niveles de los armónicos de la corriente de la frecuencia de la energía en la conexión neutral del transformador, en particular los armónicos tercero y quinto de la corriente de la frecuencia de la energía.

La Figura 6 representa un transformador monitoreado, tal como cualquier tipo de transformador representado en la Figura 2, que opera en un modo de secuencia cero de baja impedancia, con inyección de señal de acuerdo con el método en cuestión. El transformador comprende un embobinado primario del lado de alta tensión 71 y un embobinado secundario del transformador de la fuente 72. Una fuente de inyección 73 se acopla magnéticamente a un buje neutral 79 del embobinado primario 71, e induce una corriente 74 para ser inyectada en el primario. La corriente inyectada 74 fluye en la trayectoria de secuencia cero de las tres fases intactas 75, 76, y 77, que fluye a través del embobinado secundario del transformador de la fuente 72 y fuera del embobinado. Bajo este modo de secuencia cero la impedancia es relativamente baja y la trayectoria de la corriente es simple debido a que las tres fases permanecen cerradas o intactas.

La Figura 7 representa el mismo transformador monitoreado, pero en condiciones de fase abierta de alta impedancia, con inyección de corriente de acuerdo con el método en cuestión. El transformador comprende un embobinado primario del lado de alta tensión 81 y un embobinado secundario del transformador de la fuente 82. Una fuente de inyección 83 se acopla magnéticamente al embobinado primario 81 e induce una corriente 84 para ser inyectada en el primario. La corriente inyectada 84 experimenta alta impedancia debido a la condición de fase abierta 85, pero aún puede fluir a través de las fases cerradas 86 y 87. Mientras está impedida en las fases 86 y 87, la corriente 84 aún puede salir del embobinado secundario.

En comparación con la Figura 6, la corriente de la señal inyectada 84 se reduce en gran medida por la impedancia de magnetización generada debido a la condición de fase abierta 85 en la Figura 7. El cambio de impedancia se debe en gran parte al cambio de la red de una red de secuencia cero dominada por la red de impedancia cero relativamente baja

del transformador a un estado de alta impedancia dominado por la impedancia de magnetización del transformador, debido a la introducción de una condición de fase abierta.

5 La Figura 8A representa una modalidad del método de monitoreo de inyección de corriente. Un núcleo estrella-estrella con un transformador delta enterrado 92 se conecta eléctricamente con un suministro de energía eléctrica trifásica 90 de 208 V. Una fuente de inyección 91 se acopla magnéticamente a un buje neutral 93 para monitorear el transformador 92 en condiciones de fase abierta. Los métodos convencionales de detección de la tensión no pueden detectar condiciones de fase abierta en transformadores con esta configuración.

10 La Figura 8B representa una modalidad del método de monitoreo de inyección de corriente. Un transformador delta-estrella 96 se conecta física y eléctricamente en serie con un transformador de núcleo de tres patas estrella-estrella 97, con un suministro de energía eléctrica trifásica 95 de 208 V. Una fuente de inyección 98 se conecta eléctricamente con un buje neutral 99 para monitorear el sistema en condiciones de fase abierta. Los métodos convencionales de detección de la tensión no pueden detectar condiciones de fase abierta en sistemas de transformadores con esta configuración.

15 La Figura 9A es una captura de pantalla que representa una señal de la fuente de inyección y una corriente neutral primaria sin una condición de fase abierta. La Figura 9B es una captura de pantalla que representa una señal de la fuente de inyección y una corriente neutral primaria con una condición de fase abierta. Donde existe una red de secuencia cero de baja impedancia, la tensión de inyección 100 y la corriente de inyección 101 exhiben ambas un comportamiento de onda sinusoidal. Cuando existe una condición de fase abierta, la señal de la tensión de inyección 110 mantiene el comportamiento de onda sinusoidal, pero la señal de la corriente de inyección 111 se reduce a una cantidad detectable. La corriente de inyección 101 en una red de secuencia cero se midió a aproximadamente 530 mA, y la corriente de inyección 111 en una condición de fase abierta se midió a solo 80 mA. La caída en la corriente observable se debe a la transformación de la red de secuencia cero de baja impedancia en un estado de alta impedancia, dominada por la impedancia de magnetización del transformador.

La corriente neutral o la inyección de la señal, por lo tanto, permiten la detección de una condición de fase abierta en aquellos tipos de transformadores en los que la tensión convencional o la transmisión de corriente de fase es inefectiva.

30 Como se muestra en los resultados de la prueba, que confirman los resultados del modelado, la corriente de la fuente de inyección disminuye significativamente debido al cambio en la impedancia del circuito. Este cambio en la corriente de la fuente de inyección puede monitorearse a través de la conexión neutral para detectar una condición de fase abierta. Hay un cambio detectable en la corriente neutral cuando ocurre una condición de fase abierta. Adicionalmente, el componente de 180-Hz de la corriente neutral disminuye y los componentes de 60-Hz y 300-Hz aumentan cuando se produce la fase abierta.

35 El método de inyección neutral es particularmente útil para situaciones de transformadores de baja carga y sin carga. En ciertas modalidades combinar el método de detección neutral y el método de inyección neutral pueden combinarse para proporcionar un sistema de detección robusto.

40 En ciertas modalidades, el método comprende además la introducción de un retardo de tiempo ajustable (en un aparato de alarma o disyuntor asociado) para evitar alarmas molestas o disparos debidos a caídas de tensión no relacionadas con un evento de fase abierta. El método puede incluir una coordinación de tiempo-corriente para emitir una señal de alarma/disparo para indicar la presencia de la condición de fase abierta.

45 La Figura 10A representa el comportamiento simulado de la frecuencia de la corriente neutral en un núcleo de 3 patas estrella-estrella con un transformador delta enterrado antes y después de que ocurra una condición de fase abierta. La amplitud de la onda de la corriente neutral cambió en una magnitud de aproximadamente 6 después de que ocurriera la condición de fase abierta 120.

50 La Figura 10B representa la respuesta simulada de los números armónicos de la FFT (componentes) de la frecuencia de la corriente neutral a la condición de fase abierta. Los componentes de la frecuencia de la corriente de la FFT neutral antes de una condición de fase abierta 130 se caracterizan por las frecuencias de 60Hz, 180Hz y 540Hz; o los números armónicos primero, tercero y noveno, respectivamente. Los componentes durante la fase abierta 131 se caracterizan por un aumento en las frecuencias de 60Hz, 300Hz y 420Hz (números armónicos primero, quinto y séptimo) y una disminución en las frecuencias de 180Hz y 540Hz (números armónicos tercero y noveno).

60 Cuando el transformador fue sometido a una carga de 100 kW, la corriente neutral fue identificable por encima del ruido de la red. Cuando no se aplica carga, el ruido de la red puede enmascarar el componente de 60Hz de la corriente neutral, lo que puede ser difícil de detectar. Cuando se aplica una carga de 100 kW al transformador, los armónicos de la corriente neutral se vuelven más fáciles de determinar, incluso sin la inyección de la señal. En la Figura 10B, bajo una carga de 100 kW, el componente de 60Hz de la corriente neutral se identificó antes de una condición de fase abierta 130 y se incrementó considerablemente durante la condición de fase abierta 131.

65 La inyección de una señal neutral es necesaria si el componente de 60 Hz de la corriente neutral es demasiado bajo y está enmascarado por el ruido. Si la corriente neutral está sobre el piso de ruido, tal como cuando hay una carga lo

suficientemente grande, entonces puede detectarse el aumento en el componente de 60Hz durante una condición de fase abierta.

5 También se proporciona un sistema, de acuerdo con la reivindicación 13, para detectar una condición de fase abierta de un transformador que tiene una conexión del lado de alta tensión con conexión a tierra, que comprende una fuente de señal de inyección en comunicación eléctrica con un transformador de corriente de inyección que se acopla magnéticamente a una conexión neutral del transformador que tiene una conexión del lado de alta tensión con conexión a tierra, una sonda de medición de la corriente que se configura para medir la corriente en la conexión neutral o en un embobinado del transformador de la corriente de inyección, y un controlador electrónico en comunicación con la sonda de medición de la corriente.

10 En ciertas modalidades el sistema de detección de fase abierta de inyección neutral puede incluir la siguiente lista de componentes, no limitativa y no exhaustiva: un transformador de corriente de inyección con una relación de 600:5 y clasificación C400; una sonda de medición de la corriente con una sensibilidad de 1000mV/A; un controlador electrónico; 15 y una fuente de señal de inyección. El controlador electrónico puede comprender cualquier controlador basado en un microprocesador con capacidad de procesamiento de señal digital y al menos una entrada analógica que acepte la salida de la sonda de medición de la corriente; y comprende al menos una salida de relé o transistor para funciones de alarma y disparo. La fuente de la señal de inyección puede ser un impulso de motor de frecuencia variable monofásica o trifásica. La tensión de salida del impulso de motor de frecuencia variable no debe exceder la clasificación de la tensión del transformador de la corriente de inyección.

20 Cuando se detecta un evento o condición de fase abierta, el controlador electrónico puede enviar una señal a través de la salida de relé o del transistor a una alarma convencional para alertar al operador del sistema, o puede disparar un disyuntor del sistema para compensar la condición de fase abierta.

25 En ciertas modalidades el controlador electrónico del sistema de detección de fase abierta de inyección neutral es capaz de procesar señales digitales.

30 En ciertas modalidades, el controlador electrónico del sistema de detección de fase abierta de inyección neutral comprende al menos una entrada analógica que acepta la salida de la sonda de medición de la corriente, y al menos una salida de relé o transistor capaz de iniciar funciones de alarma o disparo.

35 En ciertas modalidades la fuente de la señal de inyección del sistema de detección de fase abierta de inyección neutral comprende un impulso de motor de frecuencia variable monofásica o trifásica, en donde una tensión de salida del impulso de motor de frecuencia variable no excede la clasificación de la tensión del transformador de la corriente de inyección.

40 Aunque las formas de las modalidades se han descrito en detalle a través de la descripción anterior y los ejemplos anteriores, estos ejemplos solo tienen fines ilustrativos y se entiende que un experto en la técnica puede realizar variaciones y modificaciones sin apartarse del alcance de la descripción. Debe entenderse que las modalidades descritas anteriormente no solo son alternativas, sino que pueden combinarse.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para detectar una condición de fase abierta de un transformador en una condición de carga baja o sin carga y que tiene una conexión del lado de alta tensión tierra-estrella, que comprende  
inyectar una señal en una conexión neutral del transformador, y monitorear la corriente que fluye en una conexión neutral en el lado de alta tensión del transformador para identificar una firma de condición de fase abierta en una señal capaz de caracterizar el cambio de la magnitud de la corriente.
- 10 2. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el monitoreo es en tiempo real.
3. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, que incluye el monitoreo de la tensión y/o el monitoreo de la corriente en un terminal neutral del transformador.
- 15 4. El método, de acuerdo con la reivindicación 3, en donde el relé de la tensión y/o el relé de la corriente se adaptan para detectar un desequilibrio en la tensión o en la corriente que se crea por el evento que causa la condición de fase abierta.
- 20 5. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, que incluye monitorear la impedancia de secuencia cero de la red del transformador y en donde la firma de fase abierta comprende un aumento en la impedancia de cientos o miles de Ohmios a Mega Ohmios.
- 25 6. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde cuando la señal de inyección o la frecuencia de la corriente neutral es de 60 Hz, la firma de la condición de fase abierta comprende al menos una disminución en un componente de 180 Hz de la corriente neutral, un aumento en un componente de 60 Hz de la corriente neutral, o un aumento en un componente de 300 Hz de la corriente neutral.
- 30 7. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además efectuar un retardo de tiempo ajustable para filtrar las señales debidas a eventos de nivel de transmisión no relacionados con un evento de fase abierta.
8. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el transformador es un transformador delta-estrella, un transformador de núcleo tres patas estrella-estrella, un núcleo de tres patas estrella-estrella con un transformador delta enterrado, o un núcleo acorazado estrella-estrella con un transformador delta enterrado.
- 35 9. El método, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde el transformador es un transformador auxiliar de la estación o un transformador de arranque.
10. El método de la reivindicación 1, en donde la firma de la condición de fase abierta comprende una disminución en la señal inyectada de más de aproximadamente 20dB.
- 40 11. El método de la reivindicación 1, en donde la condición de fase abierta se detecta mediante  
i) un cambio en un nivel de la corriente de una fuente de inyección en la conexión neutral;  
ii) un cambio en un nivel de la corriente de la frecuencia de la energía en la conexión neutral; o  
iii) un cambio en un nivel de al menos un armónico de la corriente de la frecuencia de la energía en la conexión neutral.
- 45 12. El método de la reivindicación 11, en donde el cambio en el nivel de al menos un armónico se detecta en un tercer y/o quinto armónico de la corriente de la frecuencia de la energía.
- 50 13. Un sistema para detectar una condición de fase abierta de un transformador en una condición de carga baja o sin carga y que tiene una conexión del lado de alta tensión tierra-estrella, que comprende una fuente de señal de inyección (64, 73,91) en comunicación eléctrica con un transformador de corriente de inyección (65) que se acopla magnéticamente a una conexión neutral (68) del transformador que tiene una conexión del lado de alta tensión tierra-estrella, una sonda de medición de la corriente (67) que se configura para medir la corriente en la conexión neutral (68) o en un embobinado del transformador de corriente de inyección y un controlador electrónico (66) en comunicación con la sonda de medición de la corriente, en donde opcionalmente el controlador electrónico es capaz de procesar señales digitales.
- 55 14. El sistema, de acuerdo con la reivindicación 13, en donde el controlador electrónico comprende al menos una entrada analógica que acepta la salida de la sonda de medición de la corriente y al menos una salida de relé o transistor capaz de iniciar funciones de alarma o disparo.
- 60 15. El sistema, de acuerdo con la reivindicación 14, en donde la fuente de la señal de inyección comprende un impulso de motor de frecuencia variable monofásico o trifásico y en donde una tensión de salida del impulso de motor de frecuencia variable no excede la clasificación de la tensión del transformador de inyección de corriente.

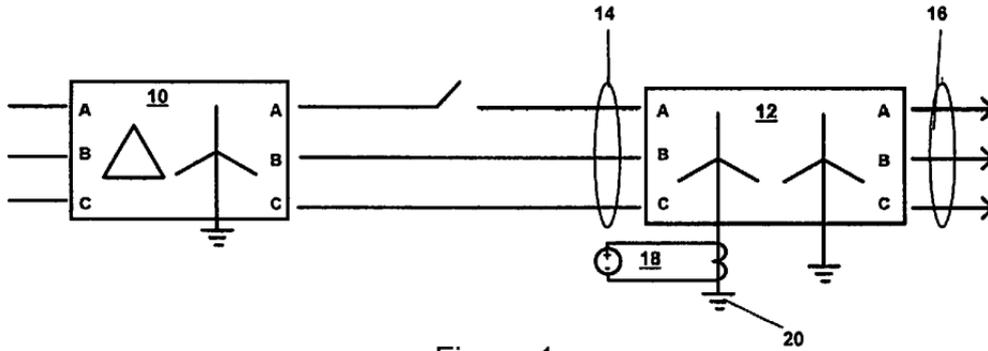


Figura 1

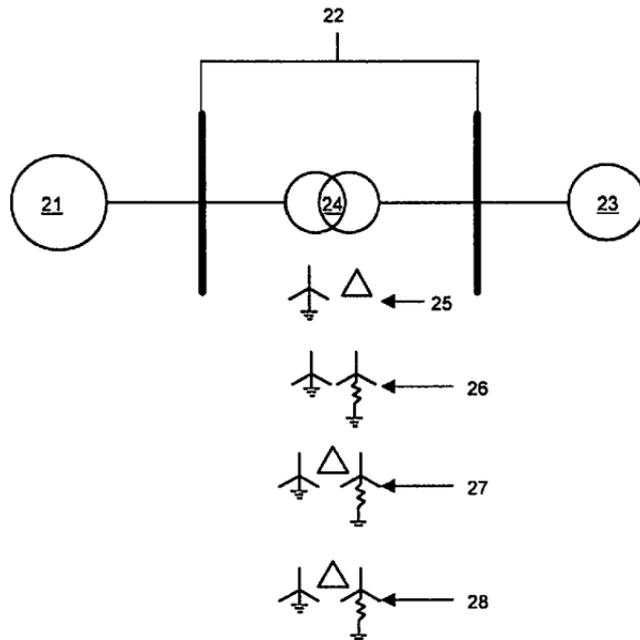


Figura 2

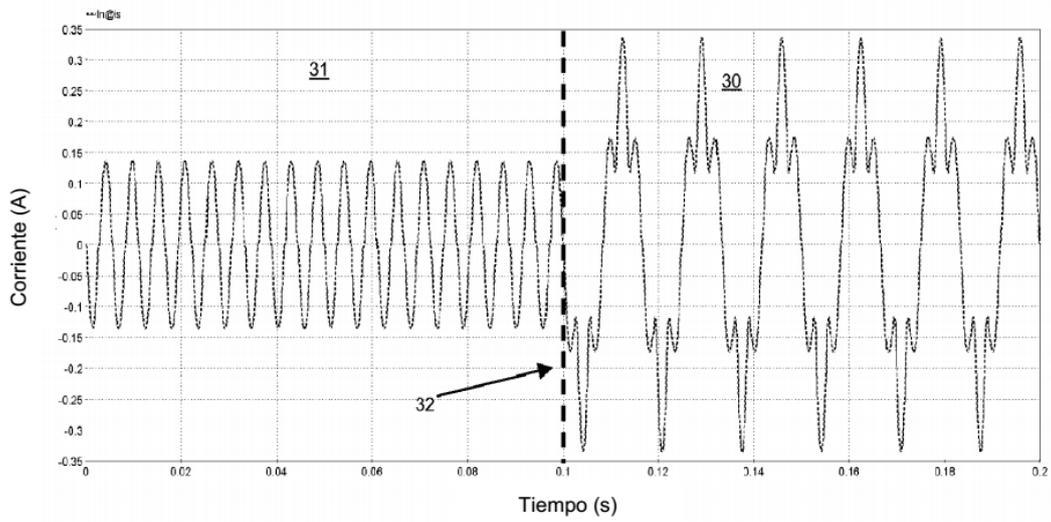


Figura 3A

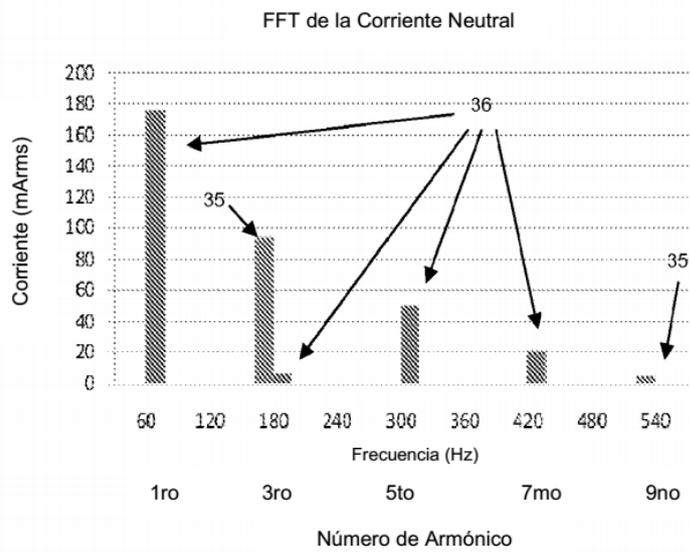


Figura 3B

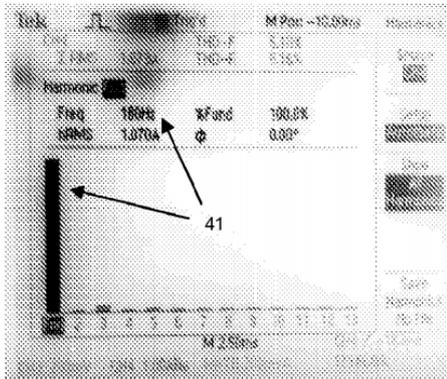


Figura 4A

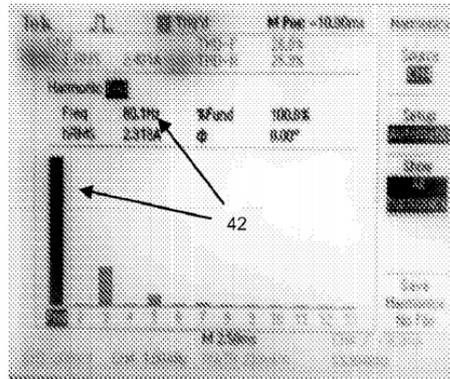


Figura 4B

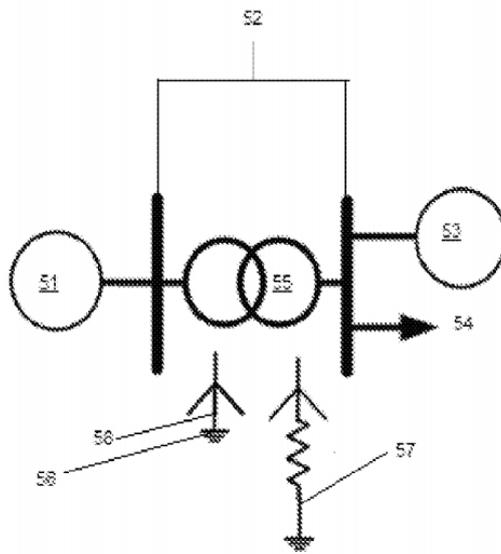


Figura 5A

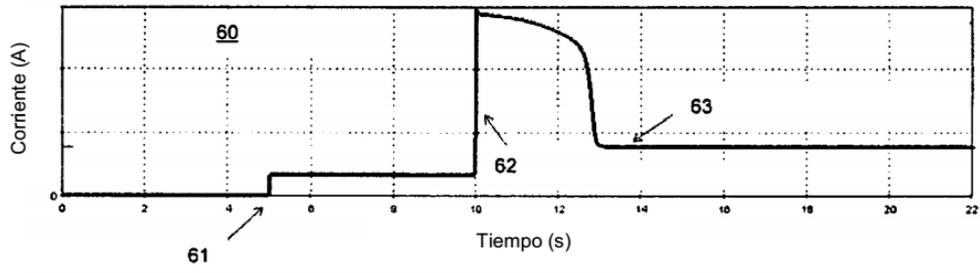


Figura 5B

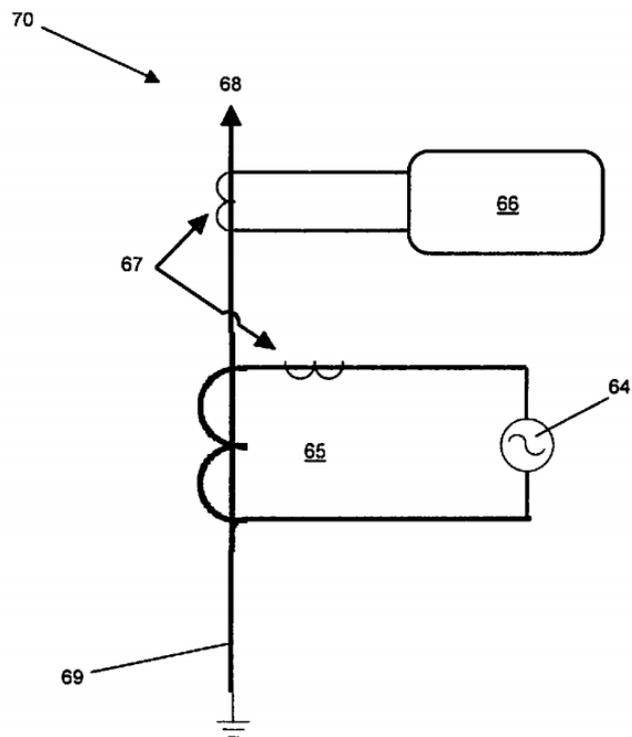


Figura 5C

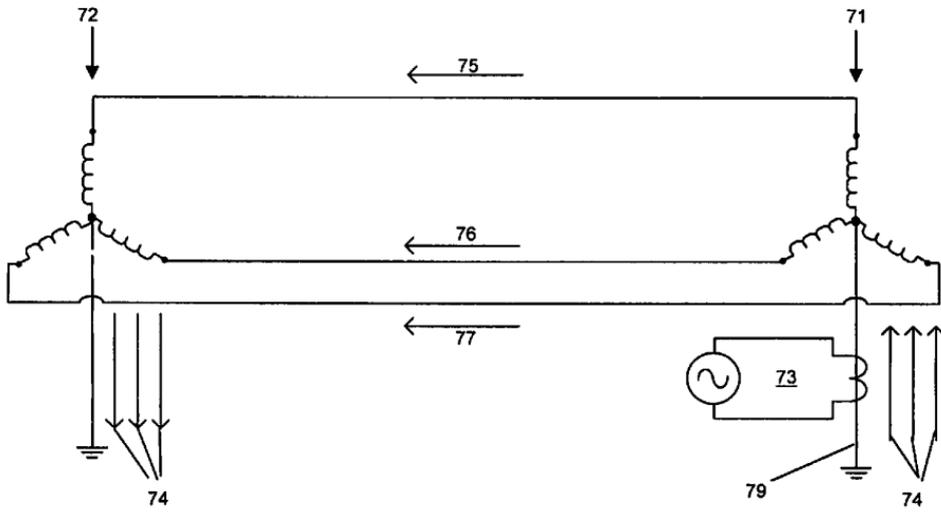


Figura 6

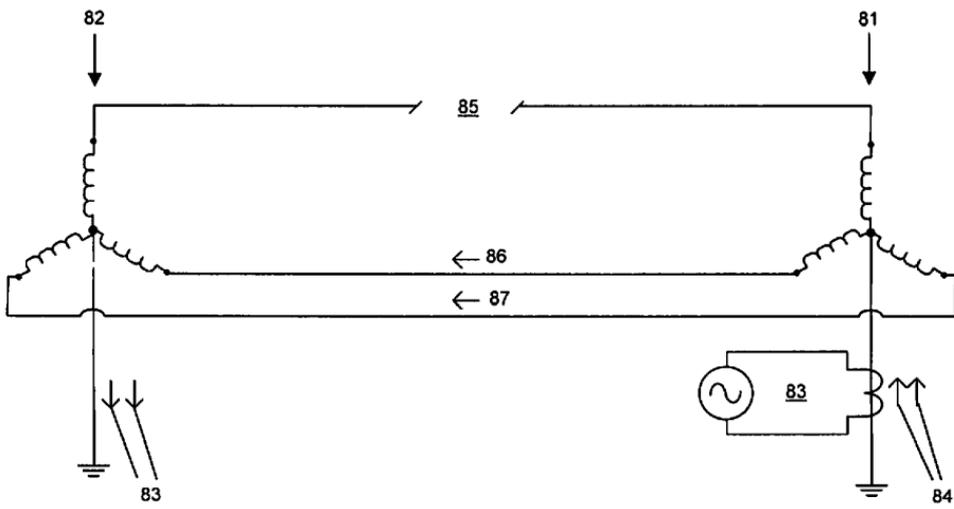


Figura 7

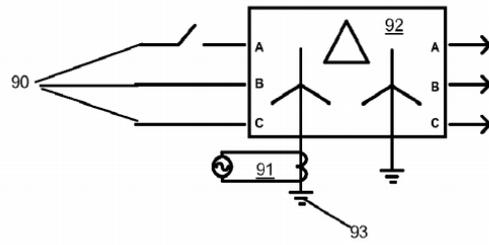


Figura 8A

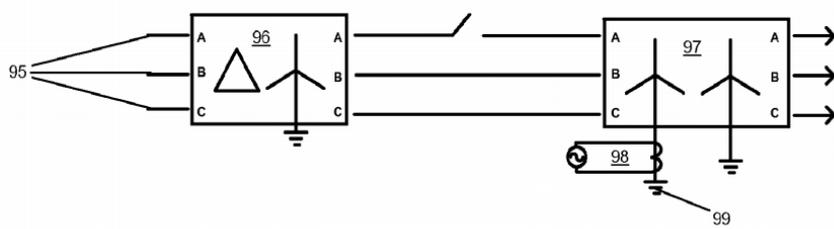


Figura 8B

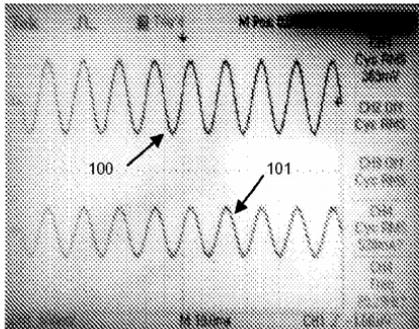


Figura 9A

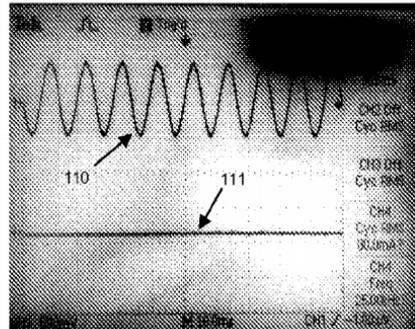


Figura 9B

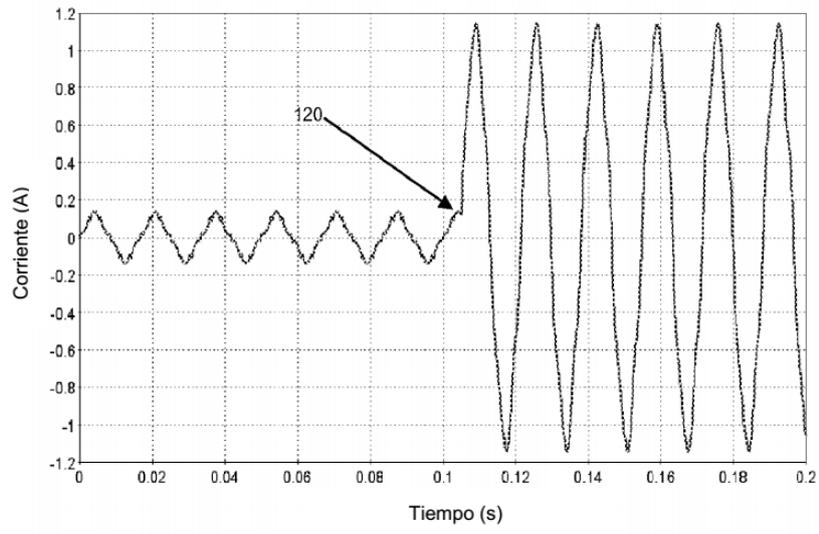


Figura 10A

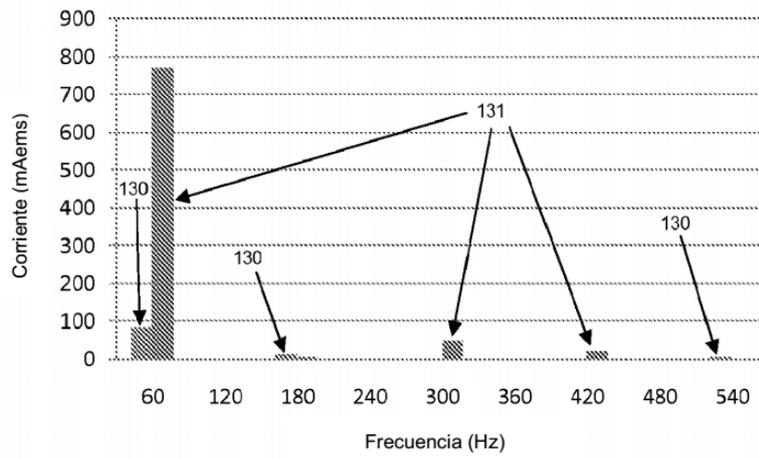


Figura 10B