



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de Ferroresonancia
en Sistemas de Distribución
Subterráneos**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Juan Carlos Baez Galindo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Vicente Torres García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A **Dios (Jehóva)** quien ha sido mi fortaleza y soporte espiritual, así como mi mejor amigo durante toda mi vida

A mis padres **Alfonsa Galindo Saenz** y **Juan Baez Garcia** por la educación, cariño, soporte, apoyo y amor incondicional brindado a lo largo de mi vida

A mi hermano **Francisco Javier Baez Galindo** por su apoyo incondicional recibido a lo largo de mi carrera y vida

A mis abuelitos **Francisco Baez Pérez, Guadalupe García Méndez, Teodoro Galindo Díaz** y **Ma. De Jesús Saenz Romero** por su amor y por ser un ejemplo de trabajo, fortaleza y perseverancia

A mi primo (hermano) **Gustavo Hernández Baez** por siempre creer en mí, impulsarme a superarme y por su ejemplo dado a lo largo de mi vida

A mi director de tesis **Dr. Vicente Torres García** por darme la confianza de realizar esta tesis con él, creer en mí y ser una guía a pesar de las dificultades que se presentaron

A mis sinodales **Dr. Ruben Tapia Olvera, Dr. Juan Ramón Rodríguez Rodríguez, Dr. Mario Arrieta Paternina, Dr. Nestor Gonzalez Cabrera.** por sus valiosas correcciones y comentarios durante la revisión de esta tesis.

A mi Profesor **Ing. Eduardo Carranza** por apoyarme durante mi carrera y darme la oportunidad de realizar mi servicio social en la EPS V CFE Generación

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por la educación, recursos e infinidad de experiencias y enseñanzas de vida brindadas a lo largo de mi instancia como estudiante

A la Lic. (Psicóloga) **Maria Cristina Ortiz A.** por todo el apoyo mental y emocional brindado, fundamental para seguir adelante con la realización de esta meta

A **César Arana, Edgar Arcos Castillo** y **Eric Cortés Hernández** por su apoyo, confianza amistad y experiencias brindadas durante la carrera

A **Papiit-106420** por haber contribuido a la realización de este tema de tesis

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta un planteamiento, metodología y resultados de la investigación referente al problema de ferorrresonancia en los sistemas eléctricos de distribución subterráneos.

El análisis de la ferorrresonancia se desarrolla con la finalidad de determinar los parámetros que intervienen para que se presente el fenómeno de la ferorrresonancia, además, de las conexiones más propicias para la aparición del fenómeno, como son el tipo de conexión del transformador, número de fases, longitud de los conductores entre otros factores.

Además se muestran las simulaciones correspondientes a las condiciones necesarias para la aparición del fenómeno el cual involucra un efecto capacitivo y uno inductivo no lineal, en cuanto al efecto capacitivo este puede provenir de líneas o cables del sistema eléctrico de transmisión o distribución, y el efecto inductivo no lineal proviene de la estructura y construcción los núcleos de los transformadores de potencia y distribución, los cuales se diseñan con materiales ferromagnéticos.

La teoría básica de transformadores y parámetros de cables nos ayudan a la comprensión del fenómeno, en ese sentido se muestra como hacer uso de estos elementos en el software ATPDraw y las simulaciones ayudan a visualizar las condiciones del fenómeno ante diferentes condiciones de operación.

No existe una especificación o alguna norma para predecir la aparición del fenómeno, en ese sentido los resultados sirven como base para dar las recomendaciones necesarias y así evitar la aparición del fenómeno de ferorrresonancia que se manifiesta con sobrevoltajes donde pueden operar protecciones y formas de onda no sinusoidales.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | I |
| ÍNDICE GENERAL | II |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | IV |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES..... | VIII |
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE FERRORESONANCIA..... | 1 |
| 1.2 ESTADO DEL ARTE | 4 |
| 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 8 |
| 1.4 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS..... | 9 |
| 1.5 OBJETIVO | 9 |
| 1.6 HIPOTESIS..... | 10 |
| 1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS | 10 |
| CAPÍTULO 2 TRANSFORMADORES Y CABLES SUBTERRÁNEOS | 12 |
| 2.1 INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2.2 MATERIALES Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS..... | 12 |
| 2.3 COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES FERROMAGNÉTICOS Y CURVA DE HISTÉRESIS | 16 |
| 2.4 TRANSFORMADORES | 19 |
| 2.5 CABLES SUBTERRÁNEOS. | 22 |
| 2.6 COMPONENTES GENERALES DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS | 26 |
| 2.6.1 <i>Conductor</i> | 27 |
| 2.6.2 <i>Pantallas semiconductora interna y externa</i> | 27 |
| 2.6.3 <i>Pantalla Metálica</i> | 28 |
| 2.6.4 <i>Cubierta Exterior</i> | 28 |
| 2.6.5 <i>Aislamiento</i> | 28 |
| CAPÍTULO 3 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE RESONANCIA Y FERRORESONANCIA | 29 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN | 29 |
| 3.2 RESONANCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA | 29 |
| 3.2.1 <i>Resonancia en circuito serie</i> | 31 |
| 3.3 FERRORESONANCIA..... | 33 |
| 3.3.1 <i>Causas y configuraciones propensas a ferroresonancia</i> | 38 |
| 3.3.2 <i>Clasificación de la ferroresonancia</i> | 43 |
| 3.3.3 <i>Daños y síntomas de la ferroresonancia</i> | 46 |
| 3.3.4 <i>Algunas normas de apoyo</i> | 48 |
| CAPÍTULO 4 USO DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS Y SIMULACIONES DE CASOS FERRORESONANTES EN ATPDRAW | 51 |
| 4.1 INTRODUCCIÓN | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2 TRANSFORMADORES EN ATPDRAW | 52 |
| 4.3 CABLES SUBTERRÁNEOS EN ATPDRAW | 57 |
| 5.4 FUENTE DE C.A. EN ATPDRAW..... | 60 |
| 4.5 SIMULACIONES. | 61 |
| 4.5.1 <i>Simulación de ferresonancia en un sistema monofásico</i> | 62 |
| 4.5.2 <i>Simulación de ferresonancia de un sistema trifásico subterráneo</i> | 64 |
| 5.5.3 <i>Simulación de ferresonancia de un sistema de distribución trifásico subterráneo real</i> | 72 |
| 5.5.4 <i>Simulación de ferresonancia de un sistema de distribución trifásico subterráneo con cables en disposición triangular</i> | 77 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO | 80 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 80 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 81 |
| 5.3 TRABAJO FUTURO | 82 |
| REFERENCIAS | 83 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| FIG. 1.1 CIRCUITO FERRORESONANTE | 5 |
| FIG. 1.2 APROXIMACIÓN A LA REGIÓN DE SATURACIÓN DE LA CURVA DE UN TRANSFORMADOR [19]. | 6 |
| FIG. 1.3 EQUIVALENTE DE UN CIRCUITO FERRORESONANTE. | 7 |
| FIG. 2.1 LÍNEAS DE FLUJO DE UNA BARRA IMANTADA [29]. | 13 |
| FIG. 2.2 EJEMPLO DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO EN DIFERENTES MATERIALES [29]. | 13 |
| FIG. 2.4 CURVA DE MAGNETIZACIÓN CON CORRIENTE DIRECTA DE UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO [30]. | 17 |
| FIG. 2.5 CURVA DE HISTÉRESIS A APLICAR UNA CORRIENTE ALTERNA [31]. | 18 |
| FIG. 2.6 TRANSFORMADOR CON CARGA CONECTADA A SECUNDARIO [31]. | 19 |
| FIG. 2.7 TRANSFORMADOR CONECTADO A UNA FUENTE DE VOLTAJE ALTERNO [31]. | 20 |
| FIG. 2.8 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO CONSTRUIDO SOBRE UN NÚCLEO DE TRES COLUMNAS [30]. | 21 |
| FIG. 2.9 CABLE AISLADO POR UNA PANTALLA AISLANTE. | 23 |
| FIG. 2.10 LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO DISTORSIONADAS AL PLANO DE TIERRA. | 24 |
| FIG. 2.11 CABLE AISLADO CON UNA CAPA SEMICONDUCTORA. | 24 |
| FIG. 2.12 COMPARACIÓN DE UN CABLE SIN PANTALLA Y CON PANTALLA SEMICONDUCTORA [37]. | 25 |
| FIG. 2.13 CAPACITANCIA DE UN CABLE MONOPOLAR CON PANTALLA METÁLICA [37]. | 26 |
| FIG. 2.14 ELEMENTOS GENERALES DE UN CABLE SUBTERRÁNEO DE AISLAMIENTO SECO. | 27 |
| FIG. 3.1 CIRCUITO CON ELEMENTOS RESONANTES EN SERIE [38]. | 31 |
| FIG. 3.2 SOLUCIÓN GRÁFICA AL CIRCUITO RLC RESONANTE [38]. | 32 |
| FIG. 3.3 CIRCUITO CON CONDICIONES NECESARIAS PARA FERRORESONANCIA [42]. | 33 |
| FIG. 3.4 GRÁFICAS DE VOLTAJES EN EL INDUCTOR NO LINEAL [42]. | 34 |
| FIG. 3.5 COMPORTAMIENTO GRÁFICO VARIANDO LA CAPACITANCIA [42]. | 35 |
| FIG. 3.6 EJEMPLO DEL VOLTAJE EN EL PUNTO INESTABLE FERRORESONANTE [38]. | 37 |
| FIG. 3.7 EJEMPLO DEL VOLTAJE EN EL PUNTO ESTABLE FERRORESONANTE DESPUÉS DEL TRANSITORIO INICIAL [38]. | 37 |
| FIG. 3.8 COMPORTAMIENTO AL VARIAR EL VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN AL EXISTIR FERRORESONANCIA [42]. | 38 |
| FIG. 3.9 CONFIGURACIÓN ESTRELLA DONDE PUEDE OCURRIR FERRORESONANCIA CON UNA FASE CERRADA [41]. | 39 |

| | |
|--|----|
| FIG. 3.10 CONFIGURACIÓN ESTRELLA DONDE PUEDE OCURRIR FERRORESONANCIA CON UNA FASE ABIERTA [41]..... | 40 |
| FIG. 3.11 CONFIGURACIÓN DELTA CON UNA FASE ABIERTA [42]. | 41 |
| FIG. 3.12 CONFIGURACIÓN EN DELTA CON DOS FASES ABIERTAS [42]. | 41 |
| FIG. 3.13 CONFIGURACIÓN ESTRELLA ATERRIZADA CON DOS FASES ABIERTAS [42]. | 42 |
| FIG. 3.14 ONDA DE VOLTAJE EN LA FERRORESONANCIA DE MODO FUNDAMENTAL [41]..... | 44 |
| FIG. 3.15 ONDA DE VOLTAJE EN LA FERRORESONANCIA CON MODO SUB-HARMÓNICA [41]..... | 45 |
| FIG. 3.16 ONDA DE VOLTAJE EN LA FERRORESONANCIA CON MODO CUASI-PERIÓDICO [41]. | 45 |
| FIG. 3.17 ONDA DE VOLTAJE EN LA FERRORESONANCIA CON MODO CAÓTICO [41]. | 46 |
| FIG. 4.1 SELECCIÓN DE UN INDUCTOR NO LINEAL EN ATPDRAW..... | 53 |
| FIG. 4.2 OBJETO DE UN INDUCTOR NO LINEAL EN ATPDRAW. | 53 |
| FIG. 4.3 VENTANA PARA INGRESAR DATOS DE CORRIENTE Y FLUJO DE UN TRANSFORMADOR. | 54 |
| FIG. 4.4 CURVA DE SATURACIÓN OBTENIDA CON LOS DATOS DE LA FIG. 4.3. | 54 |
| FIG. 4.5 SELECCIÓN DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO SATURABLE EN ATPDRAW. | 55 |
| FIG. 4.6 OBJETO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO SATURABLE EN ATPDRAW..... | 55 |
| FIG. 4.7 VENTANA CON LOS DATOS A INGRESAS PARA MODELAR EL TRANSFORMADOR EN ATPDRAW.... | 56 |
| FIG. 4.8 SELECCIÓN DE OBJETO <i>LCC TEMPLATE</i> | 57 |
| FIG. 4.9 OBJETO <i>LCC</i> PARA MODELAR CABLES SUBTERRÁNEOS..... | 58 |
| FIG. 4.10 VENTANA (<i>MODEL</i>) QUE PERMITE INGRESAR DATOS PARA MODELAR CABLES SUBTERRÁNEOS. | 58 |
| FIG. 4.11 VENTANA (<i>DATA</i>) PARA INGRESAR DATOS GEOMÉTRICOS DEL CABLE SUBTERRÁNEO A SIMULAR. | 59 |
| FIG. 4.12 OBJETO <i>AC SOURCE</i> (1&3). | 60 |
| FIG. 4.13 VENTANA <i>ATTRIBUTES</i> , PARA CONFIGURAR UNA FUENTE DE VOLTAJE | 61 |
| FIG. 4.14 CIRCUITO MONOFÁSICO PARA SIMULAR FERRORESONANCIA. | 62 |
| FIG. 4.15 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PRIMER CIRCUITO A) CAPACITANCIA DE 10 MF, B) CAPACITANCIA DE 0.1 MF C) CAPACITANCIA DE 0.0001 MF | 63 |
| FIG. 4.16 SISTEMA TRIFÁSICO SUBTERRÁNEO PARA EL ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA..... | 66 |
| FIG. 4.17 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 1 Y CON 50 M DE LONGITUD. | 67 |
| FIG. 4.18 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 1 Y CON 150 M DE LONGITUD. | 68 |
| FIG. 4.19 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 2 Y CON 50 M DE LONGITUD. | 69 |

| | |
|--|-----------|
| FIG. 4.20 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 2 Y CON 150 M DE LONGITUD. | 70 |
| FIG. 4.21 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 3 Y CON 50 M DE LONGITUD. | 71 |
| FIG. 4.22 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES EN CADA FASE PARA EL CASO 3 Y CON 150 M DE LONGITUD. | 72 |
| FIG. 4.24 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICO SUBTERRÁNEO PARA SIMULAR FERRORESONANCIA. | 75 |
| FIG. 4.25 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES FASES PARA LA FERRORESONANCIA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRANEO CON ACOPLAMIENTOS..... | 76 |
| FIG. 4.26 CABLE EN DISPOSICIÓN TRIANGULAR USADO EN LA SIMULACIÓN..... | 78 |
| FIG. 4.27 COMPORTAMIENTO DE LOS VOLTAJES FASES PARA LA FERRORESONANCIA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEO CON CABLES EN DISPOSICIÓN TRIANGULAR. | 79 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA I CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN [2] | 1 |
| TABLA II DATOS DE LA CURVA DE SATURACIÓN DEL INDUCTOR NO LINEAL DEL CIRCUITO 1 [42]. | 62 |
| TABLA III DATOS DE LA CURVA DE SATURACIÓN DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. | 64 |
| TABLA IV DATOS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES. | 65 |
| TABLA V DATOS DE LA CURVA DE SATURACIÓN DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO SUBTERRÁNEO..... | 73 |
| TABLA VI DATOS DE LA IMPEDANCIA PARA EL EQUIVALENTE DEL SISTEMA. | 73 |
| TABLA VII PARÁMETROS DE CONDUCTOR Y PANTALLA. | 74 |
| TABLA VIII TIEMPOS DE CIERRE DE LOS INTERRUPTORES. | 74 |
| TABLA IX POSICIÓN DE LAS FASES PARA CABLE CON DISPOSICIÓN TRIANGULAR..... | 77 |
| TABLA X COMPARATIVA CON LOS SOBREVOLTAJES OBTENIDOS EN TODOS LOS CASOS SIMULADOS..... | 79 |

Lista de símbolos y abreviaciones

| | |
|----------|---|
| SEP | Sistema Eléctrico de Potencia |
| RGD | Redes Generales de Distribución |
| PRODESEN | Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional |
| SENER | Secretaría de Energía |
| RMG | Radio medio geométrico |
| f | Frecuencia fundamenta del sistema |
| Ω | Ohm |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| EPS | Empresa Productiva Subsidiaria |
| Fig. | Figura |
| fem | Fuerza electromotriz |
| ATP | Electromagnetic Transient Program |
| π | Pi |
| ω | Frecuencia angular |
| pu. | Por unidad |
| T | Periodo |
| UPS | Uninterruptible Power Supply |
| TP | Transformador de Potencial |
| TC | Transformador de corriente |
| fp. | Factor de potencia |
| CA | Corriente Alterna |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción al problema de Ferroresonancia

La correcta operación de los sistemas eléctricos de potencia es uno de los objetivos principales de las compañías eléctricas, como es sabido, la mayor parte del tiempo trabajan en valores cercanos a sus valores nominales de voltaje y frecuencia, sin embargo estos sistemas están sujetos a perturbaciones de carácter transitorio y permanente, los cuales pueden ocasionar daño en los equipos y pérdidas económicas para las compañías eléctricas y los usuarios.

En general se considera que un sistema eléctrico de potencia engloba la generación, transmisión y distribución [1]. Siendo el sistema de distribución uno de los más importantes para que la compañía eléctrica venda su energía [2]. Los sistemas de distribución se utilizan para llevar energía eléctrica al público en general y se integran por redes de media tensión, las cuales (en México) van de 1 kV a 35 kV y redes de baja tensión cuyo suministro se da en niveles menores a 1 kV [3]. La Tabla I muestra una clasificación de los sistemas de distribución en 5 categorías:

Tabla I Clasificación de los sistemas de distribución [2]

| Clasificación | Tipo de carga |
|---|--|
| Sistema de distribución industriales | Plantas petroquímicas, de acero, de papel y otros procesos industriales similares. |
| Sistemas de distribución comerciales | Rascacielos, bancos, supermercados, escuelas, aeropuertos, hospitales, etc. |
| Parques industriales | Pequeñas o medianas industrias localizadas a las afueras de las ciudades, pueden ser similares a las anteriores; sin embargo, los requisitos de continuidad no suelen ser muy estrictos. |

Capítulo 1 Introducción

| | |
|---|---|
| Sistemas de distribución urbanos y residenciales | Zonas densamente pobladas. En grandes centros urbanos las cargas pueden ser considerables pero no comparables con las cargas industriales |
| Distribución Rural | Tiene la densidad de carga más baja con grandes distancias y cargas pequeñas como pequeños poblados |

Debido a la importancia de estos sistemas se vuelve fundamental analizar y poder prevenir cualquier tipo de falla en los mismos, ya que además todos estos sistemas se diseñan para que sean continuos, con buena regulación de voltaje y buena regulación de frecuencia. Sin embargo el factor económico también suele jugar un papel importante en el diseño de estos sistemas.

La teoría relacionada con fallas en sistemas eléctricos aéreos ha sido estudiada por varios años y se han propuesto soluciones para fenómenos como sobrevoltajes, sobrecorrientes, detección y localización de fallas etc. Sin embargo, los fenómenos en redes subterráneas tienen una amplia área de oportunidad, uno de los fenómenos, el cual es de interés en este trabajo de tesis está relacionado con la ferresonancia en redes subterráneas.

Las redes subterráneas han favorecido su expansión sobre todo en las zonas urbanas de alta densidad de carga debido a las ventajas que presentan ante las redes aéreas. Las principales son la confiabilidad de servicio y la estética que estas instalaciones proporcionan al medio [2]. Cabe mencionar, que solamente en áreas urbanas o donde el espacio o la estética son importantes pueden ser justificables usar alimentadores subterráneos, los cuales tienen un costo de 3 a 10 veces el de los aéreos.

En México fue en los años 60s que CFE inició la construcción de sistemas subterráneos, pero fue en la década de los 80 que los inversionistas comenzaron a interesarse en construir redes subterráneas en desarrollos turísticos, comerciales y residenciales. Ya para los 90s, las autoridades en conjunto con la CFE implementaron este tipo de redes en centros históricos, dándoles un gran contraste al aspecto visual y a la seguridad. A partir del año 2000 se comenzaron a implementar las redes de distribución subterránea en la construcción y urbanización de cargas residenciales [4].

Actualmente y a partir de la Reforma Energética el país se encuentra dividido en 16 Unidades de Negocio que forman parte de la EPS de la Comisión Federal de Electricidad

Capítulo 1 Introducción

denominada CFE Distribución quienes se encargan de prestar el servicio público de Distribución de Energía Eléctrica [5].

En junio de 2019 la SENER publicó el PRODESEN 2019-2033 [3] el cual menciona que para el 2018, la capacidad de las subestaciones instaladas para distribución era de 75,151 MVA, y la longitud total de las líneas de distribución era de 838,831 km. De las cuales el 61.1% corresponde a líneas en media tensión y 38.9% a líneas en baja tensión. En ese mismo documento se menciona un programa de ampliación y modernización de las Redes Generales de Distribución (RGD) donde se considera un crecimiento ordenado y armónico de las RGD, y que tiene como objetivo satisfacer la demanda incremental, mejorar la eficiencia, calidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica, e identificar aquellas comunidades rurales y zonas urbanas marginadas que no cuentan con energía eléctrica. Sin embargo, la estabilidad y confiabilidad de estos sistemas no depende solamente de la manera en que fueron diseñados, ya que como es sabido, hay diferentes motivos por los cuales se puede presentar alguna falla en el sistema, desde maniobras comunes, hasta fenómenos naturales.

Uno de los problemas que se presentan en redes subterráneas es la ferresonancia, la cual se manifiesta en forma de sobrevoltajes debido al conjunto de elementos que intervienen en el sistema subterráneo de distribución como son la inductancia del transformador y la capacitancia.

Por tal motivo a través de los años el análisis de este fenómeno ha sido de gran importancia, en ese sentido se han desarrollado diferentes herramientas computacionales que ayudan a simular casos reales para que de esa manera se pueda observar el comportamiento del fenómeno, por ello este trabajo de tesis está enfocado en describir y analizar el fenómeno de la ferresonancia en los sistemas de distribución subterráneos y con ayuda del simulador ATPDraw simular el fenómeno para así dar recomendaciones preventivas de alguna posible falla.

1.2 Estado del arte

Uno de los principales objetivos de las compañías eléctricas es detectar y prevenir posibles fallas en los sistemas de distribución y en los SEP debido a todos los problemas que pueden provocar. En este sentido, cada vez hay más interés en analizar los fenómenos que pudieran ocasionar dichos problemas. Uno de los fenómenos que siguen latentes en la actualidad es el fenómeno de la ferresonancia principalmente en sistemas subterráneos. La ferresonancia puede definirse [1] como un fenómeno oscilatorio que provoca sobretensiones transitorias o sostenidas el cual es causado por la interacción de la capacitancia del sistema con la inductancia no lineal del transformador, como consecuencia genera daños en los equipos de algunos sistemas de distribución ya que, por sus características, estos sistemas cumplen con las condiciones necesarias para que este fenómeno pueda presentarse. Debido a las características de diseño, los cables de los sistemas eléctricos de distribución subterráneos presentan una capacitancia mucho mayor que los conductores aéreos [1]. Es por esto que se han desarrollado diversos estudios para explicar y comprender de mejor manera el fenómeno y así buscar posibles soluciones.

La primera vez que apareció la palabra ferresonancia en la literatura fue en 1920 [6] describiendo el fenómeno como la interacción de un circuito con una inductancia no lineal y una capacitancia, el cual presenta dos puntos de operación en estado estable a frecuencia fundamental. Aunque desde 1907 [7] ya existían publicaciones sobre resonancia en transformadores. En 1930 [8] hubo un mayor interés debido a que se demostró que al usar capacitores en serie para la regulación de voltaje provocaban ferresonancia en los sistemas de distribución, resultando en sobretensiones dañinas al equipo eléctrico. En este sentido, los primeros análisis surgieron alrededor de los años 30s y 40s, usando métodos gráficos que aparecieron en la literatura, siendo Rudenberg [9] quien apoyado del método gráfico mostrara múltiples puntos de operación y mostrara el efecto de variación de parámetros.

Posteriormente Hayashi [10] realizó un trabajo más exacto en la década de los 50s para mostrar gráficamente esos puntos resonantes. Consecuentemente las investigaciones comenzaron a enfocarse en mejorar los modelos de los transformadores o bien estudiar la

Capítulo 1 Introducción

ferroresonancia a nivel del sistema [11]. Hopkinson [12] realizó pruebas y simulaciones sobre el efecto de la ferroresonancia al realizar switcheos en sistemas trifásicos. Smith [13] partiendo de un transformador trifásico de distribución realizó una clasificación de los modos de ferroresonancia basándose en la magnitud y forma de onda del voltaje.

Este fenómeno fue reconocido por primera vez como un problema en los sistemas de distribución cuando se introdujeron sistemas rurales aéreos de 25 kV a principios de la década de 1950 [14, 15]. Pero debido a la alta capacitancia por unidad de pie que mostraban los cables, la ferroresonancia se volvió un tema mayormente enfocado a sistemas de distribución subterráneos [16].

Ante el riesgo de alguna posible falla se desarrollaron algunos métodos para dar solución al problema de la ferroresonancia. La Fig. 1.1 muestra la característica necesaria para que un circuito sea ferroresonante. En la figura se muestra un circuito RLC con inductancia no lineal.

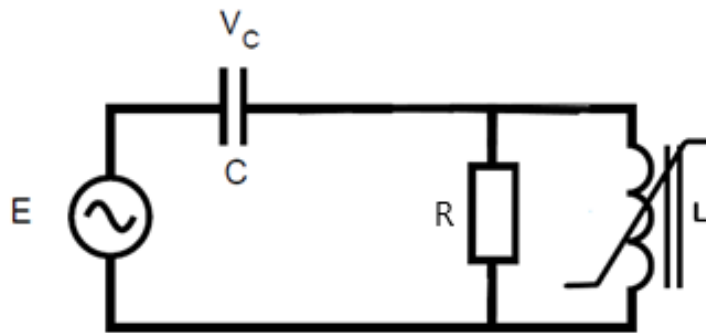


Fig. 1.1 Circuito ferroresonante.

Las primeras soluciones propuestas se enfocaron en modelar la curva de magnetización del transformador (inductancia no lineal), comenzaron a modelarla [17, 18] mediante polinomios del orden de 3 a 7, sin embargo eso presentaba limitaciones ya que al ser 7 el grado máximo del polinomio sólo se podían modelar transformadores de baja capacidad pues para los de mayor capacidad no se lograba representar adecuadamente la zona de saturación del transformador [19]. Esto representó un problema, ya que durante la ferroresonancia el punto operación (en el cual se puede presentar el fenómeno) del transformador se localiza en la región de saturación, debido a ello buscaron [19] modelar la

Capítulo 1 Introducción

curva de magnetización con un polinomio de 2 términos de grado 11 en términos de flujo como se muestra en la ecuación (1.1).

$$i = a\Phi + b\Phi^{11} \quad (1.1)$$

Donde i es la corriente de magnetización, el primer término de la ecuación corresponde a la región lineal de la curva de magnetización y el segundo término (de mayor orden), es el que aproxima la región de saturación. El coeficiente a corresponde a la inductancia magnetizante no saturada ($a \approx 1/L$), mientras que el término b y el exponente se eligen de tal manera que se obtenga el mejor ajuste para la región de saturación. La Fig. 1.2 muestra de mejor manera la región de saturación para diferentes exponentes del término no lineal de la ecuación (1.1). Y tal como se aprecia en la figura, los polinomios de grado 7 o menor [17, 18] no dan una buena aproximación a la zona de operación de la curva.

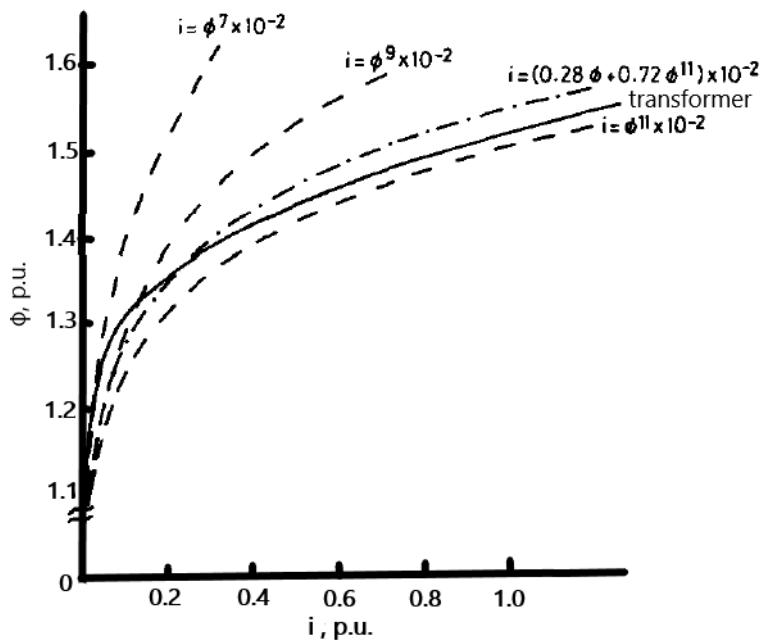


Fig. 1.2 Aproximación a la región de saturación de la curva de un transformador [19].

Debido a que estas aproximaciones son más exactas, lograron modelar de forma general la curva de saturación del transformador como un polinomio de grado 'n', lo cual fue

Capítulo 1 Introducción

fundamental para obtener la ecuación diferencial no lineal (1.2) que modelaba el circuito ferresonante de la Fig. 1.1. [19]

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d\Phi}{dt} + \frac{1}{C} (a\Phi + b\Phi^n) = \omega_s E \cos(\omega_s t) \quad (1.2)$$

Estos avances, sentaron las bases para que se desarrollaran diversos métodos para dar solución a la ecuación diferencial, tanto gráficos como teóricos, uno de los primeros en aparecer fue el método de balance armónico de Ritz [19] el cual permitió mostrar regiones seguras y ferresonantes en el sistema en función de los parámetros del circuito.

Otro de los métodos más conocidos es el Galerkin [20]. Este método surgió como otra alternativa para resolver el circuito ferresonante. La principal característica de este método es que se adapta a cualquier tipo de circuito, debido a que consiste en obtener una equivalente de Thevenin de la parte lineal del circuito y analizar forma separada la parte no lineal del circuito tal y como se muestra en la Fig. 1.3.

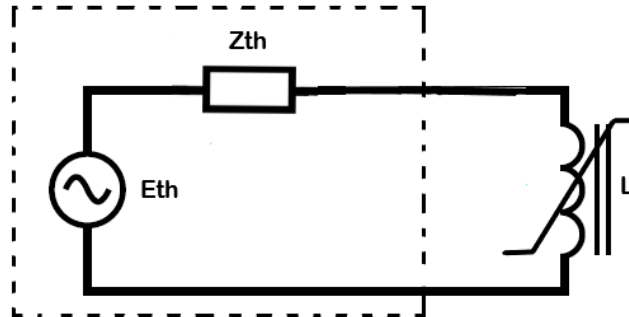


Fig. 1.3 Equivalente de un circuito ferresonante.

En la figura anterior, la parte no lineal del circuito la analizan a partir del flujo del transformador utilizando series Fourier y otras herramientas matemáticas de iteración (como Newton-Raphson) para obtener soluciones periódicas. Sin embargo, debido a que se utiliza un método numérico, las iteraciones del método presentaron problemas de inicialización y convergencia. Debido a estas limitaciones desarrollaron el método de pseudo longitud de arco, el cual además de solucionar las limitaciones que tenía el método

Capítulo 1 Introducción

de Galerkin, permitía obtener las componentes características de la frecuencia fundamental, tercera subarmónica y tercera armónica para los casos de ferresonancia serie [20].

Aun así habían ciertas limitantes debido a que la mayoría de los métodos eran para encontrar soluciones periódicas múltiples de un circuito ferresonante, pero no eran aplicables a soluciones no periódicas, es decir a los modos cuasi-periódicos y caóticos. Por lo que posteriormente buscaron solucionar la ecuación diferencial con ayuda de la teoría de dinámica de sistemas no lineales [21, 22, 23]. Encontrando que además de las soluciones periódicas o cuasi-periódicas, también existían soluciones caóticas para la ecuación diferencial. Debido a esto los posteriores esfuerzos se centralizaron en ver el comportamiento y encontrar posibles soluciones a ferresonancias que no tenían un comportamiento periódico [24].

Como se puede notar, muchos de los trabajos e investigaciones sobre el fenómeno de la ferresonancia se han enfocado en análisis matemáticos complejos y experimentos en campo que además fueron hechos con equipos especializados en SEP [19], lo cual demuestra que la ferresonancia no es un fenómeno exclusivo para los sistemas de distribución subterráneos, ya que el fenómeno también se ha presentado en parques eólicos [25], plantas hidroeléctricas [26] y en demás sistemas de generación y transmisión [27, 28]. Todo esto representa un área de oportunidad para estudiar este fenómeno desde la perspectiva de los sistemas de distribución subterráneos y realizar simulaciones que ayuden a dar recomendaciones necesarias para evitar posibles fallas debidas al fenómeno.

1.3 Planteamiento del problema

Actualmente uno de los temas más importantes en la ingeniería eléctrica es la calidad de la energía, esto implica diversas cuestiones, pero sin lugar a dudas uno de los más importantes tiene que ver con la continuidad del servicio eléctrico. Uno de los problemas que puede afectar la continuidad del servicio son las fallas eléctricas. Existen diversos motivos por los cuales se puede presentar una falla en el sistema eléctrico.

La ferresonancia, al ser un fenómeno que provoca sobrevoltajes, ha sido catalogada como un tipo de falla la cual suele presentarse, comúnmente, en los sistemas de distribución

Capítulo 1 Introducción

subterráneos. Por ello resulta relevante analizar y entender este fenómeno así como sus diversas causas que ponen en riesgo la continuidad del servicio eléctrico.

1.4 Motivación y justificación de la tesis

Los sistemas eléctricos de distribución subterráneos son ampliamente utilizados y continúan en expansión en zonas turísticas, centros históricos, parques eólicos, zonas residenciales y lugares donde no es posible llevar una línea de distribución aérea, o bien donde por condiciones sea necesario usar este tipo de sistemas ya que sus costos son altos. A pesar de su alta confiabilidad y eficiencia, están expuestos a fenómenos de ferresonancia. Este tipo de problemas se presentan cuando se dan las condiciones necesarias en un circuito ferresonante provocando sobrevoltajes que pueden llegar a dañar el equipo o las instalaciones. Debido a esto, existe preocupación por evitar este tipo de fallas así como desarrollo e investigación en redes eléctricas inteligentes que puedan prevenir este tipo de problemas. En ese sentido, esta tesis se desarrolla bajo el interés de estudiar y comprender el fenómeno de la ferresonancia en los sistemas de distribución subterráneos, debido a que como ya se mencionó estos sistemas suelen estar muy propensos a fallas por dicho fenómeno y a que alguna falla en ellos pueda repercutir en pérdidas económicas muy costosas. Por tal motivo este trabajo se ve impulsado para analizar el fenómeno de ferresonancia, y tener un punto de partida en el desarrollo de posibles trabajos y tecnologías para el futuro.

1.5 Objetivo

El objetivo general de este trabajo es analizar el fenómeno de la ferresonancia, por lo que nos apoyaremos de la diversa documentación existente, de algunas normas así como del simulador ATPDraw para poder evaluar las condiciones necesarias para la aparición del fenómeno y de esa manera prevenir alguna falla.

Para lograr este objetivo general se requieren los siguientes objetivos específicos:

- Explicar el fenómeno de la ferresonancia analizando diversa bibliografía que ayude a comprender por qué se presenta la ferresonancia.

Capítulo 1 Introducción

- Analizar por qué los sistemas subterráneos son más propensos a ferresonancia partiendo de estudiar los componentes de un sistema subterráneo como cables y transformadores y el efecto de tener carga conectada a dichos transformadores con ayuda de las simulaciones.
- Analizar el efecto de variar la longitud del cable con ayuda de las simulaciones.
- Analizar los diferentes tipos de conexiones de transformadores ante la presencia de la ferresonancia investigando casos anteriores, que existen en la bibliografía, para ver qué conexiones hacen que el sistema se más propenso a ferresonancia.

1.6 Hipotesis

La ferresonancia se da debido a la capacitancia de los cables y el efecto no lineal del transformador, entre más largo son los cables más capacitancia existirá por lo que al limitar dicha longitud el fenómeno también podría limitarse. Este fenómeno es aleatorio y es difícil de predecir, pero realizar diversas simulaciones del sistema con condiciones ferresonantes ayuda a saber qué hacer o cómo prevenir causas catastróficas provocadas por el fenómeno. Existen diversas conexiones y configuraciones que hacen más propenso a que se presente ferresonancia en el SEP, así como diversos tipos de ferresonancia siendo algunos más graves que otros. El uso de cargas resistivas ayuda a amortiguar los sobrevoltajes causados por ferresonancia.

1.7 Organización de la tesis

La tesis comprende cinco capítulos.

- El **Capítulo 1** presenta un panorama general de la actualidad de los sistemas de distribución subterráneos, su evolución y su importancia al día de hoy. En el estado de arte se habla de un contexto histórico acerca del fenómeno de la ferresonancia y se exponen antecedentes de diversos trabajos realizados para describir dicho fenómeno.
- El **Capítulo 2** estudia el funcionamiento de un transformador y de los cables subterráneos, para entender su relación con la ferresonancia. Se explica cómo se

Capítulo 1 Introducción

genera la curva de histéresis, la cual es fundamental entender para explicar la presencia de ferresonancia en un sistema de distribución y por qué esta máquina es susceptible a fallas por ferresonancia. También se explica por qué los cables subterráneos pueden llegar a tener ciertas características capacitivas que los hacen más susceptibles a la ferresonancia así como algunos parámetros de diseño.

- En el **Capítulo 3** se aborda de manera detallada el fenómeno de la ferresonancia, partiendo de la definición y de la explicación de la resonancia en un SEP, se da una definición más exacta de la ferresonancia y se explican los tipos de ferresonancia existentes, así como las causas, los sistemas o tipos de conexiones que hacen que el fenómeno pueda presentarse y algunas normas que hablan sobre el fenómeno.
- El **Capítulo 4** aborda los casos de estudio a simular. Se parte de un sistema monofásico que ayuda a entender el fenómeno de la ferresonancia, para seguir con un trifásico subterráneo donde se varía la distancia y llegando a los casos finales con un sistema subterráneo simulado con valores reales y modificando la disposición de los cables.
- El **Capítulo 5** presenta las conclusiones, se discuten los resultados obtenidos en las simulaciones y en base a esto y la investigación hecha se dan las recomendaciones necesarias para prevenir fallas debido al fenómeno de la ferresonancia.

Capítulo 2

Transformadores y cables subterráneos

2.1 Introducción

En este capítulo se hace un repaso de los principales elementos eléctricos que componen un circuito ferresonante, es decir el transformador y los cables.

Para el caso del transformador se abordarán algunas leyes y conceptos necesarios para entender el funcionamiento de esta máquina eléctrica esencial en la conformación de un SEP tanto para la generación, transmisión y distribución. Se hará énfasis en la curva de histéresis y en cómo se genera esta, debido a que se vuelve un elemento de suma importancia para entender la ferresonancia.

En el caso de los cables también tienen un papel importante en este trabajo de tesis ya que como se vio en el capítulo 1, para que se pueda presentar la ferresonancia, estos circuitos también requieren de cierta capacitancia la cual es aportada por lo cables. Además en este capítulo se verán las características que hacen que los cables presenten una capacitancia mayor que los conductores aéreos y que hace que los sistemas subterráneos sean más susceptibles a la ferresonancia.

2.2 Materiales y circuitos magnéticos

Todos los imanes manifiestan sus efectos en un cierto espacio al cual se le llama campo magnético y el cual está compuesto por líneas de flujo que forman espiras continuas que pasan a través del material imantado como se muestra en la Fig. 2.1. [29].

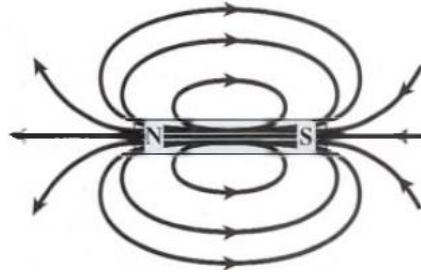


Fig. 2.1 Líneas de flujo de una barra imantada [29].

Si en alguna región del campo magnético se interpone un material o medio, se podrá notar que algunas líneas de flujo se desvían atravesando dicho material o medio. A las líneas que atraviesan el material o medio se le llama densidad de flujo magnético.

Este fenómeno se da debido a la permeabilidad magnética que se define como la característica del material o medio que constituye la medida de su capacidad para establecer líneas de flujo magnético. Es decir que cuanto mayor sea la permeabilidad magnética del material o medio, más líneas de flujo lo atravesarán, tal y como se muestra en la Fig. 2.2. [29].

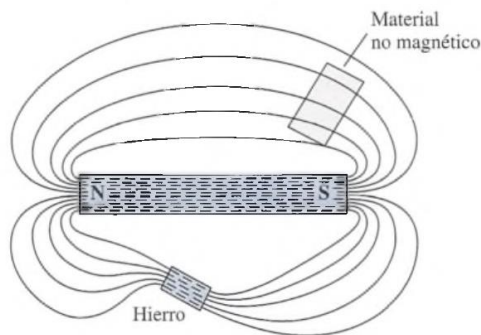


Fig. 2.2 Ejemplo de densidad de flujo magnético en diferentes materiales [29].

Gracias a este concepto se pueden clasificar los materiales magnéticos de acuerdo a su permeabilidad, comparada con la del vacío. Los materiales con una permeabilidad relativa poco menor a la unidad se les llama diamagnéticos. Los materiales con una permeabilidad ligeramente mayor que la del vacío se dice que son paramagnéticos. Y sólo unos cuantos materiales como hierro, cobalto, níquel, acero y aleaciones de estos metales, son conocidos como ferromagnéticos ya que presentan mayor permeabilidad debido a sus propiedades

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

magnéticas y por ello son de vital importancia para el funcionamiento de un transformador debido a que este tipo de materiales nos ayudan a canalizar y concentrar altas densidades de flujo magnético en las regiones donde se necesita [29].

Un circuito magnético está formado generalmente por una estructura de hierro, sobre la que se enrollan una o más bobinas por las que circulan corrientes, que dan lugar a los flujos que aparecen en el sistema. Al ser el hierro un material ferromagnético, ofrece la ventaja de tener una permeabilidad magnética e imanación grande aun en presencia de campos magnéticos débiles [30]. Para poder entender el funcionamiento e importancia de los materiales ferromagnéticos en los transformadores, es necesario entender cómo se genera el campo magnético a partir de una corriente eléctrica.

La ley de Ampere [31] calcula el campo magnético que se produce a través de una corriente a partir de la ecuación (2.1).

$$\oint \mathbf{H} * dl = I_{neta} \quad (2.1)$$

Donde \mathbf{H} es la intensidad del campo magnético que se produce por la corriente I_{neta} , y dl es el elemento diferencial a lo largo de la trayectoria de integración. Siendo la unidad (en el SI) de I amperes y de H amperes-vuelta por metro. Si se le da solución a la integral considerando un núcleo de algún material ferromagnético, casi todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá dentro del núcleo de la Fig. 2.3, de modo que el camino de integración es la longitud media del núcleo (l_n). La corriente que pasa por la longitud media del núcleo (I_{neta}) es entonces Ni , puesto que la bobina de alambre corta el camino de integración N veces mientras pasa la corriente i . Debido a todo esto, la ley de Ampere se reduce a la ecuación (2.2).

$$Hl_n = Ni \quad (2.2)$$

donde H es la magnitud del vector de intensidad del campo magnético \mathbf{H} , al despejar H obtenemos la ecuación (2.3) que calcula la magnitud del campo magnético en el núcleo debido a la corriente.

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

$$H = \frac{Ni}{l_n} \quad (2.3)$$

También si se conoce la intensidad de campo magnético \mathbf{H} y la permeabilidad magnética del material, del cual está hecho el núcleo, se puede encontrar la densidad del flujo magnético producida dentro del material con la expresión (2.4).

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (2.4)$$

Donde:

\mathbf{H} = Intensidad del campo magnético

μ = Permeabilidad magnética del material

\mathbf{B} = Densidad de flujo magnético resultante

A partir de las ecuaciones anteriores, considerando que la densidad de flujo es constante y perpendicular a un plano del área A y con ayuda de la expresión (2.5) (sección transversal del núcleo ferromagnético) se puede calcular el flujo total en el núcleo de la Fig. 2.3.

$$\Phi = \frac{\mu NiA}{l_n} \quad (2.5)$$

Donde A es el área de la sección transversal del núcleo [31].

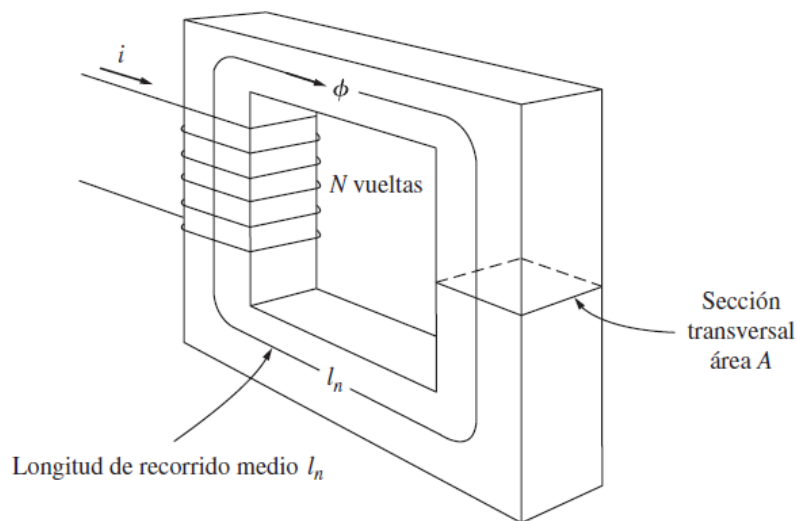


Fig. 2.3 Núcleo de material ferromagnético [31].

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

Como se ha visto, a partir de una corriente que circula por una bobina que está enrollada en un núcleo se produce un flujo magnético (en el núcleo). Con esto es posible hacer una analogía entre los circuitos eléctricos y los circuitos magnéticos, es decir, ya que en los circuitos eléctricos un voltaje genera flujo de corriente, entonces de forma análoga en un circuito magnético al aplicar una corriente en una bobina se producirá fuerza magnetomotriz que dependerá de la corriente que circula en el devanado y del número de vueltas del mismo, tal y como se muestra en la ecuación (2.6).

$$F_{mm} = Ni \quad (2.6)$$

Entender estos conceptos es de suma importancia debido a que son los principios de funcionamiento de un transformador.

2.3 Comportamiento de los materiales ferromagnéticos y curva de histéresis

Para entender un poco más sobre la naturaleza de los materiales ferromagnéticos en la Fig. 2.4 se puede ver el comportamiento de estos materiales al aplicar una corriente.

En un inicio se puede decir que se tiene un estado magnéticamente neutro debido a que los dominios (regiones en las que todos los átomos se alinean con sus campos magnéticos apuntando en una misma dirección) están orientados al azar, lo cual resulta en un momento magnético nulo [30].

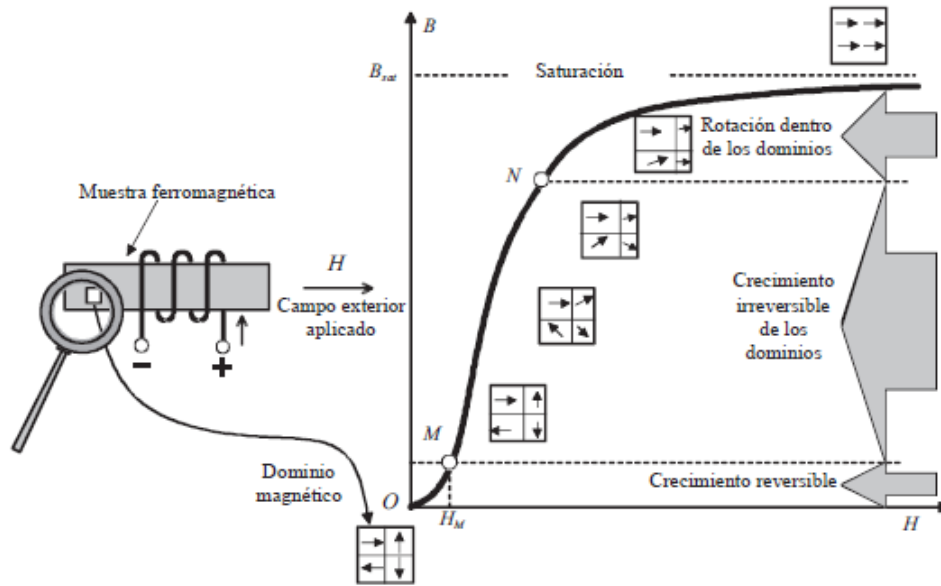


Fig. 2.4 Curva de magnetización con corriente directa de un material ferromagnético [30].

Si se comienza a aplicar una corriente directa al núcleo, como se muestra en la Fig.2.4, el flujo aumentará e internamente se producirá un desplazamiento de las paredes que separan los dominios, ensanchándolos, a costa de los que están orientados menos favorablemente, lo cuales se contraen. Conforme se aumenta la corriente también se incrementa el valor de H , los dominios continuaran aumentando de volumen, a la par que van produciéndose rotaciones bruscas para que sus momentos magnéticos sigan la dirección más próxima a H . Este movimiento es irreversible, e incluso si se deja de excitar el núcleo, permanece la alineación de los dominios que han rotado. Conforme aumenta el valor de H , el proceso de alineación continuará, hasta que los dominios estén completamente alineados a lo cual se le conoce como región de saturación y se dice que el núcleo ha sido saturado [30].

El ejemplo anterior ayudó a entender cómo se forma la curva de magnetización o saturación al aplicar una corriente directa, sin embargo se sabe que la mayoría de los SEP trabajan con corriente alterna por eso la Fig. 2.5 muestra lo que pasa al aplicar una corriente alterna.

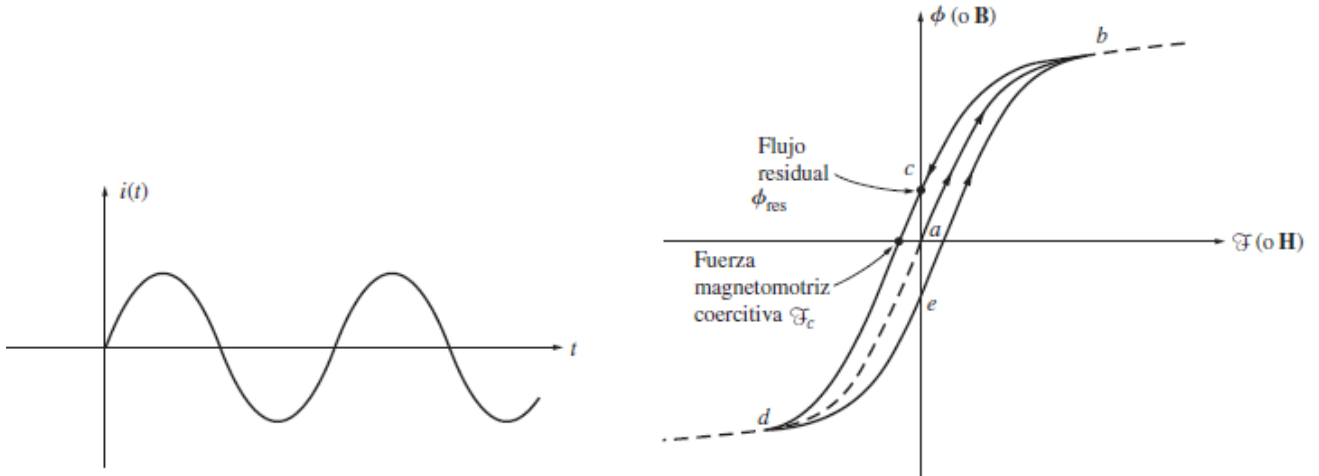


Fig. 2.5 Curva de histéresis a aplicar una corriente alterna [31].

Primero se puede apreciar que en el punto a el material no ha sido magnetizado y la inducción magnética es cero, al comenzar a aplicar una corriente alterna el campo aumenta y los dominios buscan alinearse hasta conseguirlo y entrar en saturación, por lo cual el flujo sigue la trayectoria $a-b$ de la Fig. 2.5, cuando la corriente comienza a disminuir se aprecia que el flujo sigue una trayectoria diferente que es $b-c-d$, hasta que vuelve a incrementarse la corriente y entonces el flujo sigue la trayectoria $d-e-b$ completando la curva a la cual se le denomina curva de histéresis [31].

La curva de histéresis se forma debido a que al llegar a la zona de saturación los dominios están completamente alineados en dirección del campo, sin embargo cuando la corriente comienza a disminuir los dominios no se ubican de nuevo al azar, por ejemplo en el punto c la intensidad de campo magnético se ha anulado (la corriente se anula), pero el flujo no llega a cero porque permanece cierto flujo en el núcleo al cual se le llama flujo residual causante de los imanes permanentes. Para que el flujo se pueda hacer cero, se necesita aplicar una fuerza magnetomotriz, en dirección opuesta, llamada fuerza magnetomotriz coercitiva F_c . Esto se debe a que los átomos del material ferromagnético requieren energía para recuperar su posición anterior y cuando la corriente disminuye el campo magnético (en consecuencia) también lo hace por lo que ya no existe una fuente que ayude a que los dominios regresen a sus posiciones. Estas características se encuentran presentes en los transformadores que se instalan en los SEP.

2.4 Transformadores

El transformador es una máquina eléctrica estática la cual tiene como propósito principal convertir potencia alterna de un nivel de voltaje en potencia alterna de la misma frecuencia pero de diferente voltaje (sea menor o mayor) mediante la acción de un campo magnético. Básicamente está compuesto de dos o más bobinas de alambre conductor que se enrollan alrededor del núcleo ferromagnético común el cual tiene como función conducir el flujo magnético generado por los devanados. Regularmente estas bobinas no se conectan de forma directa, la única conexión que existe entre ellas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo [31].

Uno de los devanados del transformador se conecta a una fuente de energía eléctrica alterna, este devanado es comúnmente llamado primario y el segundo devanado (llamado comúnmente como secundario) suministra energía eléctrica a las cargas tal y como se muestra en la Fig. 2.6.

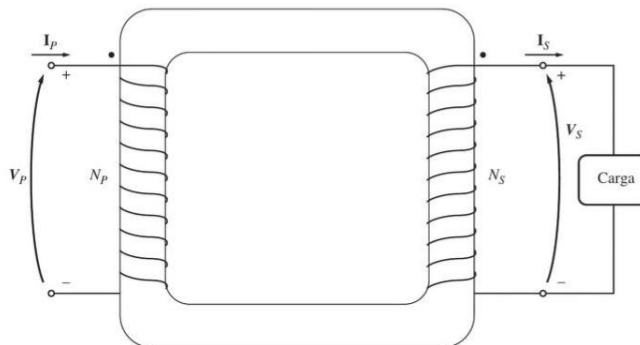


Fig. 2.6 Transformador con carga conectada a secundario [31].

Como se mencionó, la función principal del transformador es la de transformar la energía eléctrica, con unas magnitudes de voltaje y corriente, a otras con valores generalmente diferentes.

Como se mostró anteriormente, la fuerza magnetomotriz se genera a partir de una corriente eléctrica, en el lado primario del transformador, pero para entender cómo el transformador puede aumentar o disminuir el voltaje en el lado secundario, es necesario hacer mención de la Ley de Faraday, mostrada en la ecuación (2.7), la cual nos dice que si se tiene un flujo

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

magnético y atraviesa una o varias espiras de alambre conductor, inducirá un voltaje (en la terminales de dicho alambre) directamente proporcional a la variación del flujo con respecto al tiempo.

$$e_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.7)$$

Considerando todos los principios y leyes vistos en el capítulo, y considerando la analogía que existe entre un circuito magnético y un eléctrico se puede decir que si se conecta una fuente alterna de voltaje del lado del devanado primario de un transformador, se inducirá una corriente alterna que producirá una fem y un flujo magnético variable en el núcleo. El flujo que se produjo y el cual circula en el núcleo del transformador, inducirá un voltaje o fem en el devanado secundario del transformador tal como se puede apreciar en la Fig. 2.7.

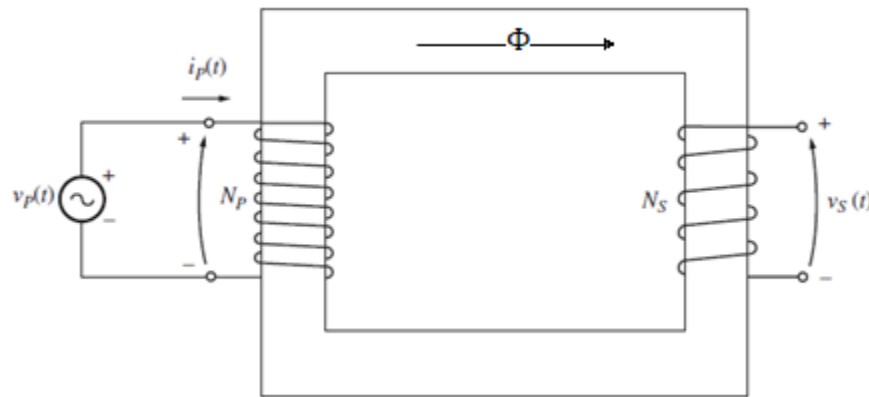


Fig. 2.7 Transformador conectado a una fuente de voltaje alterno [31].

En la ecuación (2.8) se muestra la relación entre el voltaje que se aplica al devanado primario (con N_p vueltas de alambre) y el voltaje que se induce en el devanado secundario (con N_s vueltas de alambre).

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (2.8)$$

Donde a es la relación de transformación del transformador.

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

Como se puede notar, el voltaje que se tendrá en los devanados depende directamente del número de vueltas del alambre conductor que se tenga, haciendo que se pueda elevar o reducir el voltaje según sea el propósito para el cual se use el transformador.

Estos análisis han sido en transformadores monofásicos, pero es conveniente que se analice de manera trifásica ya que la mayoría de los SEP son trifásicos de corriente alterna, por lo cual se vuelve esencial hablar de ellos.

Los transformadores trifásicos pueden ser diseñados de dos distintas maneras. La primera de ellas consiste en que se use un transformador monofásico por cada fase y así armar un banco trifásico. La segunda manera es usando un solo núcleo con tres columnas en el cual se enrollan los devanados tanto primarios como secundarios de cada fase tal y como se muestra en la Fig. 2.8 [30, 31].

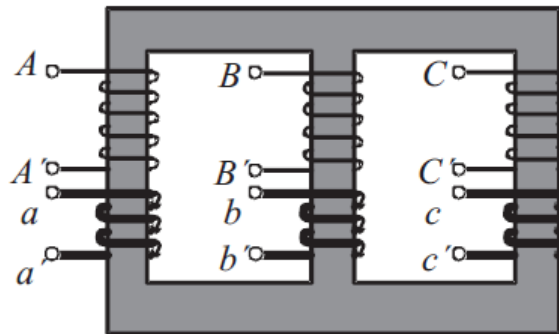


Fig. 2.8 Transformador trifásico construido sobre un núcleo de tres columnas [30].

En la Fig. 2.8 cada columna del núcleo representa una fase, empleando las letras *A*, *B* y *C* para los devanados primarios y *a*, *b* y *c* para los devanados secundarios por lo cual para su estudio se considera cada columna del núcleo como si fuera un transformador monofásico haciendo que podamos usar las mismas ecuaciones descritas anteriormente. Las formas más comunes y usadas para conectar estos transformadores son:

- Estrella – Estrella (Y-Y).
- Estrella – Delta (Y- Δ).
- Delta – Estrella (Δ -Y).
- Delta – Delta (Δ - Δ).

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

Hasta ahora se ha hablado del transformador y de sus características no lineales que hacen que sea un elemento fundamental en los circuitos que pueden ser ferresonantes, sin embargo como se vio en el capítulo 1, para que se pueda presentar la ferresonancia, estos circuitos también requieren de cierta capacitancia.

2.5 Cables subterráneos.

Cuando a una línea de transmisión o distribución se le aplica un cierto voltaje, los conductores adquieren cierta carga y comienza a transportar corriente lo cual provoca que exista un voltaje entre ellos haciendo que se carguen como si fueran las placas de un capacitor. En las líneas aéreas esta capacitancia depende de la longitud de la línea, de la geometría de los conductores y de la distancia que existe entre los conductores (fases) o entre los conductores y el plano de tierra [32]. La ecuación (2.9) muestra la intervención de estos parámetros para el cálculo la capacitancia entre 2 conductores llamados A, B.

$$C_{AB} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} F/m \quad (2.9)$$

Donde,

ϵ_0 = Permitividad del vacío.

d = Distancia del centro de un conductor al centro del otro conductor.

r = Radio exterior del conductor.

En el caso de las líneas aéreas cortas (menores a 80 km) la capacitancia no es significativa, ya que la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo. Para líneas que operan a 100 kV aproximadamente y que tienen una longitud entre 80 y 240 km la capacitancia se concentra en un punto pero aún no es muy significativa. En el caso de las líneas de voltaje más alto y con una longitud mayor a los 240 km ya se tiene una capacitancia significativa que se distribuye uniformemente a lo largo de la línea [32, 33]. En los sistemas de distribución aéreos, las líneas se consideran como cortas y al modelarlas se desprecia la admitancia en derivación. Sin embargo en cables subterráneos la capacitancia no depende solamente de lo largo que pueda ser la línea o del voltaje que

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

existe entre las fases, debido a que también existe una capacitancia que se debe al diseño y construcción de los cables subterráneos.

Una manera de notar el efecto capacitivo que existe en los cables, es analizando un cable monopolar que está aislado a través de una pantalla de aislamiento como el que se muestra en la Fig. 2.9.

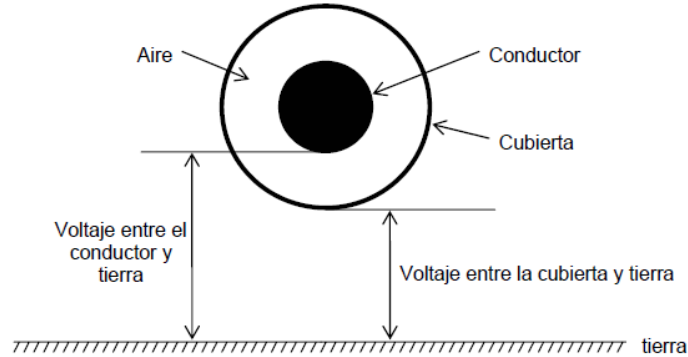


Fig. 2.9 Cable aislado por una pantalla aislante.

El voltaje entre el conductor y tierra es el mismo que si el aislante fuera el aire, además de también se genera un voltaje entre la cubierta aislante y tierra debido a que existe una impedancia entre el material aislante que cubre al conductor y tierra. El tipo de material aislante a usar depende más de cuestiones mecánicas que eléctricas ya que influyen diversos factores como el medio ambiente, la proximidad y contacto con otros objetos etc.

En el caso de ese mismo cable mostrado en la Fig. 2.9, conforme se acerca a plano de tierra e incluso cuando la cubierta aislante toca tierra, las líneas de campo eléctrico tienden a distorsionarse e irse hacia el plano de tierra como se muestra en la Fig. 2.10, haciendo que exista un voltaje entre la superficie aislante y el plano de tierra, que para niveles de tensión operativa bajos, es insignificante.

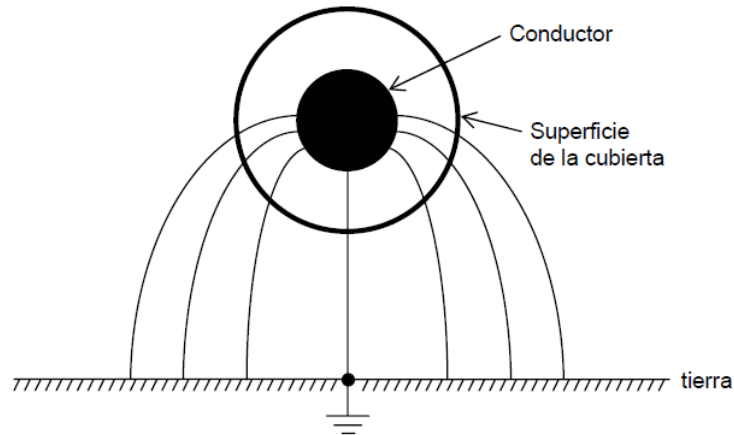


Fig. 2.10 Líneas de campo eléctrico distorsionadas al plano de tierra.

Sin embargo si el voltaje de operación comienza a aumentar, el voltaje en el conductor se incrementará lo suficiente para hacer fluir una corriente a través de la cubierta de la superficie aislante que, aunque sea pequeña, producirá un calentamiento que conforme pase el tiempo causará daños al material. Para evitar estos problemas es necesario que las corrientes mantengan valores mínimos, para ello se introduce una capa de material semiconductor (en lugar del aire) en el interior de la cubierta como se muestra en la Fig. 2.11, haciendo posible que exista contacto permanente con tierra y que el campo magnético se confine al interior de la superficie conductora.

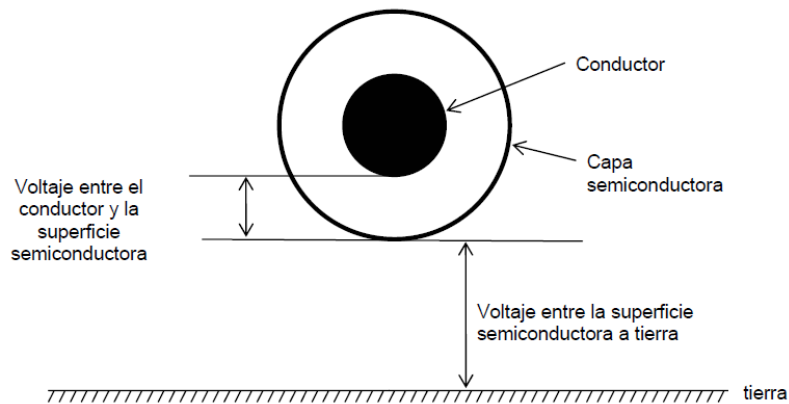


Fig. 2.11 Cable aislado con una capa semiconductor.

Como se aprecia en la Fig. 2.11, esto provoca un voltaje entre el conductor y la superficie semiconductor haciendo que ambos se comporten como si fueran las placas de un

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

capacitor almacenando carga. Esta carga puede ser grande y la corriente de carga asociada debe ser controlada, tal que una trayectoria a tierra, no se establezca a lo largo de la superficie semiconductor, pues podría dañar o destruir la superficie semiconductor. Para evitar estos se necesita tener un contacto continuo entre la superficie semiconductor y tierra, para ello algunos cables usan una pantalla metálica que drena la corriente de carga capacitiva en contacto con la superficie semiconductor [34, 35, 36].

Se sabe que la mayoría de los esfuerzos eléctricos se presentan en el conductor. Por ello una manera de reducir estos esfuerzos es agregando una segunda pantalla o superficie semiconductor alrededor del conductor ya que esto evita que el campo eléctrico pueda concentrarse en un solo punto evitando deformaciones en la superficie del aislamiento, pues con esto se tendrá una superficie cilíndrica equipotencial. La Fig. 2.12 ayuda a ver la función de esta pantalla semiconductor rodeando al conductor [34, 35, 36, 37].

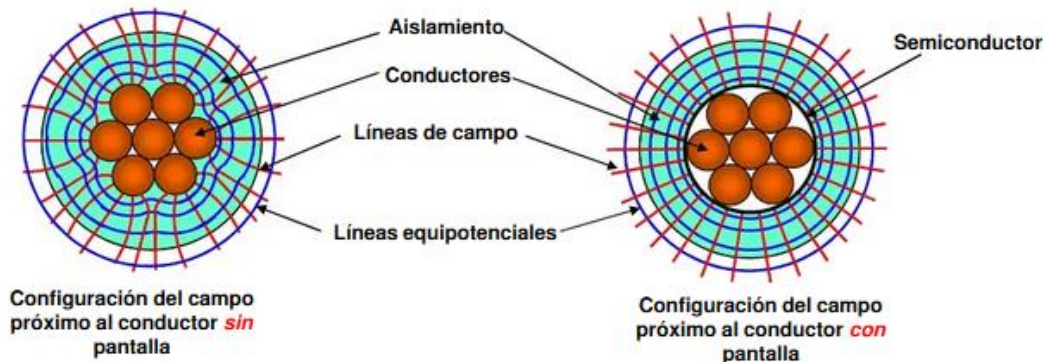
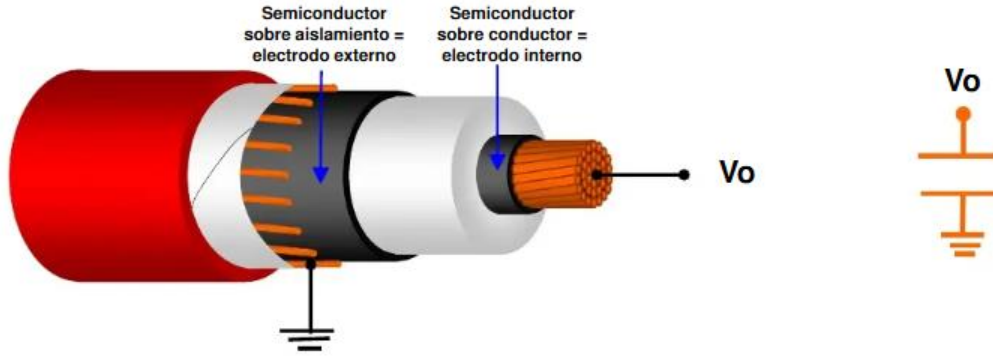


Fig. 2.12 Comparación de un cable sin pantalla y con pantalla semiconductor [37].

Una vez que todos estos elementos han sido agregados, un voltaje se creará entre el conductor y la pantalla metálica como se muestra en la Fig. 2.13. Provocando que ambos se comporten como dos placas de un capacitor y el aislamiento como un dieléctrico.



1

Fig. 2.13 Capacitancia de un cable monopolar con pantalla metálica [37].

La ecuación (2.10) muestra la forma de calcular la capacitancia para este tipo de cables [37].

$$C = \frac{0.0241ER}{\log_{10}\left(\frac{da}{dp}\right)} \times 10^{-6} \text{ F/km} \quad (2.10)$$

Donde,

ER = Constante dieléctrica del aislamiento.

da = Diámetro sobre el aislamiento en milímetros.

dp = Diámetro bajo el aislamiento en milímetros.

Esta ecuación sirve para calcular la capacitancia de un cable monopolar con pantalla metálica como el que se observa en la Fig. 2.13; y se puede apreciar que esta depende del diseño del cable y de sus componentes y no sólo de los factores que se consideran en una línea aérea. Es importante hacer notar que para otro tipo de cables la ecuación podría variar, pero siempre existirá una cierta capacitancia, aún si el cable es el más sencillo como el mostrado en la Fig. 2.13.

2.6 Componentes generales de los cables subterráneos

De forma general, y con todos los elementos antes mencionados se tiene un cable como el que se muestra en la Fig. 2.14. Estos cables también son llamados cables de

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

aislamiento seco ya que además tienen una doble protección contra la infiltración de humedad a ambas pantallas semiconductoras [34, 35, 36].

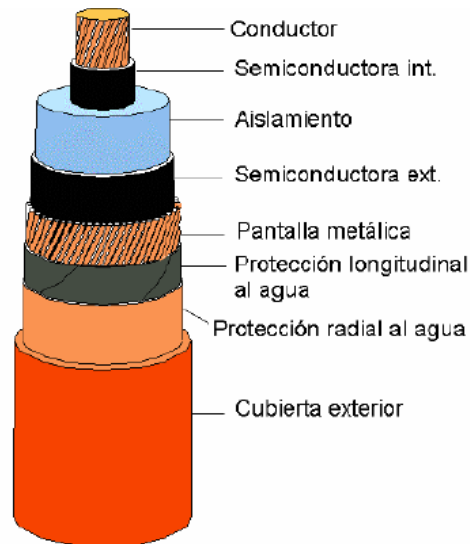


Fig. 2.14 Elementos generales de un cable subterráneo de aislamiento seco.

Sus componentes y principales funciones son:

2.6.1 Conductor

Como su nombre lo dice, su principal función es conducir corriente eléctrica a través de él, sin embargo también debe soportar tensiones mecánicas durante el tendido del cable. La capacidad de conducción depende de la naturaleza del material y de sus características geométricas ya que entre mayor sea el área del conductor, mayor será su capacidad de transmitir corriente, regularmente el material usado es aluminio o cobre, sin embargo el cobre tiene mejor conductividad debido a que tiene menor resistividad que el aluminio [34, 35, 36, 37].

2.6.2 Pantallas semiconductoras interna y externa

Ambas pantallas ya habían sido mencionadas anteriormente, sin embargo de forma general la función de la pantalla semiconductoras interna es distribuir el campo eléctrico para evitar que se concentre en puntos concretos, además asegura un contacto perfecto con el aislamiento evitando la presencia de aire, cuya ionización podría perforar el aislamiento. Además de las diferencias antes mencionadas, la pantalla semiconductoras externa, cumple

Capítulo 2 Transformadores y cables subterráneos

prácticamente con las mismas funciones que la interna. Se incorpora al cable en conjunto con la pantalla semiconductor interior y el aislamiento por medio de un procedimiento llamado extrusión, con ello se evita la presencia de impurezas que pudieran causar problemas con la distribución del campo eléctrico [34, 35, 36, 37].

2.6.3 Pantalla Metálica

De forma más particular, que lo ya mencionado, esta pantalla tiene como funciones principales evitar la presencia del campo eléctrico, reforzar la fortaleza mecánica del cable y conducir las corrientes capacitivas y de fallas desbalanceadas. Regularmente están hechas de cobre, aluminio, bronce, plomo, o mezclas de estos materiales, dependiendo de cada caso concreto, y si se requiere se puede agregar una armadura como refuerzo adicional, dependiendo de las condiciones de trabajo del cable [34, 35, 36, 37].

2.6.4 Cubierta Exterior

La cubierta exterior tiene como función aislar del exterior al cable para evitar fugas a tierra de la pantalla metálica y protegiéndola de agentes mecánicos y químicos. Puede estar hecha de polietileno o termoplástico, y en ocasiones puede llevar una capa semiconductor que sirve para realizar ensayos dieléctricos de la cubierta en usada [34, 35, 36, 37].

2.6.5 Aislamiento

La función principal del aislamiento es la de soportar tensiones nominales de operación, sobretensiones tipo rayo y sobretensiones de maniobra, el espesor del aislamiento también es importante ya que entre más espeso sea mayor tensión soportará. El aislamiento puede ser encintado, como el papel o bien, extruido, como el policloruro de vinilo (PVC), polietileno vulcanizado (XLPE), etileno-propileno (EPR), etc. [34, 35, 36, 37].

Capítulo 3

Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

3.1 Introducción

En este capítulo se tratarán conceptos que ayudarán a comprender y explicar de mejor manera el fenómeno de la ferroresonancia y ver cómo los elementos eléctricos ya mencionados anteriormente, como transformadores y cables, interactúan en los sistemas de distribución subterráneos para que pueda darse una posible perturbación por este tipo de fenómeno.

Al ser la ferroresonancia [38] un tipo de resonancia irregular, a menudo caótica que involucra la característica no lineal de los inductores con núcleo de hierro (como los transformadores), se vuelve importante definir primeramente qué es la resonancia en un SEP, por ello primero se hablará acerca de la resonancia para posteriormente ver en qué consiste el fenómeno de la ferroresonancia de manera más detallada y exacta.

3.2 Resonancia en sistemas eléctricos de potencia

En los sistemas eléctricos de potencia la resonancia es un fenómeno que se presenta en circuitos en los cuales existen elementos reactivos, como inductores y capacitores, ya que estos elementos tienen una o más frecuencias naturales en las cuales si alguna de ellas se llega a alinear con una frecuencia existente en el sistema eléctrico, puede dar lugar a este fenómeno provocando que en esa frecuencia se produzca una sobrecorriente o un sobrevoltaje debido a que las reactancias capacitivas e inductivas se igualan provocando que la impedancia se haga máxima o mínima según sea el tipo de circuito que se presenta

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

(serie o paralelo). Por lo tanto las condiciones resonantes pueden representar un peligro para los diferentes elementos que compongan al sistema eléctrico, como el aislamiento de los cables, los transformadores, bancos de capacitores, etc. Además este fenómeno también puede presentarse en sistemas en los cuales se tengan fuentes externas que produzcan una alineación en las frecuencias de resonancia (rectificadores, convertidores, compensadores, variadores de frecuencia, etc.). [1, 38, 39].

Al tener las reactancias capacitivas e inductivas igualadas se puede obtener la expresión (3.1) que muestra el comportamiento de la frecuencia en condición de resonancia:

$$X_{L_r} = 2\pi f_r L = X_{C_r} = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (3.1)$$

Donde;

X_{L_r} = Reactancia inductiva en el circuito resonante.

f_r = Frecuencia de resonancia.

L = Inductancia del circuito resonante.

X_{C_r} = Reactancia capacitiva en el circuito resonante.

C = Capacitancia del circuito resonante.

Al despejar la frecuencia de resonancia obtenemos la expresión (3.2).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Es importante mencionar que f_r es independiente de la resistencia del circuito.

En este trabajo es de principal interés mencionar cómo se comporta la resonancia serie, ya que eso dará fundamentos para entender de mejor manera el fenómeno de la ferroresonancia en los sistemas de distribución subterráneos.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

3.2.1 Resonancia en circuito serie

Los sistemas eléctricos pueden ser representados por elementos capacitivos inductivos y resistivos, un ejemplo de la interacción de estos elementos se muestra en el circuito de la Fig. 3.1.

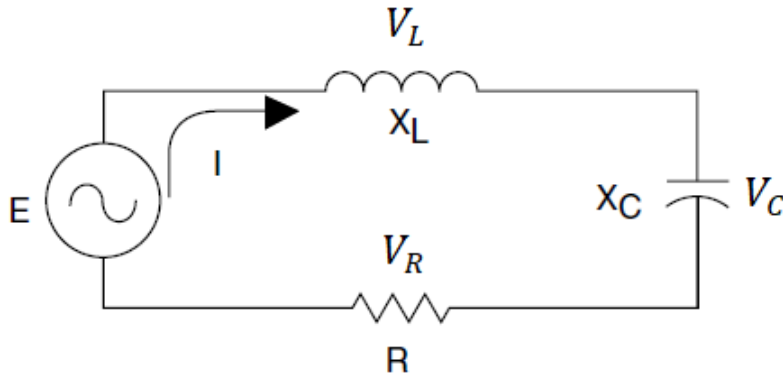


Fig. 3.1 Circuito con elementos resonantes en serie [38].

Para ver el comportamiento de dicho circuito en circunstancias de resonancia, es recomendable hacer un análisis a partir de su impedancia.

La impedancia de dicho circuito se presenta en la ecuación (3.3).

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (3.3)$$

Donde $\omega = 2\pi f$ y R es la resistencia del circuito.

Como se mencionó antes, cuando ocurre resonancia, las reactancias capacitivas e inductivas se igualan por lo cual estas se anularán y eso dará como resultado que la impedancia del circuito resonante dependa directamente de la resistencia lo cual constituye una impedancia pequeña es decir se presentaría un mínimo.

Si eso se ve eso desde el punto de vista de la ley de Ohm, al tener una impedancia pequeña y si se considera una resistencia pequeña, se tendría una gran corriente aún si el voltaje de excitación fuera pequeño.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

Otra forma de darle solución al circuito de la Fig. 3.1 (despreciando R) es gráficamente. Para ello se obtienen las ecuaciones (3.4) y (3.5) que representan el voltaje que pasa a través del inductor.

$$V_L = jX_L I \quad (3.4)$$

$$V_L = E + jX_C I \quad (3.5)$$

Posteriormente se grafican ambas ecuaciones como se muestra en la Fig. 3.2.

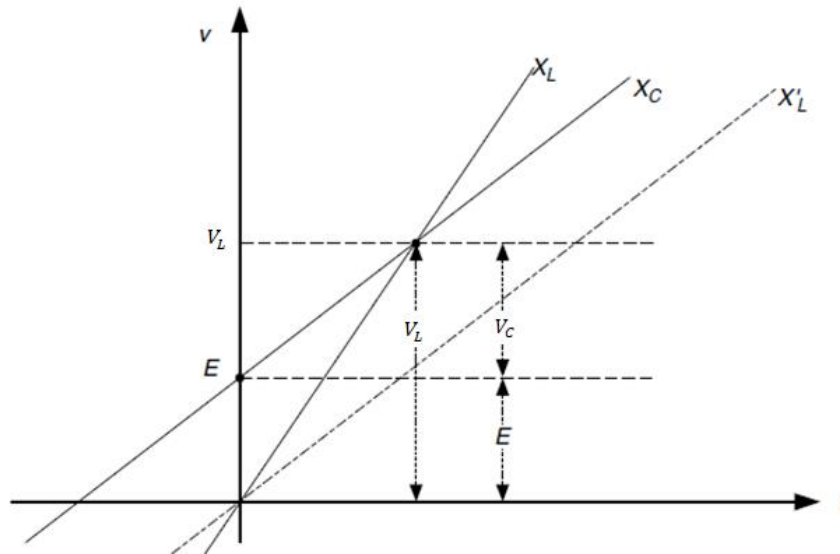


Fig. 3.2 Solución gráfica al circuito RLC resonante [38].

Se toma como solución al circuito a la intersección de las dos rectas que representan a las ecuaciones (3.4) y (3.5) ya que en dicha intersección se observa el voltaje que pasa por el inductor (V_L) y también se aprecia el voltaje en el capacitor (V_C), al punto donde se intersectan dichas rectas se le llama punto de operación.

La recta punteada (X'_L) representa la condición de resonancia ya que en dicha condición las reactancias capacitivas e inductivas se igualan haciendo que ambas líneas tengan la misma pendiente y por lo tanto sean paralelas, este es el peor de los casos puesto que las líneas no se cortan y entonces se dice que en resonancia las líneas se intersectan en corrientes y voltajes infinitamente grandes [38].

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

3.3 Ferroresonancia

Como ya se mencionó, la ferroresonancia es un tipo especial y particular de resonancia, sin embargo una de las principales diferencias, es que en la ferroresonancia está presente una reactancia inductiva no lineal que depende no solamente de la frecuencia sino de la densidad de flujo magnético en los transformadores con núcleo ferromagnético [40]. Este fenómeno es oscilatorio y causado por la interacción de la característica no lineal del núcleo ferromagnético y un sistema capacitivo, que en el caso de los sistemas de distribución subterráneos son los transformadores y cables, la principal característica de este fenómeno, y que también lo hace diferente a la resonancia, es la presencia de al menos dos puntos de operación en estado estable, uno ferroresonante y otro normal para un rango de ciertos parámetros del circuito en donde la respuesta puede cambiar de un punto normal de operación (onda sinusoidal a la misma frecuencia de la fuente) a uno ferroresonante (donde existe variación de la frecuencia) [41, 42].

Para poder definir los puntos de operación, se sigue un procedimiento gráfico parecido al visto en resonancia serie, sin embargo hay que recordar que en este caso se tiene un inductor no lineal, por eso la Fig. 3.3 muestra un circuito con posibilidades de ferroresonancia en el cual se tiene una cierta capacitancia debida a los cables cuales están en serie con un inductor no lineal (transformador).

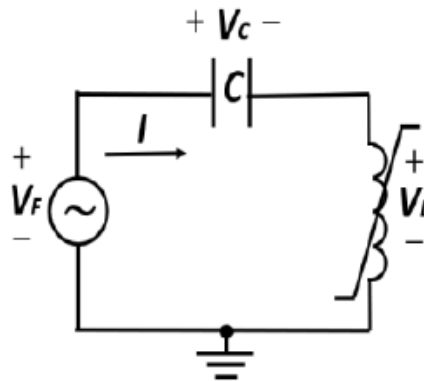


Fig. 3.3 Circuito con condiciones necesarias para ferroresonancia [42].

De este circuito se pueden deducir las ecuaciones (3.6) y (3.7) de voltaje.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

$$V_L = V_F - V_C \quad (3.6)$$

$$V_L = V_F + j \frac{1}{\omega C} I \quad (3.7)$$

Donde V_F es el voltaje de la fuente, ω es la frecuencia angular y C es la capacitancia de los cables en el circuito ferroresonante. Como se vio en el capítulo 2, el voltaje en la inductancia no lineal (transformador) depende de la corriente y la frecuencia, por lo cual también es posible expresar a dicho voltaje como se muestra en la ecuación (3.8).

$$V_L = j\omega L(I) \quad (3.8)$$

Donde $L(I)$ es la característica no lineal y es función dependiente de la corriente I . La Fig. 3.4 muestra la representación gráfica de las ecuaciones (3.7) y (3.8).

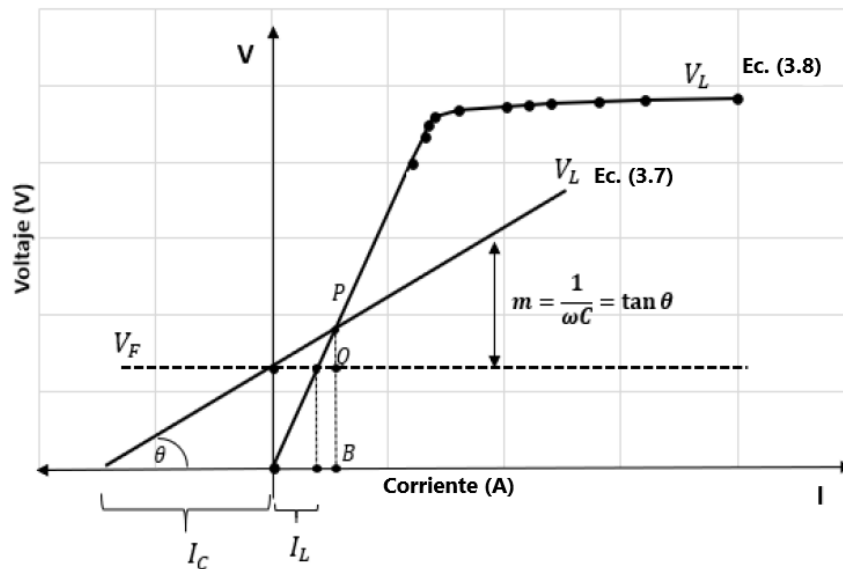


Fig. 3.4 Gráficas de voltajes en el inductor no lineal [42].

Con ayuda de la Fig.3.4 se define un punto de operación (P) como la intersección de las gráficas formadas por la curva del inductor no lineal (transformador) y la suma de los voltajes de la fuente y la capacitancia de los cables, es decir la intersección de las curvas formadas por las ecuaciones (3.7) y (3.8). El segmento PQ corresponde al voltaje del

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

capacitor (cables) y el segmento PB al de la inductancia no lineal (transformador). Se observa que, si solo se aplicara el voltaje de la fuente al capacitor se tendría una corriente muy grande I_C , y si solo se aplicara el voltaje de la fuente al inductor, entonces se tendría una corriente pequeña I_L . También se observa que la pendiente de la recta depende de la capacitancia y de ω , por lo que si se consideran los demás parámetros fijos y sólo se varía alguno de estos, se observará que la pendiente se moverá provocando que puedan existir más puntos de operación.

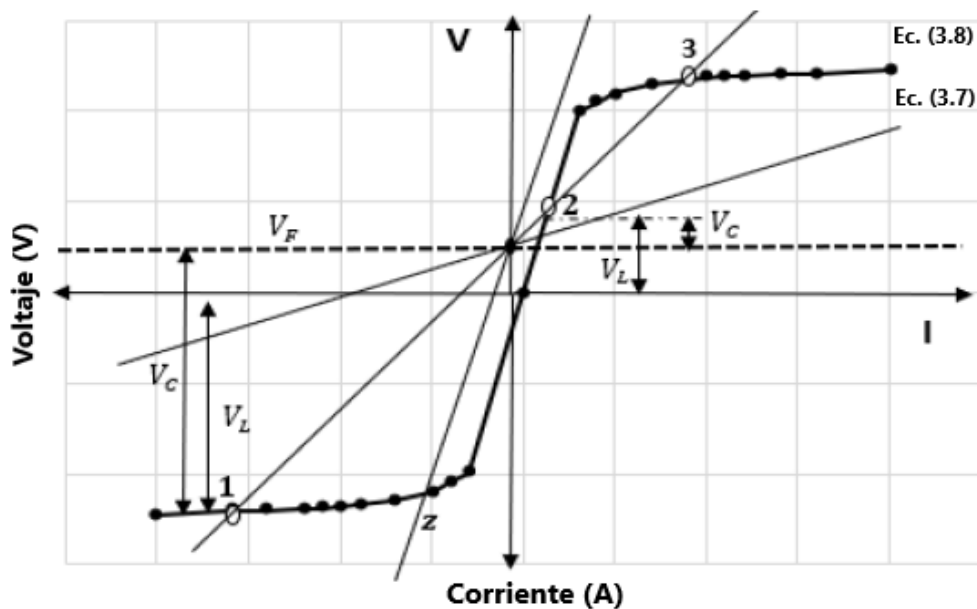


Fig. 3.5 Comportamiento gráfico variando la capacitancia [42].

En la Fig. 3.5 se muestran los efectos de variar la capacitancia en el sistema apareciendo los puntos operación 1,2 y 3.

En el punto 1 la corriente está invertida y como consecuencia los voltajes también, en términos fasoriales se puede decir que está invertida 180° . Si en este punto existiera un incremento de corriente el voltaje representado por la ecuación (3.7) será menor que el representado por la ecuación (3.8), este exceso de voltaje no puede ser solventado por la fuente y entonces la corriente regresará al punto original. Si la corriente disminuyera, el voltaje de la ecuación (3.7) será mayor que el de la (3.8) y este exceso de voltaje hará que la corriente aumente para que regrese de nuevo a su punto original y entonces se dice que

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferresonancia

es un punto de operación estable. Además en el punto 1 V_L y V_C son negativos y mayores con respecto al punto 2, es decir, en el punto 1, V_C es mayor que V_L , y en el punto 2, V_L es mayor que V_C y ambos son positivos lo que demuestra que la corriente se adelanta con respecto al voltaje para el punto 1 pero se atrasa para el punto 2. Estos cambios de dirección de voltajes entre los puntos 1 y 2 en estado estable debido a los cambios en el valor de la capacitancia, provocan excesos de voltajes en el circuito y por eso el punto 1 se dice que es un punto de operación estable ferresonante.

Se dice que el punto 2 es estable porque si se produce un incremento de corriente, entonces el voltaje representado por la ecuación (3.8) será mayor que el voltaje que representará la ecuación (3.7), pero este incremento de voltaje no puede ser proporcionado por la fuente, por lo que la corriente tiene que disminuir regresando al punto 2. Mientras que al disminuir la corriente el voltaje de la ecuación (3.7) será mayor que el de la ecuación (3.8) lo que obliga a la corriente a aumentar y regresar al valor original, además el punto no se encuentra en la zona de saturación por lo que este punto será estable no ferresonante.

El punto 3 es considerado inestable ya que si en este punto la corriente se incrementa, provocará que el voltaje de la ecuación (3.7) sea mayor que el voltaje de la ecuación (3.8) y este exceso de voltaje obligará a la corriente a aumentar, pero al estar en la zona de saturación no podrá regresar al punto de operación original. Sin embargo si la corriente disminuye el voltaje de la ecuación (3.8) será mayor que el voltaje de la ecuación (3.7) y la fuente no podrá entregar la corriente demandada haciendo que este punto sea inestable ferresonante.

Otro efecto a considerar, en la Fig. 3.5, es que si se reduce la capacitancia lo suficiente para llegar al punto “z” se presentarán sobretensiones de ferresonancia sostenida ya que no tiene otro punto al cual poder llegar.

La Fig. 3.6 y la Fig. 3.7 muestran un ejemplo del comportamiento del voltaje en el punto de operación 3, inestable ferresonante, y en el punto de operación 1, estable ferresonante, respectivamente para un circuito como el mostrado en la Fig. 3.3. Se asumió la misma característica inductiva para cada caso. La capacitancia se varió para

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

lograr un punto de operación diferente después de un transitorio inicial que lleva al sistema a la resonancia [38].

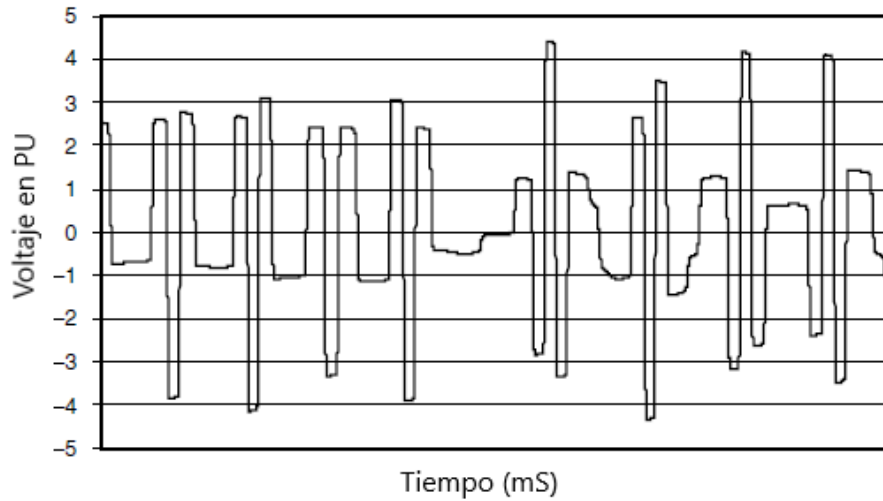


Fig. 3.6 Ejemplo del voltaje en el punto inestable ferroresonante [38].

En este caso de inestabilidad ferroresonante, se observa que se producen superiores a 4.0 pu.

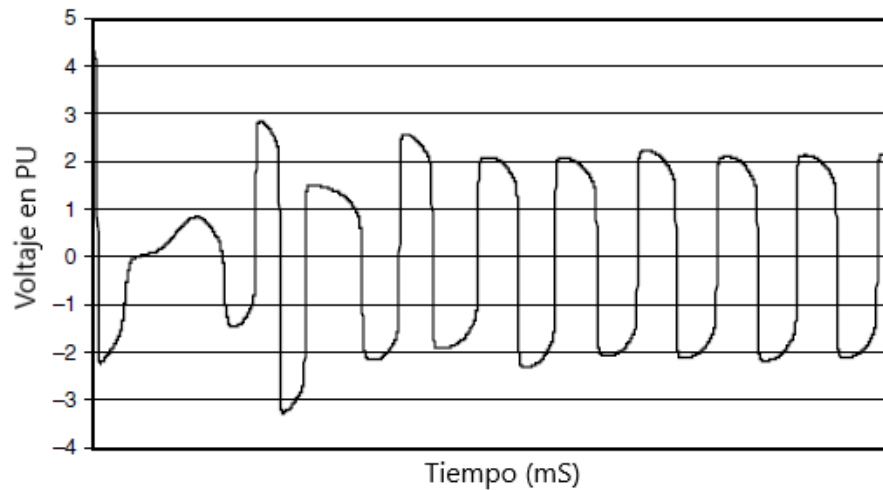


Fig. 3.7 Ejemplo del voltaje en el punto estable ferroresonante después del transitorio inicial [38].

Mientras que en este caso de estabilidad ferroresonante se observa que se producen voltajes ligeramente superiores a 2 pu.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

Para cualquiera de las 2 condiciones, estable o inestable ferroresonantes, puede imponer un trabajo excesivo a los elementos del sistema de distribución y cargas al equipo.

La ferroresonancia también puede ocurrir mediante variaciones en el voltaje de alimentación tal y como se muestra en la Fig. 3.8.

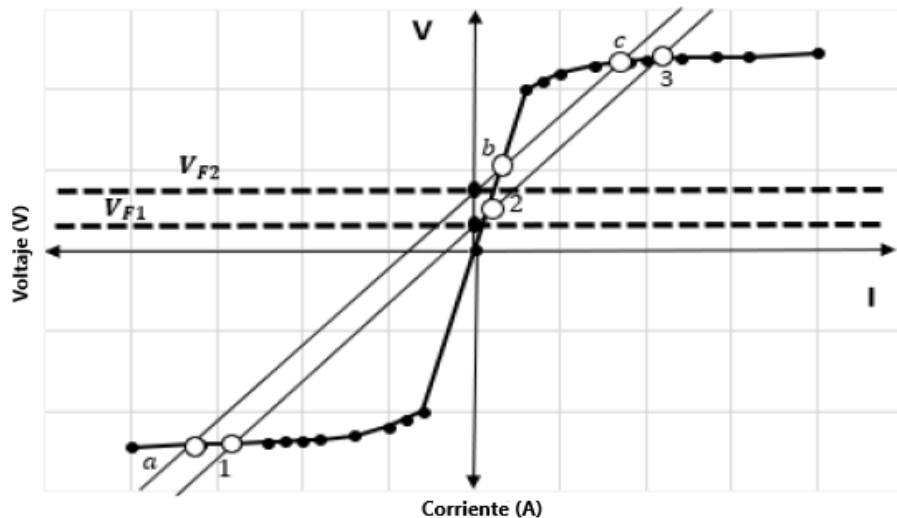


Fig. 3.8 Comportamiento al variar el voltaje de alimentación al existir ferroresonancia [42].

Se observa que a un pequeño aumento del voltaje de V_{F1} a V_{F2} la corriente aumenta en los puntos de operación estable 1 y 2, pero para el punto 3 disminuye debido a que es un punto inestable y entonces puede ocasionar inestabilidad en el sistema [38, 42, 43, 44].

3.3.1 Causas y configuraciones propensas a ferroresonancia

Existen diversas configuraciones y circunstancias que hacen que se presente el fenómeno de la ferroresonancia en un SEP, algunos sistemas propensos al fenómeno son:

- Transformador alimentado accidentalmente en una o dos fases.
- Transformador energizado a través de un gradiente capacitivo mediante la apertura de uno o más interruptores.
- Transformador conectado a una línea de transmisión compensada en serie.
- Transformador de potencial conectado a un sistema de neutro aislado
- Transformador de voltaje capacitivo.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

- Transformador conectado a líneas no energizadas en paralelo con una o más líneas energizadas y transformador alimentado a través de una línea larga de transmisión o cable con pequeña potencia de cortocircuito [26, 45].

Estas son algunas causas generales. Sin embargo en la práctica de los sistemas de distribución, sobre todo de los subterráneos, la ferroresonancia suele ocurrir, de forma más común cuando se tienen transformadores descargados conectados a los cables subterráneos con un cierto rango de longitud.

La longitud mínima que un cable requiere para causar ferroresonancia varía con el nivel de voltaje del sistema. La capacitancia de los cables es casi la misma para todos los niveles de voltaje del sistema de distribución, estos varían desde 40 a 100 nF por 1000 ft, dependiendo del tamaño del conductor. Sin embargo la reactancia magnetizante de un transformador de distribución de clase de 35 kV es mayor, y por lo tanto la curva de magnetización más pronunciada que en un transformador de clase de 15 kV. Por lo que la ferroresonancia dañina suele ser más común en voltajes más altos.

Los eventos más comunes que causan ferroresonancia son:

- Switcheo manual de un transformador trifásico, en estrella, sin carga y alimentado por cables donde sólo una de las fases está cerrada, tal y como se muestra en la Fig. 3.9. La ferroresonancia se puede presentar cuando la primera fase se cierra con energización o antes de que se abra la última fase desenergizada.

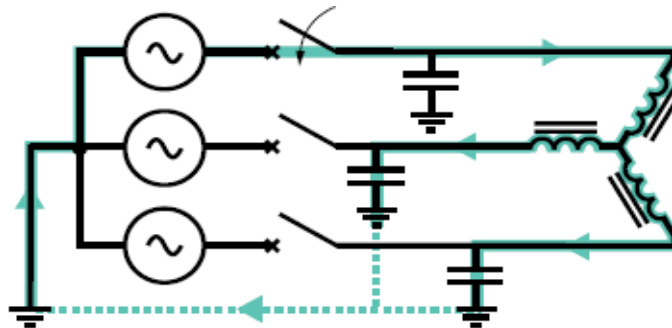


Fig. 3.9 Configuración estrella donde puede ocurrir ferroresonancia con una fase cerrada [41].

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

- El switcheo manual de un transformador trifásico, en estrella, descargado y alimentado por cables donde una de las fases está abierta, tal y como se muestra en la Fig. 3.10. De nuevo puede existir ferroresonancia durante la energización o desenergización.

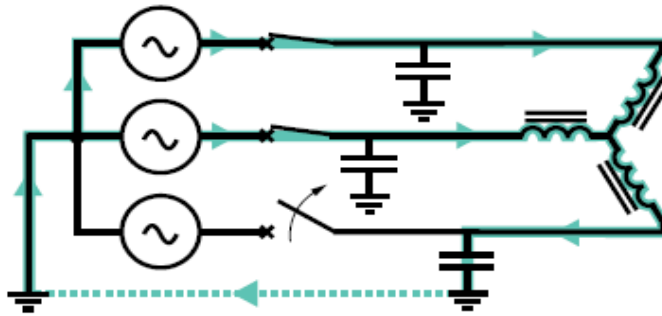


Fig. 3.10 Configuración estrella donde puede ocurrir ferroresonancia con una fase abierta [41].

- Si uno o dos fusibles se funden, pueden dejar al transformador con una o dos fases abiertas. Los recierres monofásicos también puede causar ferroresonancia. Y aunque ya se cuenta con cargas comerciales modernas las cuales tienen controles que transfieren la carga a los sistemas de respaldo cuando detectan esta condición, desafortunadamente, esto deja al transformador sin nada carga para poder amortiguar la resonancia [38].

Existen otras configuraciones, en sistemas trifásicos, en las cuales se puede tener un circuito LC serie con la característica no lineal del transformador, el efecto capacitivo de los cables y la energización del sistema pueden dar elementos suficientes para que exista ferroresonancia como la conexión en delta en la cual se tiene una fase abierta mostrada en la Fig. 3.11.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

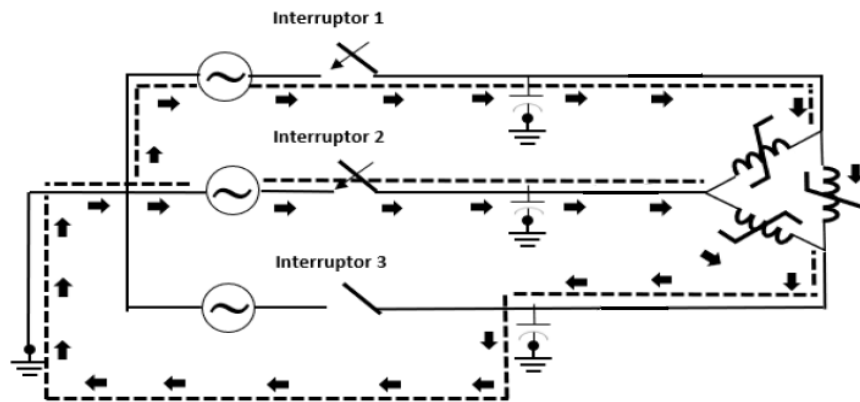


Fig. 3.11 Configuración delta con una fase abierta [42].

Se puede apreciar que se induce un voltaje en la fase abierta, por lo que los elementos que no están conectados al nodo de la fase abierta (fase 3) no influyen en la trayectoria de la corriente (por lo que no se consideran) la cual forma un circuito en serie con la característica no lineal del transformador y el efecto capacitivo del cable de alimentación.

En este tipo de configuración también se puede presentar cuando se tienen dos fases abiertas tal y como se muestra en la Fig. 3.12.

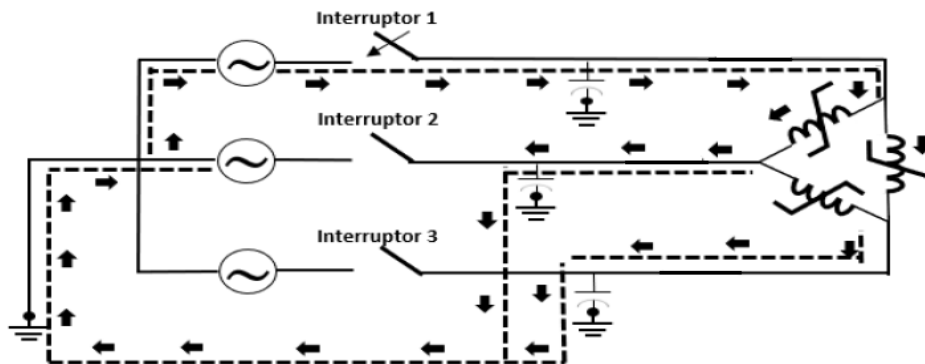


Fig. 3.12 Configuración en delta con dos fases abiertas [42].

Se observa que al tener dos fases abiertas se induce el voltaje en ellas y entonces existen dos trayectorias que sigue la corriente, sin embargo considerando que los efectos capacitivos a tierra son iguales, y el transformador o banco de transformadores con la misma inductancia en las fases, entonces las corrientes que siguen dos 2 trayectorias en las

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

fases donde se tienen los interruptores abiertos serán exactamente las mismas provocando que el potencial en las fases abiertas sea el mismo. Esto tiene como consecuencia que no circule corriente por el transformador o devanado que se encuentra entre las fases abiertas y de esa manera se pueda obtener un circuito equivalente en serie con la característica no lineal y el efecto capacitivo en serie.

Un caso especial es el transformador en conexión estrella aterrizada mostrado en la Fig. 3.13.

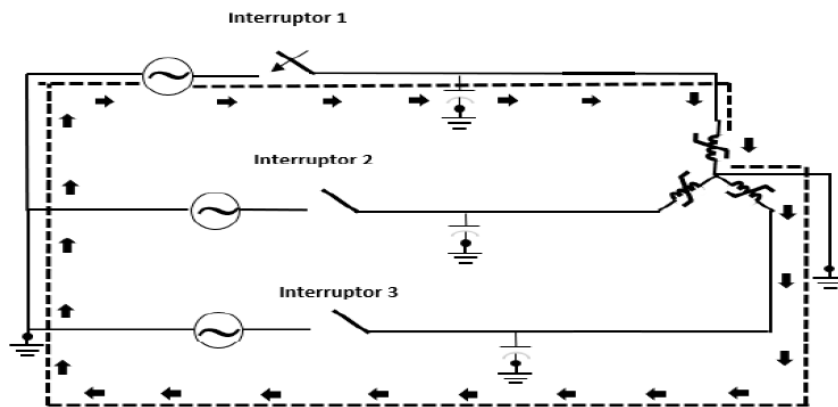


Fig. 3.13 Configuración estrella aterrizada con dos fases abiertas [42].

Este tipo de configuración es menos propensa a presentar ferroresonancia porque al estar aterrizada la trayectoria de la corriente no logrará a formar un circuito LC en serie. Debido a esto el transformador con conexión estrella – estrella conectado a tierra se ha convertido en el más utilizado en sistemas subterráneos en América del Norte. Sin embargo este tipo de conexión no es inmune a la ferroresonancia ya que la mayoría de las unidades utilizan un diseño de núcleo de tres o cinco piernas que acopla las fases magnéticamente. Aunque puede requerir un mínimo de varios cientos de pies de cable que proporcionen la capacitancia necesaria para crear una condición ferroresonante [38, 42, 44].

Vale la pena mencionar que en estos eventos no siempre se nota la ferroresonancia. Algunos trabajadores de la industria eléctrica afirman haber trabajado con sistemas de cables subterráneos durante décadas sin presenciar ferroresonancia lo que hace que el

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

fenómeno sea más difícil de estudiar y detectar. Algunas condiciones en el sistema de distribución que aumentan la probabilidad de ferroresonancia son:

- Niveles altos de voltaje en sistemas de distribución, sobre todo en niveles de clase 25 kV y 35 kV.
- Switcheo de transformadores ligeramente cargados y sin carga.
- Conexiones del lado primario del transformador sin tierra.
- Circuitos con longitudes muy largas de cables subterráneos.
- Daño en el cable y switcheo manual durante la construcción del sistema de cables subterráneos.
- Sistemas débiles, como por ejemplo, los sistemas con corriente de corto circuito bajas.
- Pérdidas bajas en los transformadores.
- Sistemas trifásicos con dispositivos de conmutación monofásicos.

Si bien es cierto que la ferroresonancia es más propensa en los niveles de voltaje más alto, su aparición es posible para todos los niveles de voltaje en los sistemas de distribución. La proporción de las pérdidas, la reactancia magnetizante y la capacitancia a niveles más bajos de voltaje puede limitar los efectos negativos de la ferroresonancia, pero aun así puede ocurrir.

Existen diversos modos o tipos de ferroresonancias con diversas manifestaciones físicas y eléctricas las cuales dependiendo del tipo se pueden manifestar con voltajes y corrientes muy altas, mientras que otros tienen voltajes cercanos a lo normal [38].

3.3.2 Clasificación de la ferroresonancia

Cuando se presenta la ferroresonancia en algún SEP, el voltaje medido en el inductor no lineal (transformador) adquiere un comportamiento aleatorio, debido a ello se buscaron maneras de poder clasificar ese comportamiento aleatorio. La experiencia en las formas de onda que se presentan en los SEP, los experimentos realizados en sistemas reducidos, así como las simulaciones numéricas han permitido que se clasifique la ferroresonancia en cuatro tipos diferentes.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

Dicha clasificación corresponde al estado estacionario, es decir, al finalizar el estado transitorio, debido a que es difícil para un circuito ferroresonante distinguir el estado transitorio normal de los estados transitorios ferroresonantes. Sin embargo esto no significa que los fenómenos de ferroresonancia transitorio no presenten un riesgo para el equipo eléctrico que se tenga. Los sobrevoltajes transitorios peligrosos pueden ocurrir varios períodos, del sistema, después de un evento que cause ferroresonancia, como los antes mencionados [41].

Los modos de la clasificación son los siguientes:

- Fundamental: Los voltajes y corrientes son periódicos con un periodo T igual al período. La onda de voltaje se muestra en la Fig. 3.14.

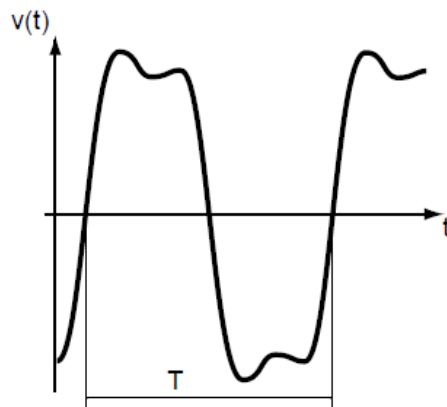


Fig. 3.14 Onda de voltaje en la ferroresonancia de modo fundamental [41].

- Sub-armónico: Las señales de voltaje y corriente son periódicas con un periodo nT que es un múltiplo del periodo de la fuente. La onda de voltaje se muestra en la Fig. 3.15.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

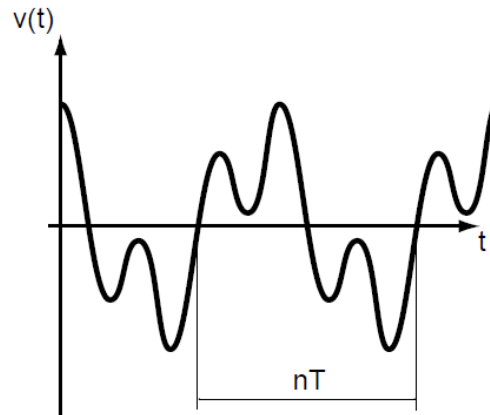


Fig. 3.15 Onda de voltaje en la ferroresonancia con modo sub-harmónica [41].

- Cuasi-periódico: También llamado pseudo-periódico, se caracteriza porque su forma de onda no es periódica. La onda de voltaje se muestra en la Fig. 3.16.

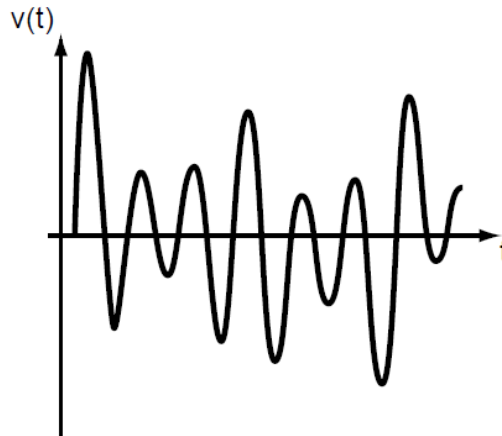


Fig. 3.16 Onda de voltaje en la ferroresonancia con modo cuasi-periódico [41].

- Caótico: Es el peor de los casos porque en este modo la forma de onda, además de no ser periódica, se comporta de manera más aleatoria tal y como se muestra en la Fig. 3.17.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

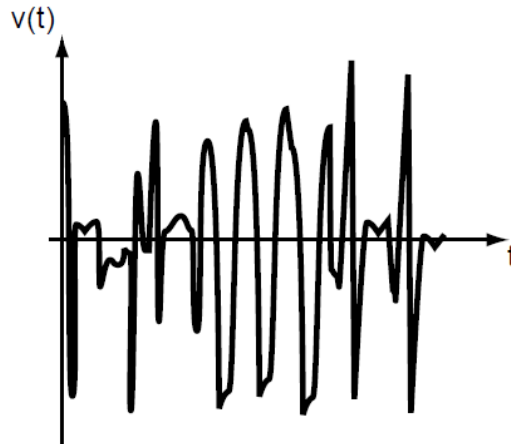


Fig. 3.17 Onda de voltaje en la ferroresonancia con modo caótico [41].

Pequeñas variaciones en el valor de un parámetro del sistema o bien un transitorio pueden causar un salto repentino entre dos estados estables muy diferentes e iniciar uno de los cuatro modos de ferroresonancia. El modo caótico exhibe una sensibilidad extrema a las condiciones iniciales y es el que tiene un comportamiento más aleatorio, porque lo que aunque sus soluciones evolucionan de manera determinista, las mediciones realizadas en el sistema no permiten la predicción del estado del sistema. Sin embargo los modos comúnmente encontrados son los fundamentales y sub-armónicos [41, 46, 47].

3.3.3 Daños y síntomas de la ferroresonancia

Es claro que la ferroresonancia puede provocar alguna falla en el sistema que podría traducirse en algún daño al equipo. Este daño puede depender del modo de ferroresonancia que aparezca ya que podría presentarse un sobrevoltaje severo o bien no tan severo con una forma de onda diferente. También puede ser que la respuesta esté variando entre condiciones de sobrevoltajes más o menos severos, ya sea espontáneamente o debido a transitorios. La operación de sobrevoltajes severos durante periodos prolongados aumenta la probabilidad de falla o daño en el transformador [48, 49].

Sin embargo no siempre habrá o se notará la ferroresonancia en los equipos eléctricos. Por lo tanto, puede ser difícil saber si la ferroresonancia ha ocurrido en muchos casos, a menos de que existan testigos o instrumentos de medición de calidad de energía.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

Algunos indicadores comunes y problemas causados por la ferroresonancia son los siguientes:

- **Ruido audible:** Durante la ferroresonancia, puede haber ruido audible que es causado por la magnetostricción del núcleo de acero que se conduce a la saturación. Aunque el ruido es difícil de describir, este ruido es claramente diferente y más fuerte que el zumbido normal de un transformador. La mayoría del personal encargado de operar el sistema eléctrico puede reconocerlo inmediatamente después de escucharlo por primera vez.
- **Sobrecalentamiento:** El sobrecalentamiento del transformador suele presentarse a menudo cuando se da ferroresonancia. Esto sucede cuando el transformador entra en zona de saturación. Debido a que el núcleo está saturado repetidamente, el flujo magnético encontrará su camino hacia partes del transformador donde no se espera flujo, como la pared del tanque y otras partes metálicas. El calentamiento depende del movimiento del flujo suele evidenciarse por la carbonización o la pintura burbujeante encima del tanque. Aunque esto no es necesariamente un indicador de que la unidad está dañada, sí puede producirse daño en este tipo de situaciones si es que la ferroresonancia persiste lo suficiente como para causar el sobrecalentamiento de algunas conexiones internas más grandes. Esto puede dañar las estructuras de aislamiento sólido sin que puedan repararse. Es importante mencionar que algunos transformadores que exhiben signos de ferroresonancia como ruidos fuertes no muestran signos de calentamiento apreciable. El diseño del transformador y el modo de ferroresonancia que se presente determina cómo responderá el transformador.
- **Sobretensiones y fallas en los apartarrayos:** Cuando se presentan sobretensiones con la ferroresonancia, los daños podrían reflejarse tanto en el primario como en el secundario. Los apartarrayos suelen salir afectados de dicho evento. Estos están diseñados para interceptar sobrevoltajes breves y mantenerlas en un nivel aceptable. Si bien pueden resistir algunos eventos que impliquen sobrevoltajes, existe un límite definido para sus capacidades de diseño. Los apartarrayos de bajo voltaje en las instalaciones para usuarios finales son más susceptibles que los que se usan en alta

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

tensión o el suministro de energía, y su falla es en ocasiones la única indicación de que ha ocurrido ferroresonancia.

- Flicker o parpadeos: Durante la ferroresonancia la magnitud del voltaje puede estar fluctuando, dependiendo del modo que se presente puede fluctuar más o menos. Los usuarios finales en el circuito secundario podrían percatarse de dicha fluctuaciones si sus aparatos electrónicos son muy susceptibles a tales variaciones o bien al ver las luces parpadear, la exposición prolongada puede acortar la vida útil de dichos aparatos o bien en el peor de los casos causar alguna falla inmediata. En instalaciones que cuentan con compensadores UPS para mitigar perturbaciones, si se llegara a presentar una perturbación del lado del suministrador de energía, puede producirse un sonido repetido y persistente de alarmas en el UPS conforme fluctúa el voltaje [38].
- Daños en el equipo eléctrico (bancos de capacitores, TP y TC) debido a efectos térmicos o ruptura de aislamiento. Un síntoma característico de la destrucción de TP por ferroresonancia es que el devanado primario se destruya pero el secundario quede intacto.

Ante la dificultad del diagnóstico, por no tener registros y depender de las interpretaciones por los posibles síntomas, lo primero a analizar es la configuración del sistema mientras los síntomas estén presentes, junto con los eventos que los preceden y que podrían iniciar el fenómeno [41].

3.3.4 Algunas normas de apoyo

Se sabe que en el ámbito de la ingeniería eléctrica las normas son de suma importancia, debido a ello es importante hacer mención a algunas de ellas que, aunque no son específicas para la ferroresonancia, sí ayudan a entender un poco más el fenómeno e incluso sirven de ayuda cuando el fenómeno se presenta.

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferroresonancia

- **IEEE Std C57.142-2010 :**

Esta norma sirve como una guía para describir y mitigar sobrevoltajes transitorios que se generan al hacer switcheos en el sistema eléctrico y en los transformadores, así mismo proponen un par de métodos que podrían ser de utilidad para mitigar los efectos de la ferroresonancia.

Uno de los métodos de mitigación que se menciona es el resistor - capacitor snubber; este método suele usarse para redes de media tensión y consiste en usar un capacitor de sobrevoltajes en serie con una resistencia para reducir la frecuencia aplicada en las terminales del transformador, entonces si la frecuencia que se modifica es más baja que las frecuencias resonantes del transformador eliminará los voltajes altos. En la norma se menciona que los valores de las capacitancias que se deben usar están entre $0.10 \mu\text{F}$ y $0.50 \mu\text{F}$ pero que estas deben calcularse en base a las frecuencias de resonancias internas del transformador. Aunque el método está pensando de forma más directa para la resonancia, ya se mencionó que la ferroresonancia es un tipo particular de resonancia, por lo cual la configuración resistor – capacitor snubber también podría ayudar a amortiguar los sobrevoltajes ferroresonantes.

Algunas otras recomendaciones que hace la norma son el uso de dispositivos de conmutación equipados con resistencias de preinserción ya que ayudan a reducir las magnitudes de los transitorios, sin embargo estos dispositivos son más eficaces y usados en alto voltaje debido a que en voltajes menores su costo se eleva mucho. También se menciona que el uso o presencia de cargas resistivas puede amortiguar los sobrevoltajes que se puedan presentar en los transitorios y que el uso del switcheo o conmutación controlada también podría ser un método que ayude a los voltajes oscilatorios en los transitorios sobre todo porque es un método de mitigación económico para voltajes medianos y grandes.

Sin embargo es importante mencionar que aún con estos métodos, la norma recomienda el uso de apartarrayos específicos que protejan al transformador de los posibles sobrevoltajes [50].

Capítulo 3 Conceptos básicos sobre resonancia y ferresonancia

- **ANSI/IEEE Std C62.2-1987:**

Esta norma es prácticamente una guía para seleccionar apartarrayos que protejan al equipo de sobretensiones y para proteger al sistema eléctrico. Esta norma es importante porque menciona directamente a la ferresonancia como el fenómeno responsable de provocar sobrevoltajes que incluso pueden dañar o destruir apartarrayos, así como el hecho de que este fenómeno se pueda presentar incluso con longitudes de cable más cortas si se tiene un aumento en el voltaje del sistema. Además menciona algunas maneras para proteger, por medio de apartarrayos, a los sistemas de distribución subterráneos y la forma correcta de usarlos [51].

- **IEC 60044-5:2004:**

Esta es una parte de la norma IEC 60044 que está dirigida a los transformadores de potencial capacitivos monofásicos conectados entre línea y tierra para sistemas con niveles de voltaje máximo de fase a tierra (U_m) menores o iguales a 72.5 kV y frecuencias de 15 a 100 Hz. La norma habla de la presencia y el manejo de la ferresonancia en dichos transformadores por lo cual si en algún momento se requiere investigar a fondo cómo poder proteger o ayudar a los transformadores de potencial capacitivos contra fenómenos ferresonantes se recomienda el uso de ella [52].

Capítulo 4

Uso de elementos eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw

4.1 Introducción

Hasta ahora se han visto los elementos eléctricos que componen un circuito con posibles fallas por ferroresonancia, así como el fenómeno en sí, de forma teórica, sin embargo para apreciar de mejor manera el efecto de una posible falla por ferroresonancia es importante realizar simulaciones de casos reales o circuitos cercanos a la realidad y así ver cómo se comporta el fenómeno con elementos que existen en la industria eléctrica. Para poder realizar estas simulaciones se usará una herramienta de software llamada ATPDraw.

Se decidió usar ATPDraw ya que es el software que se adecua más a las necesidades para el estudio de transitorios electromagnéticos y el más conocido a nivel mundial, además de que permite tener un acercamiento de manera más exacta a los modelos ya conocidos de los diferentes elementos eléctricos. Por ejemplo, el programa ATPDraw, para su simulación en estado estable o transitorio, permite modelar los alimentadores subterráneos compuestos por conjuntos de cables de potencia con la misma variedad de modelos electromagnéticos que se tienen para las líneas aéreas de transmisión como son:

- Componentes con parámetros RL acoplados, en representación matricial no simétrica y de componentes simétricas.
- Circuitos PI de parámetros RLC concentrados, en representación matricial no simétrica y de componentes simétricas.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

- Componentes de parámetros distribuidos a frecuencia constante, en representación modal.
- Componentes de parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia.

Además debido a que el usuario, normalmente, no dispone de los valores numéricos del alimentador subterráneo de interés y ya que estos valores son necesarios para poder los modelos mencionados, el programa ATPDraw ofrece el cálculo de esos valores, a partir de las características físicas de los cables de potencia, con dos rutinas de pre-procesos llamadas *cable constants* y *cable parameters* [53].

En el caso del transformador ATPDraw ayuda a estudiar con más detalle los fenómenos que ocurren en los devanados de los transformadores y esto es de vital importancia pues para ver de manera más exacta el comportamiento de la ferroresonancia es necesario tener un modelado a detalle del transformador.

Dicho esto, es claro que este capítulo es de vital importancia ya que aquí se verán cómo se modelan los elementos eléctricos que componen un circuito ferroresonante (transformador, cables subterráneos, fuente que alimenta el circuito) en el software ATPDraw y de esa manera poder entrar directamente a las simulaciones.

4.2 Transformadores en ATPDraw

En el entorno gráfico que usa ATP, es decir en ATPDraw, existen 2 formas de modelar y simular un transformador. Dependiendo de qué tan cercano a los valores reales se necesite realizar la simulación, se puede decidir qué tipo de modelo usar, en el caso de este trabajo de tesis se harán uso de ambos modelos por lo cual se explicarán ambos.

La primer forma de modelar un elemento con característica no lineal el cual puede representar la curva de saturación de un transformador es con un modelo de inductor no lineal, para ello se selecciona desde el menú de componentes, al objeto *L(i) Type 98*.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Para hacer uso este objeto se da clic derecho sobre cualquier sitio de la ventana de trabajo de ATPDraw y se selecciona $L(i)$ Type 98, dentro del submenú *Branch Nonlinear* como se muestra en la Fig. 4.1.

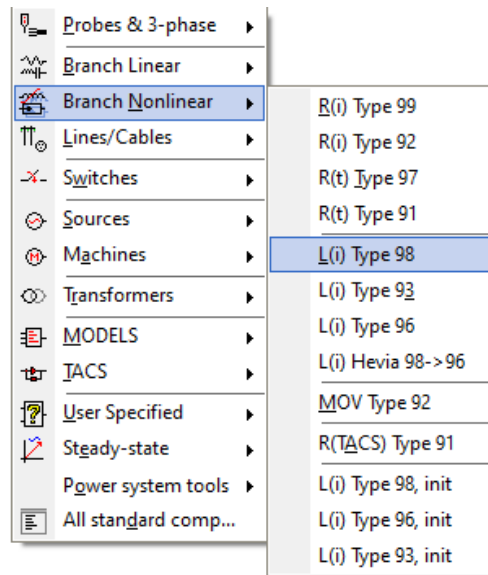


Fig. 4.1 Selección de un inductor no lineal en ATPDraw.

Una vez que se selecciona al inductor no lineal ($L(i)$ Type 98) aparecerá su ícono u objeto mostrado en la Fig. 4.2.



Fig. 4.2 Objeto de un inductor no lineal en ATPDraw.

Para modelar la curva de saturación de dicho transformador se necesitan los datos de la corriente de magnetización y el flujo, teniendo dichos datos se ingresan dando doble clic o clic derecho al objeto del inductor no lineal y seleccionando la ventana de *Characteristic* y dando clic en *Add* hasta completar los datos de corriente y flujo que sean requeridos, dicho procedimiento con datos se observa en la Fig. 4.3. En este caso se usó un transformador de 20 MVA con fines ilustrativos.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

| I [A] | Fluxlinked [wb-T] |
|---------|-------------------|
| 0.25733 | 51.4998 |
| 0.47475 | 58.7901 |
| 0.75493 | 63.111 |
| 1.30383 | 65.905 |
| 2.91546 | 70.2259 |

Fig. 4.3 Ventana para ingresar datos de corriente y flujo de un transformador.

Para visualizar la curva de saturación del transformador una vez que se ingresaron los datos que se muestran en la Fig. 4.3, se presiona el botón *View* de la ventana mostrada en la Fig. 4.3 y se formará la curva de saturación como la que se muestra en la Fig. 4.4.

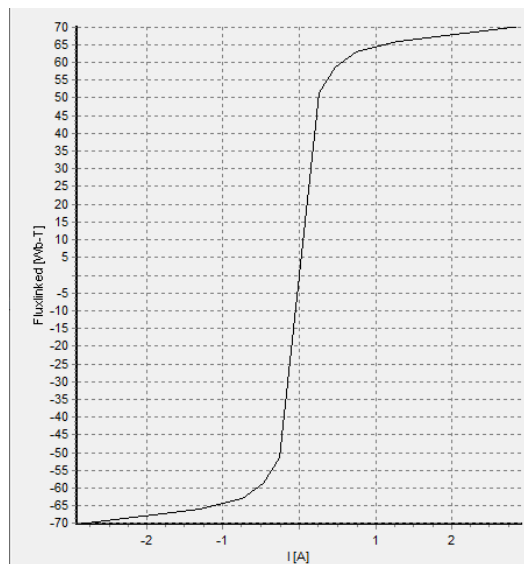


Fig. 4.4 Curva de saturación obtenida con los datos de la Fig. 4.3.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

La segunda forma de modelar un transformador desde ATPDraw, es con ayuda del objeto *transformers*. Como se observa en la Fig. 4.5, existen diversas opciones para modelar el transformador con este objeto, ya sea monofásico, trifásico, ideal, saturable, etc. En el caso de este trabajo de tesis se hará uso del transformador saturable trifásico, por lo cual se explica cómo se hace uso de este objeto en específico.

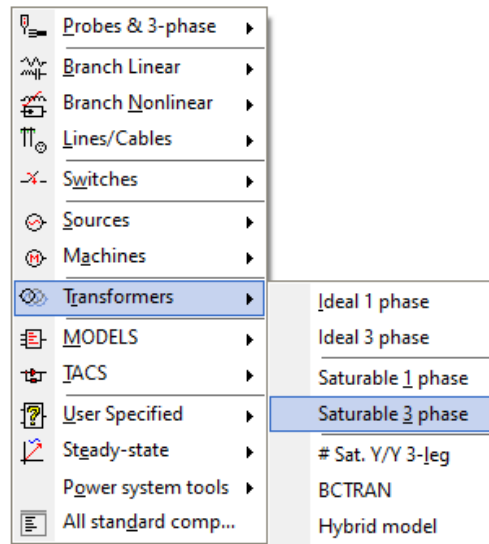


Fig. 4.5 Selección de un transformador trifásico saturable en ATPDraw.

Una vez seleccionado dicho transformador, aparecerá su objeto o ícono tal y como se muestra en la Fig. 4.6.

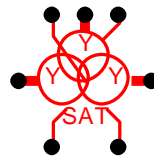


Fig. 4.6 Objeto de un transformador trifásico saturable en ATPDraw.

El software por default usa un transformador con terciario, sin embargo haciendo doble clic o bien pulsando clic derecho sobre el objeto, se puede modificar esto y además aparecerán

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

los parámetros necesarios para que ATPDraw modele al transformador. En la Fig. 4.7 se muestra la ventana para ingresar dichos datos.

| | Prim. | Sec. |
|------------|-------|------|
| U [V] | 24 | 0.4 |
| R [ohm] | 1 | 1 |
| L [mH,ohm] | 1 | 1 |

| NODE | PHASE | NAME |
|-----------|-------|------|
| Primary | 1 | |
| Secondary | 1 | |
| Starpoint | 1 | |
| Prim-N | 1 | |
| Sec-N | 1 | |
| Tertiary | 1 | |
| Tert-N | 1 | |

Fig. 4.7 Ventana con los datos a ingresar para modelar el transformador en ATPDraw.

Los parámetros eléctricos que aparecen en la ventana y que son importantes para este trabajo son:

- U[V]: Niveles de voltaje en el transformador tanto del primario como del secundario.
- R [ohm]; Resistencia de los devanados primario y secundario.
- L [mH,ohm]: Inductancia de los devanados primario y secundario.
- *Coupling*: Conexión del transformador tanto en el primario como en el secundario.
- *Phase shift*: Desfazamiento angular entre devanados.
- Rm: Resistencia de magnetización.
- I(0): Corriente de estado estable.
- F(0): Flujo de estado estable.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

En caso de que el transformador a simular tenga terciario, se puede seleccionar la casilla que dice: *3-winding*.

El modelado de la curva de saturación se hace de la misma manera que se explicó anteriormente con el inductor variable, desde la pestaña *Characteristic*.

4.3 Cables subterráneos en ATPDraw

Una vez que se tiene abierto un proyecto en ATPDraw se hace uso del objeto *LCC template*, disponible en el menú de componentes, para la obtención de un modelo numérico que hará la simulación digital de un grupo de cables subterráneos.

Para usar este objeto se da clic derecho sobre cualquier sitio de la ventana de trabajo de ATPDraw y se selecciona *LCC template*, dentro del submenú de *Líneas/cables* como se muestra en la Fig. 4.8.

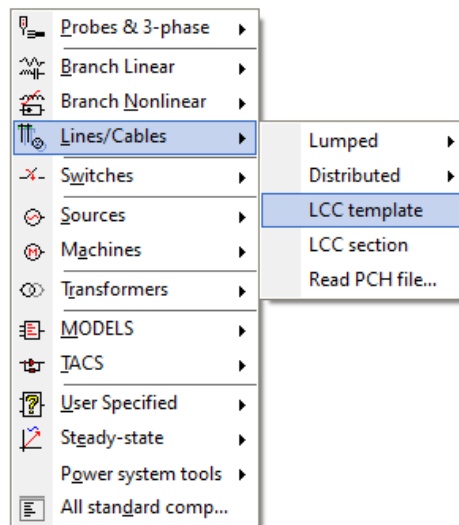


Fig. 4.8 Selección de objeto *LCC template*.

Una vez seleccionado, aparecerá el objeto o ícono como el que se muestra en la Fig. 4.9.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

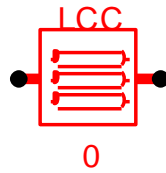


Fig. 4.9 Objeto *LCC* para modelar cables subterráneos.

Este objeto es la interfaz para especificar la geometría y ciertos datos necesarios para obtener el modelo analítico de los cables subterráneos a simular. Para ingresar dichos datos se interactúa con dos tipos de ventanas de datos (*Model* y *Data*) como se muestra en la Fig. 4.10.

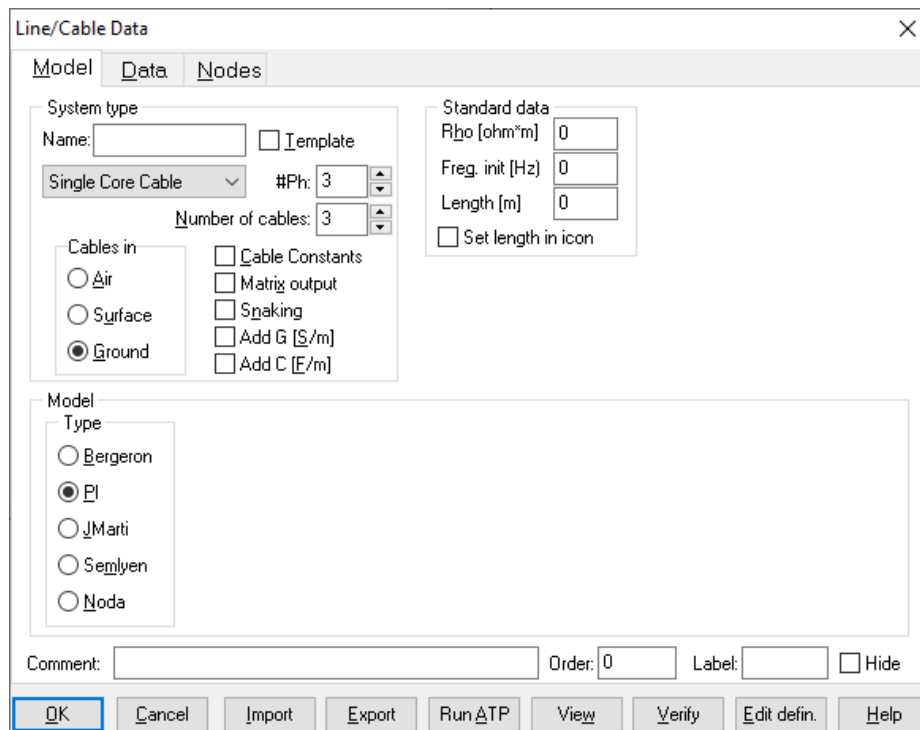


Fig. 4.10 Ventana (*Model*) que permite ingresar datos para modelar cables subterráneos.

La opción de interés para modelar los cables subterráneos es la opción de, *Single Core Cable*, en esta se necesitan ciertas especificaciones eléctricas para modelar los cables como son:

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

- *Number of cables*: Especifica el número de cables concéntricos.
- *#Ph*: Número de fases que se desean modelar (el número dependerá de las pantallas también).
- *Rho [ohm*m]*: Resistividad del terreno.
- *Freq init [Hz]*: Frecuencia inicial o de referencia del sistema.
- *Length [m]*: Longitud de la línea a modelar.

También es importante especificar el modelo que se desea usar para la simulación, algunas opciones a usar son las siguientes:

- Modelo Bergeron: Preferido para estudios transitorios con apartarrayos
- Modelo Pi: Preferido para estudios de estado estable.
- Modelo JMarti: Preferido para estudios de transitorios.
- Algunos otros modelos son: Semlyen y Noda.

La Fig. 4.11 muestra la ventana *Data* que sirve para cargar algunos datos geométricos importantes para el modelado de cables subterráneos.

| | CORE | SHEATH | ARMOR |
|-------------|------|--------|-------|
| Rin [m] | 0 | 0 | 0 |
| Rout [m] | 0 | 0 | 0 |
| Rho [ohm*m] | 0 | 0 | 0 |
| mu | 1 | 1 | 1 |
| mu (ins) | 1 | 1 | 1 |
| eps (ins) | 1 | 1 | 1 |

Fig. 4.11 Ventana (*Data*) para ingresar datos geométricos del cable subterráneo a simular.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

En dicha figura se observa que se necesitan algunos datos geométricos del conductor principal (*core*), y en que también se puede seleccionar la pantalla (*sheath*) y la armadura (*armor*), dichos datos son:

- Rin [m]: Radio interior.
- Rout [m]: Radio exterior.
- Rho [ohm*m]: Resistividad del material usado.
- mu: Permeabilidad relativa del conductor.
- mu [ins]: Permeabilidad.
- eps [ins]: Permitividad del aislamiento.
- “R7” [m]: Radio total del cable.

También es necesario seleccionar la posición del centro de geométrico del cable, vertical corresponde a la profundidad respecto a la superficie del suelo y horizontal respecto a una referencia arbitraria, ambas deben ser indicadas en metros.

Los datos de un cable pueden copiarse en una localidad de memoria con el botón *Copy* y luego aplicarse a otro cable con el botón *Paste*. La configuración del cable puede visualizarse y comprobarse espacialmente con el botón *View*.

5.4 Fuente de C.A. en ATPDraw

Para realizar las simulaciones del sistema de forma correcta, es necesario saber cómo se modela una fuente de voltaje alterno. Para ello se sigue un procedimiento tal y como se ha hecho anteriormente, se selecciona desde el menú de componentes de ATPDraw, el objeto *AC source* (1&3).

Una vez seleccionado, aparecerá el objeto como se muestra en la Fig. 4.12.



Fig. 4.12 Objeto *AC source* (1&3).

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Dando clic derecho o doble clic sobre el componente, saldrá una ventana llamada *Attributes* como la mostrada en la Fig. 4.13.

The dialog box 'Attributes' for the ACSOURCE component contains the following data:

| DATA | UNIT | VALUE |
|-------------|---------|-------|
| AmplitudeA | Volt | 10000 |
| Frequency | Hz | 50 |
| PhaseAngleA | degrees | 0 |
| StartA | sec | -1 |
| StopA | sec | 100 |

| NODE | PHASE | NAME |
|----------|-------|------|
| AC | 1 | |
| ACNEG | 1 | |
| Internal | 1 | |

Additional fields include: Copy, Paste, Reset, Order: 0, Label: [], Comment: [], Type of source (Voltage selected), Num phases (Single selected), Angle units (Degrees selected), Amplitude (RMS L-L selected), Grounding (Grounded selected), and Hide (unchecked). Buttons at the bottom are Edit definitions, OK, Cancel, and Help.

Fig. 4.13 Ventana *Attributes*, para configurar una fuente de voltaje

En esta ventana se puede seleccionar qué tipo de fuente alterna se quiere usar (voltaje o corriente). Los datos a considerar para este trabajo son la amplitud de la fuente, la frecuencia con la que trabajará y que la amplitud sea RMS L-L.

4.5 Simulaciones

Hasta ahora la ferroresonancia se ha tratado desde un punto de vista teórico, sin embargo para entender el fenómeno de mejor manera y acercarse a un posible caso real, es necesario simular diversos circuitos con ciertas condiciones ferroresonantes y no ferroresonantes. En ese sentido a continuación se presentan distintos circuitos y casos simulados en el software ATPDraw, comenzando desde el más simple a lo más real con cables subterráneos.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

4.5.1 Simulación de ferroresonancia en un sistema monofásico

Este primer circuito, que se muestra en la Fig. 4.14, es el más sencillo debido a que su propósito es entender el fenómeno de la ferroresonancia en su forma más simple.

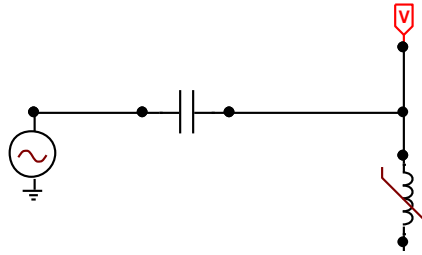


Fig. 4.14 Circuito monofásico para simular ferroresonancia.

Este circuito ferroresonante puede ser, matemáticamente representado, por la ecuación diferencial (1.2) mostrada en el capítulo 1 y aunque hay varios estudios y métodos que han usado para resolver dicha ecuación no lineal, esto está fuera del alcance y objetivo de esta tesis puesto que aquí se simularán dichos casos.

Se muestra un circuito LC serie monofásico con una fuente monofásica de 13.8 kV, a una frecuencia de 60 Hz y un ángulo de desfase de 0° . Se consideran tres valores de capacitancia los cuales son: 10, 0.1, y 0.0001 μF . El inductor presenta la característica no lineal formada por los datos de la curva de saturación tomados de la Tabla II [42].

Tabla II Datos de la curva de saturación del inductor no lineal del circuito 1 [42].

| Puntos muestras de la curva de saturación I- ϕ | |
|---|--------------|
| Corriente I (A) | Flujo (Wb-T) |
| 0.25733 | 51.4998 |
| 0.47475 | 58.7901 |
| 0.75493 | 63.111 |
| 1.30383 | 65.905 |
| 2.91546 | 70.2259 |

Los datos del muestreo para la simulación en *ATPDraw* son: $\text{delta} = 0.001$ s y $T_{\text{max}} = 0.2$ s.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Los resultados se muestran en la Fig. 4.15.

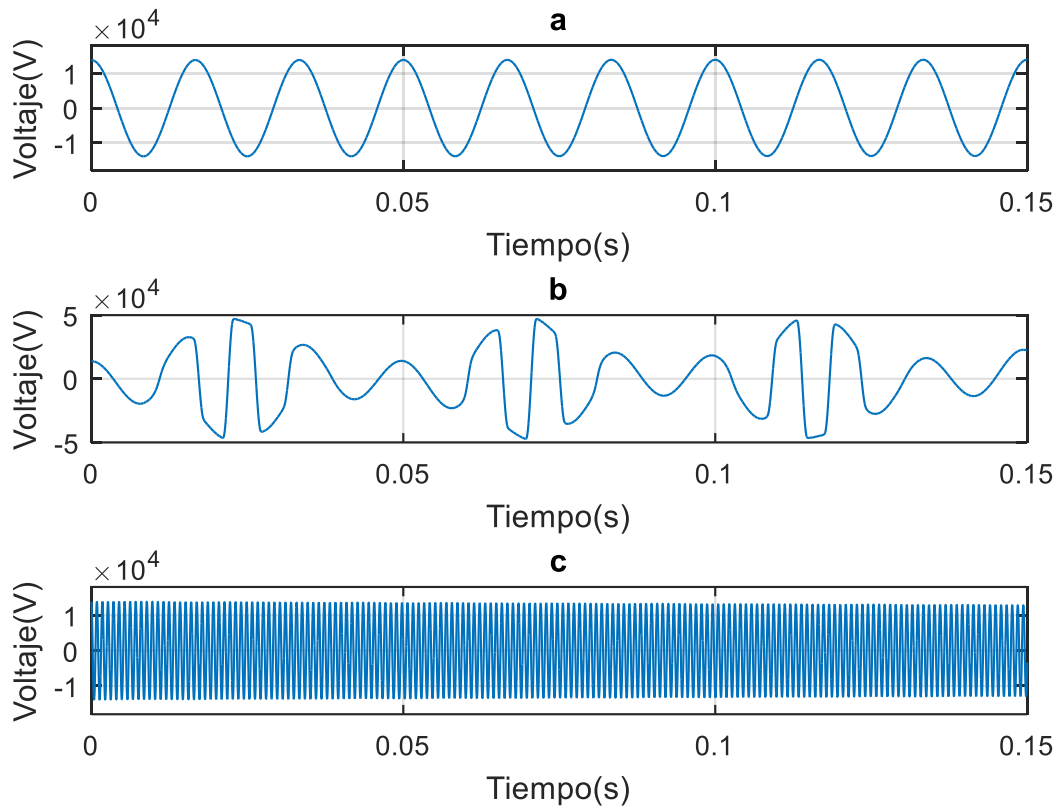


Fig. 4.15 Resultados de la simulación del primer circuito a) capacitancia de $10 \mu\text{F}$, b) capacitancia de $0.1 \mu\text{F}$ c) capacitancia de $0.0001 \mu\text{F}$.

Se observa que en el caso de $10 \mu\text{F}$ (gráfica 'a') el voltaje en el inductor no mostró cambios respecto a sus valores nominales porque no tocó un punto de operación ferroresonante y por lo cual no se presentó ferroresonancia, por lo que se induce que a estos valores y para esta curva de saturación no se presentaría alguna falla.

En el caso de $0.1 \mu\text{F}$ (gráfica 'b') ya se presenta una distorsión en la forma de onda y un sobrevoltaje de casi 50 kV , es decir para este valor de capacitancia ya se tiene un punto de operación ferroresonante por lo cual se presenta ferroresonancia.

Por último para el caso de $0.0001 \mu\text{F}$, a pesar de que por cuestiones numéricas del simulador la onda presenta muchas oscilaciones debido a su frecuencia natural de

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

oscilación, sí se alcanza a visualizar que no se produce ningún sobrevoltaje en el inductor y por lo tanto no se produce ferroresonancia en el circuito con ese valor de capacitancia.

4.5.2 Simulación de ferroresonancia de un sistema trifásico subterráneo

Una vez que se vio el sistema más simple (monofásico) es necesario ver cómo se comporta la ferroresonancia en un sistema trifásico subterráneo.

Para ello, las simulaciones que a continuación se presentan se dividen en tres casos con diferentes circunstancias de cierre de fases. La Tabla III muestra los datos de la curva de saturación utilizados para el transformador de dos devanados y con capacidad de 300 kVA.

Tabla III Datos de la curva de saturación del transformador trifásico.

| Puntos muestras de la curva de saturación $I-\phi$ | |
|--|--------------|
| Corriente I (A) | Flujo (Wb-T) |
| 0.00798335 | 11.2176 |
| 0.01709179 | 22.0949 |
| 0.03357586 | 35.8556 |
| 0.05488831 | 41.4023 |
| 0.08041006 | 44.0322 |

Los parámetros eléctricos del transformador son: niveles de voltaje de 13.8 kV en el lado primario con conexión delta, con una resistencia de 0.213Ω , una inductancia de 1.228 mH, para el lado secundario el nivel de voltaje es de 220 V con conexión estrella, una resistencia de 0.0021Ω y una inductancia de 0.01204 mH. La resistencia de magnetización es de 6670000Ω [42].

Los tiempos de cierre en los 3 interruptores para los 3 eventos, así como la longitud del cable se presentan en la Tabla IV.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Tabla IV Datos utilizados para las simulaciones.

| Evento simulado | Voltaje de alimentación (RMS línea-línea en V) | Tiempo de cierre del interruptor 1 (s) | Tiempo de cierre del interruptor 2 (s) | Tiempo de cierre del interruptor 3 (s) | Longitud del cable (m) |
|-----------------|--|--|--|--|------------------------|
| 1 | 13800 | 0 | 0.205 | 0.411 | 50 y 150 |
| 2 | 13800 | 0 | 0.205 | NA | 50 y 150 |
| 3 | 13800 | 0 | NA | NA | 50 y 150 |

Para el equivalente del sistema se usó una resistencia de 0.0355Ω , inductores de 3.854 mH , y el sistema trabaja a 60 Hz , esto para todos los casos [42].

Al ser un circuito trifásico se usan 3 cables para las fases y 1 más debido a que CFE especifica [54] que se debe de utilizar un cable aterrizado llamado neutro corrido en las instalaciones en las que los cables tengan pantalla y que dicho cable debe estar aterrizado en los dos extremos de la ruta, además de que este tipo de configuraciones es muy típica en los cables subterráneos y es importante ver cómo se comporta la ferroresonancia con este tipo de cables.

Considerando que el cable usado cuenta con pantalla, se usan 7 fases; es decir, 3 para los conductores, 3 para las pantallas y 1 para el neutro corrido.

El cable usado y modelado fue el CONDUMEX VULCANEL 15 kV XLP Cobre 1000 kCM 507 mm^2 [55] en disposición horizontal, con apantallamiento y por la especificación se usó neutro corrido, el cual se puede tomar de las terminales del módulo, antes mencionado, para modelar cables de ATPDraw.

Se consideró un modelo de línea PI, con una frecuencia de 60 Hz y una resistividad del terreno de 100 ohm/m .

Se usaron 2 resistencias de 0.00001Ω para aterrizar la pantalla y el neutro concéntrico y una de 2 ohm como las usadas comúnmente para los aterrizamientos de cables.

Los datos del muestreo para la simulación en ATPDraw son: $\delta = 0.00005 \text{ s}$ y $T_{max} = 0.5 \text{ s}$.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Con todos estos parámetros y datos se obtiene un circuito como el mostrado en la Fig. 4.16.

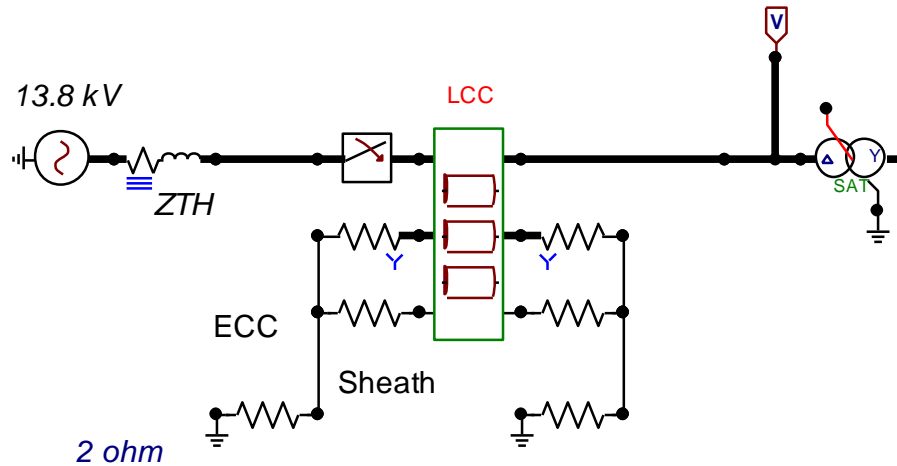


Fig. 4.16 Sistema trifásico subterráneo para el análisis de ferroresonancia.

- Evento 1: Transformador trifásico con conexión delta – estrella sin carga, cierre secuencial de tres interruptores con los tiempos de cierre mostrados en la Tabla IV.

La Fig. 4.17 muestra que para una longitud de 50 m se produce ferroresonancia al inducirse sobrevoltajes de más de 40 kV en las fases *b* y *c* antes del cierre de dichas fases, ya que después de cerrar los interruptores de ambas fases, el voltaje vuelve a comportarse forma nominal.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

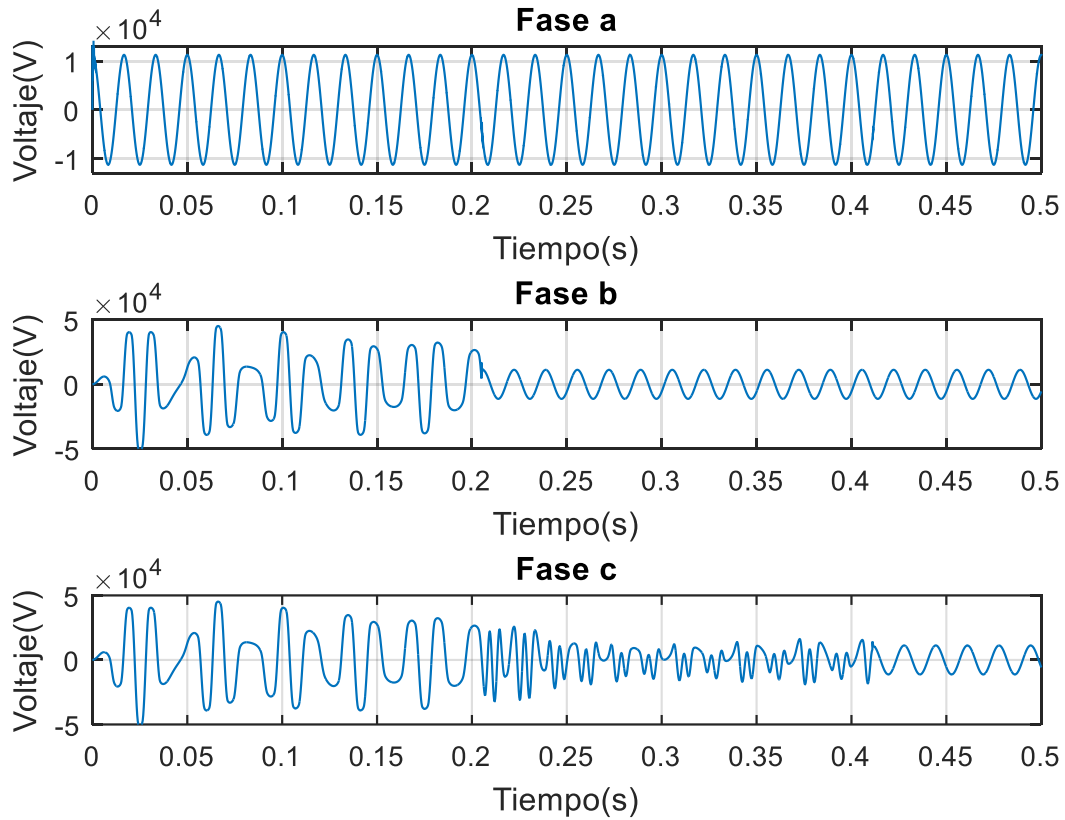


Fig. 4.17 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 1 y con 50 m de longitud.

Para el caso de 150 m podemos ver un comportamiento parecido al de 50 m de longitud, sin embargo al hacer más largo el cable y tener una mayor capacitancia, se produce un sobrevoltaje superior a los 100 kV en las fases donde se induce la ferroresonancia tal y como se muestra en la Fig. 4.18.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

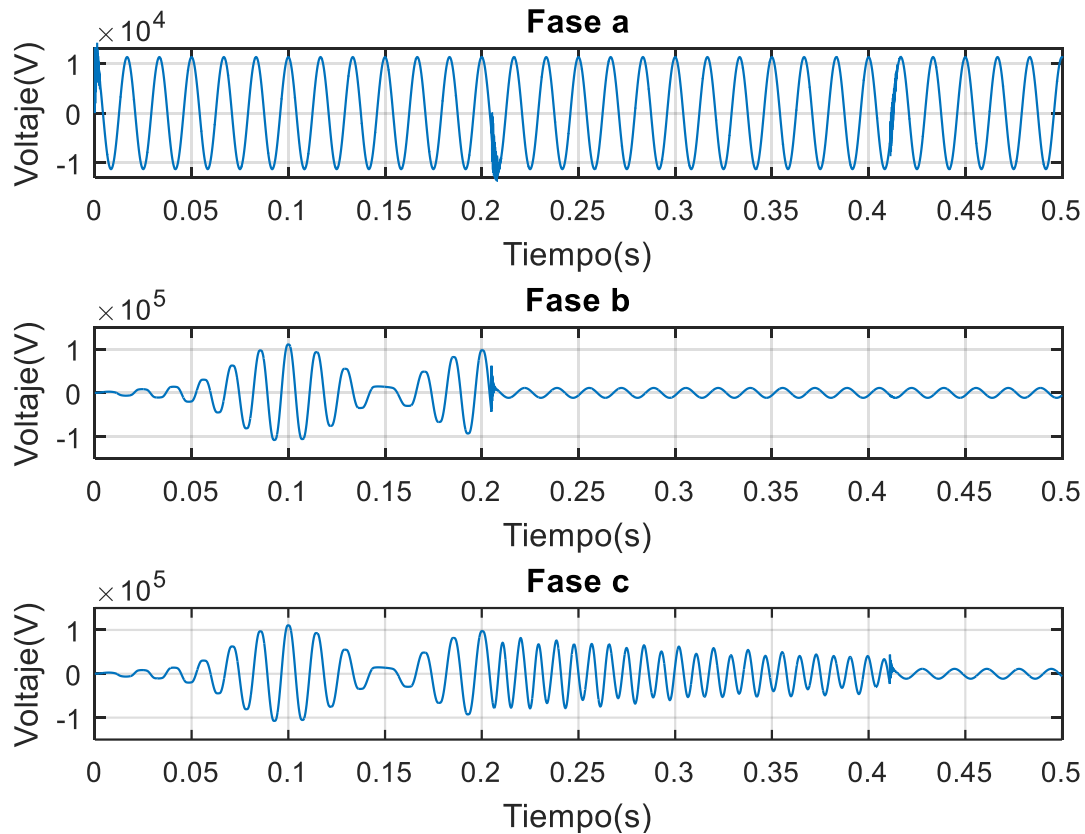


Fig. 4.18 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 1 y con 150 m de longitud.

- Evento 2: Transformador trifásico con conexión delta – estrella sin carga y sólo con el cierre secuencial de dos fases (*a* y *b*) con los tiempos mostrados en la Tabla IV.

En la Fig. 4.19 se muestran los resultados para una longitud de 50 m, y se aprecia que además del sobrevoltaje en la fase *b*, también se induce un sobrevoltaje en la fase que está abierta, es decir la fase *c*, aun cuando no circula corriente por ella, este es otro efecto de la ferroresonancia.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

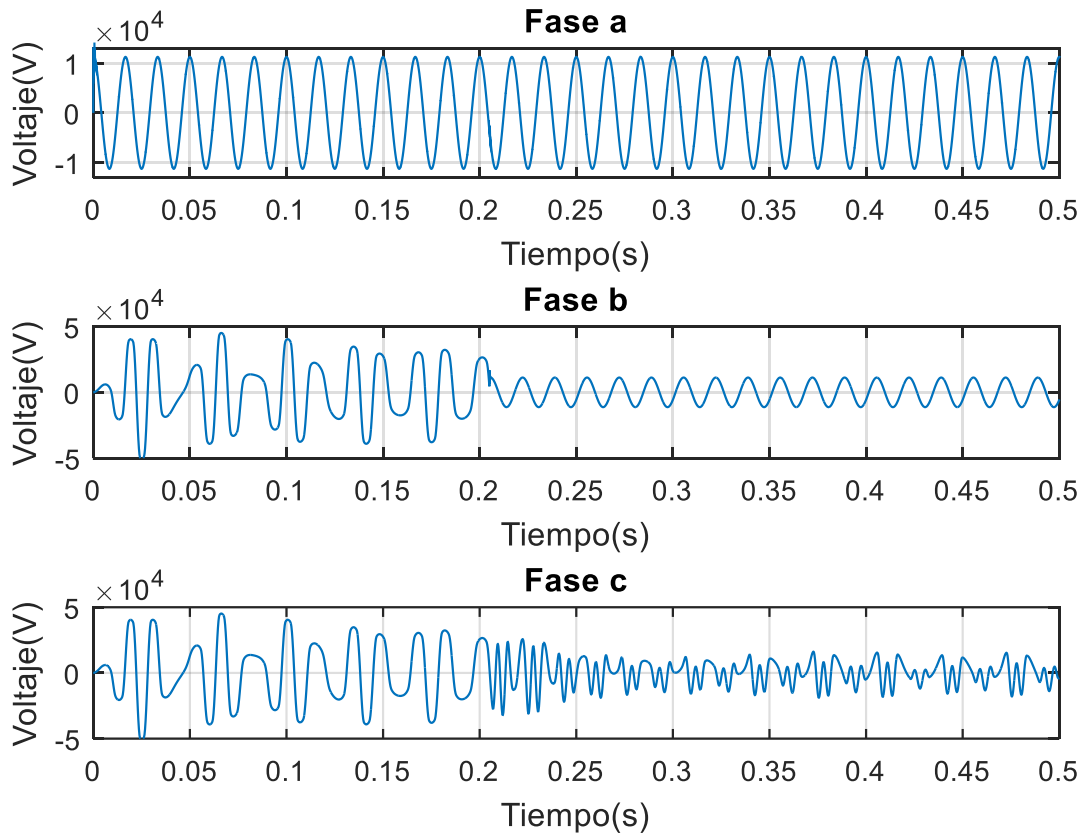


Fig. 4.19 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 2 y con 50 m de longitud.

Nuevamente en la Fig. 4.20 se aprecia que debido a la ferroresonancia aparece un sobrevoltaje en la fase *b* que se normaliza después de cerrar el interruptor de dicha fase y se induce un sobrevoltaje en la fase que está abierta (la fase *c*) que se atenúa después de cerrar la fase *b*, pero que sigue presente conforme pasa el tiempo. Al ser mayor la longitud, el voltaje es más grande que con la longitud de 50 m, y se puede decir que en este caso y con esas longitudes, también se cae en un punto ferroresonante.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

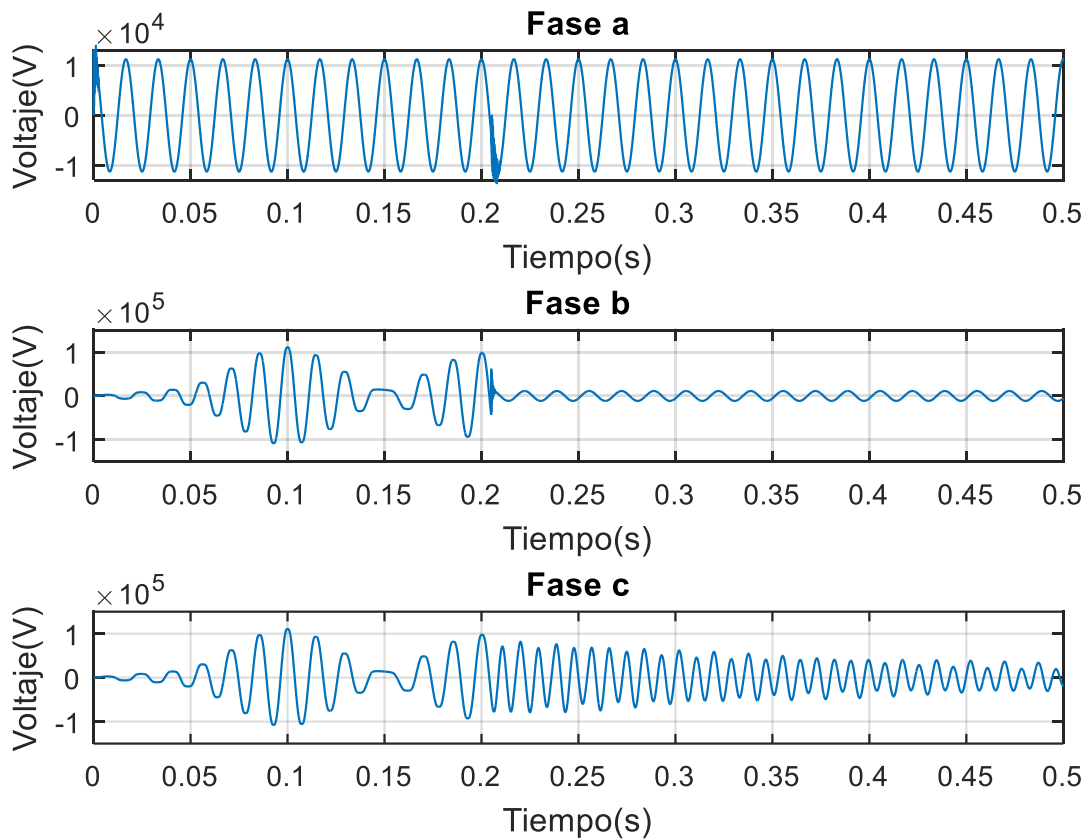


Fig. 4.20 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 2 y con 150 m de longitud.

- Evento 3: Transformador trifásico con conexión delta – estrella sin carga y sólo la fase *a* cerrada en el tiempo mostrado en la Tabla IV.

La Fig. 4.21 muestra el comportamiento del voltaje en las 3 fases para una longitud de 50 m, se aprecia que debido al fenómeno de la ferroresonancia se induce un sobrevoltaje de igual magnitud en las 2 fases que están abiertas, lo cual podría reflejarse como una falla.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

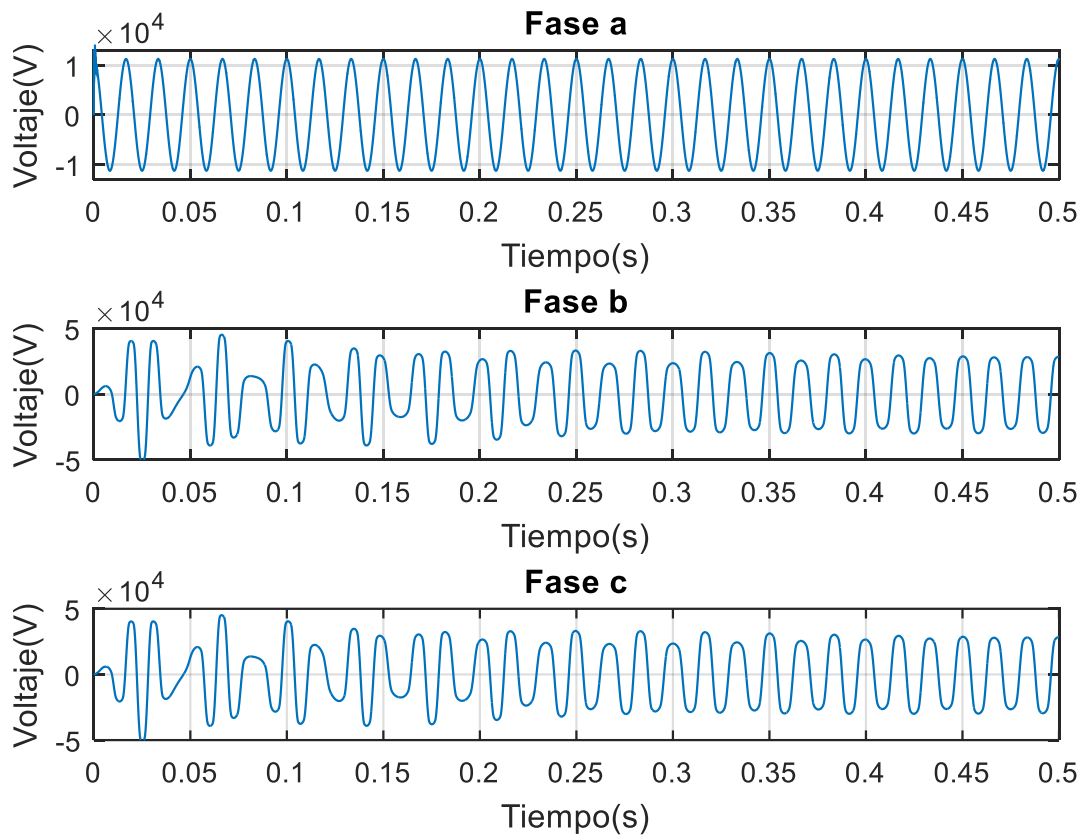


Fig. 4.21 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 3 y con 50 m de longitud.

Para la longitud de 150 m la ferroresonancia sigue presenten en las fases abiertas, induciéndose como un sobrevoltaje, sólo que al ser mayor la longitud se puede observar en la Fig. 4.22 que el voltaje también es mayor que en el caso de 50 m.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

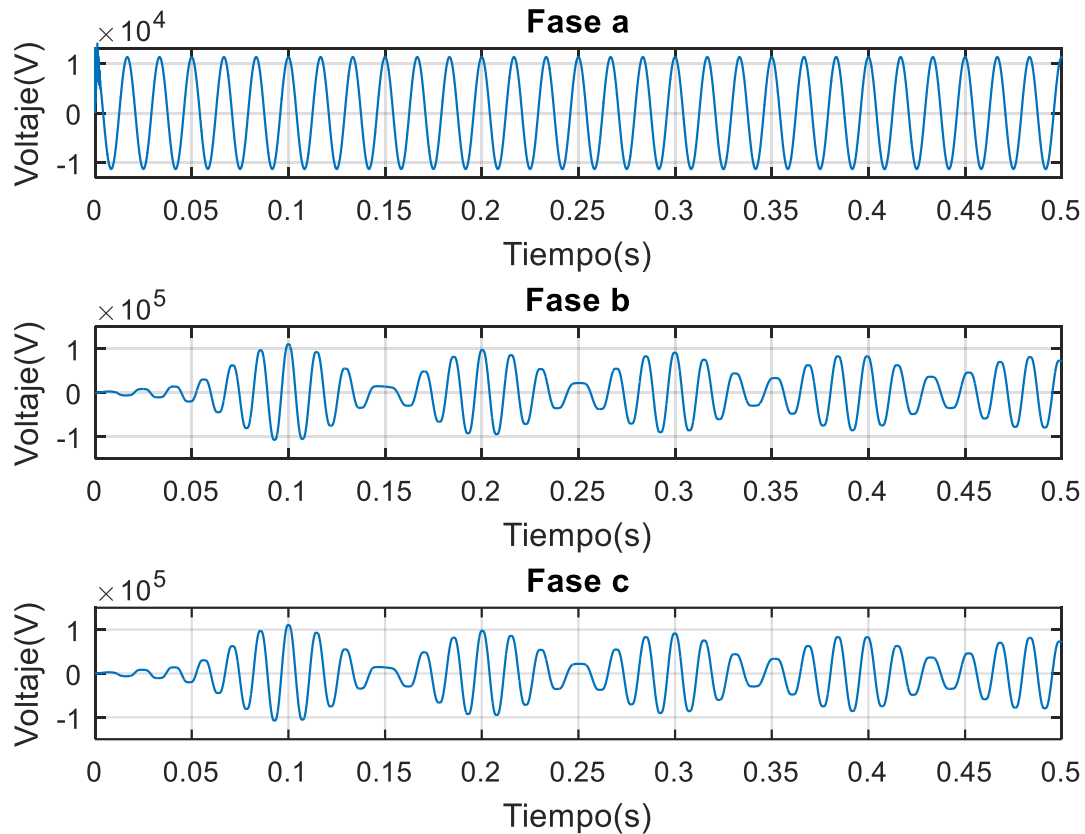


Fig. 4.22 Comportamiento de los voltajes en cada fase para el caso 3 y con 150 m de longitud.

Como dato, es importante mencionar que los sobrevoltajes por ferroresonancia se presentaron en un intervalo de longitud mayor a 1 m y menor 500 m.

5.5.3 Simulación de ferroresonancia de un sistema de distribución trifásico subterráneo real

Hasta ahora se han simulado un sistema monofásico y uno trifásico subterráneo, los cuales han ayudado a entender cómo se comporta la ferroresonancia, sin embargo los siguientes dos casos de estudio a simular serán los que se acerquen más a la realidad de la ferroresonancia en sistemas subterráneos y de esa manera ver qué implicaciones tiene dicho fenómeno en estas condiciones.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

El sistema es de 23 kV RMS línea a línea. El transformador subterráneo usado para la simulación es un transformador trifásico de 2 devanados con capacidad de 500 KVA, los datos usados para la curva de saturación se muestran en la Tabla V.

Tabla V Datos de la curva de saturación del transformador trifásico subterráneo.

| Puntos muestras de la curva de saturación I- ϕ | |
|---|--------------|
| Corriente I (A) | Flujo (Wb-T) |
| 0.01689289 | 14.8532 |
| 0.05067868 | 30.849 |
| 0.1689289 | 49.5107 |
| 0.5067868 | 59.8563 |
| 1.689289 | 64.5792 |
| 5.067868 | 66.0687 |
| 16.89289 | 66.6064 |

Los parámetros eléctricos del transformador subterráneo son: niveles de voltaje de 23 kV para el lado primario con conexión delta, con una resistencia de 1.672 Ω y una inductancia de 26.08 mH. Para el lado secundario se tiene un voltaje de 220 V y una conexión en estrella, con una resistencia de 0.0001549 Ω y una inductancia de 0.002415 mH. La resistencia de magnetización es de 1306000 Ω y se tiene una corriente de magnetización en estado estacionario de 0.0752 A y un flujo de estado estacionario de 85.76 (Wb-T).

La Tabla VI muestra la impedancia usada en el equivalent e del sistema.

Tabla VI Datos de la impedancia para el equivalente del sistema.

| Secuencia | R (Ohm/m) | L (mH/m) |
|-----------------|-----------|--------------|
| Positiva | 0.243 | 6.96156984 |
| Cero | 1.13129 | 8.9563913708 |

Se simularon 3 acoplamientos de cables a diferentes longitudes, esto para acercarse más a un sistema real y considerando que regularmente no se rebasan los 500 m por cable o acoplamiento.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Nuevamente se usan 3 cables para las fases y 1 más debido a las especificaciones ya mencionadas de CFE.

Considerando que el cable usado cuenta con pantalla, se siguen las condiciones del caso anterior es decir: Se usan 7 fases; 3 para los conductores, 3 para las pantallas y 1 para el neutro corrido.

El cable usado y modelado fue el CONDUMEX VULCANEL 25 kV XLP Cobre 1000 kCM 507 mm² [55] con apantallamiento y neutro corrido en disposición horizontal.

En cada acoplamiento se consideró el modelo de línea PI, con una frecuencia de 60 Hz y una resistividad del terreno de 100 ohm/m. La longitud del primer acoplamiento es de 350 m, la del segundo es de 500 m y la del tercero de 500 m.

Los parámetros usados en el conductor y la pantalla para simular el cable se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII Parámetros de conductor y pantalla.

| Parámetro | Conductor | Pantalla |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Rin (m) | 0 | 0.02304 |
| Rout (m) | 0.013315 | 0.024194545 |
| Rho (ohm*m) | 1.843×10^{-8} | 1.144×10^{-7} |
| mu | 1 | 1 |
| mu (ins) | 1 | 1 |
| mps (ins) | 2.6645 | 5 |

Los tiempos de cierre de los interruptores se muestran en la Tabla VIII.

Tabla VIII Tiempos de cierre de los interruptores.

| Interruptor | Tiempo (s) |
|-------------|------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 0.205 |
| 3 | 0.411 |

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Se tomaron las mismas consideraciones que la simulación anterior para el aterrizamiento de las pantallas y el neutro corrido pero esta vez se realizó en cada módulo.

Los datos del muestreo para la simulación en ATP/EMTP son: $\delta t = 0.00005$ s y $T_{max} = 0.5$ s.

Con todos estos parámetros se obtiene un circuito como el mostrado en la Fig. 4.24

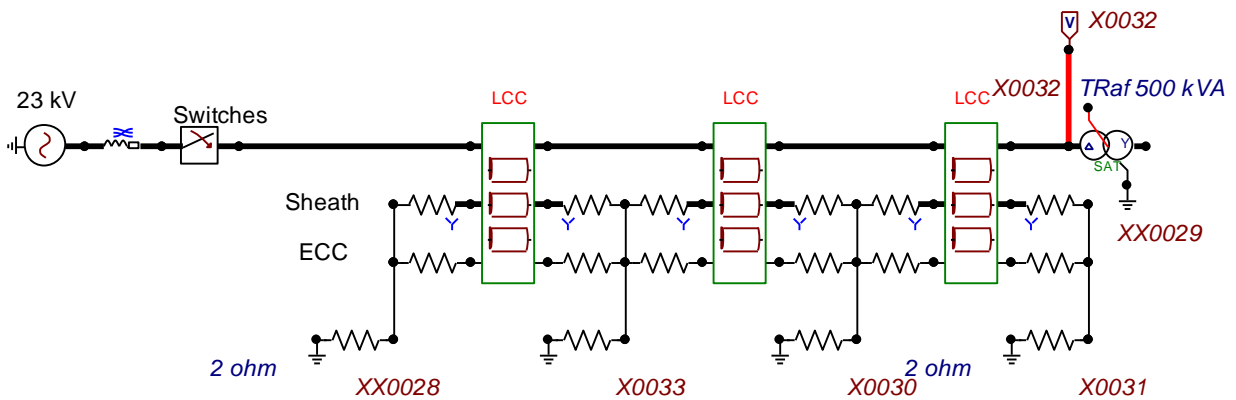


Fig. 4.24 Sistema de distribución trifásico subterráneo para simular ferroresonancia.

La Fig. 4.25 muestra el comportamiento del voltaje en las fases del transformador al realizar la simulación. Se observa que de nueva cuenta se induce ferroresonancia en las fases *b* y *c* antes de que cierren los interruptores, el peor de los casos se da en la fase *c* pues se tienen sobrevoltajes cercanos a los 80 kV, los cuales son mucho mayores al nominal de 23 kV, para el caso de la fase *b* se tienen sobrevoltajes poco mayores a los 50 kV.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

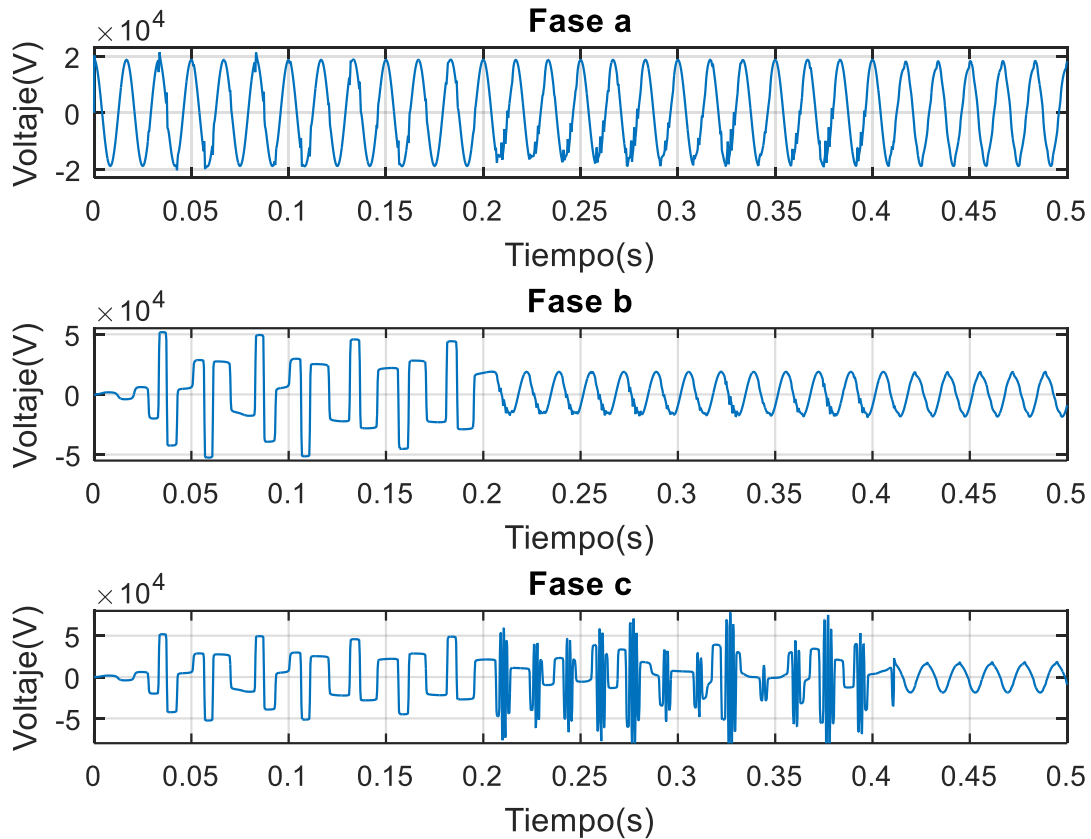


Fig. 4.25 Comportamiento de los voltajes fases para la ferroresonancia en un sistema de distribución subterráneo con acoplamientos.

Para este sistema se probaron diversas longitudes, observando que el sistema es muy propenso a sobretensiones por ferroresonancia a partir de los 100m de longitud. Conforme se aumenta el largo de los cables, el sistema muestra caer en más puntos ferroresonantes, sin embargo para longitudes mayores de 1500 m y menores a 1900 m sólo se presentaron sobrevoltajes en la fase c.

Es importante mencionar que para el mismo sistema se decidió conectar una carga trifásica en estrella de 100 KVA y una de 200 KVA, ambas con un fp de 0.8 en atraso y ver el comportamiento del sistema. Obteniendo de resultados que al simular el caso, sí se induce un voltaje en las fases abiertas pero este voltaje no sobrepasa al nominal.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

Así mismo se probó con una carga puramente resistiva de 500 kW y tampoco se notó presencia de sobrevoltajes.

5.5.4 Simulación de ferroresonancia de un sistema de distribución trifásico subterráneo con cables en disposición triangular

Otra de las configuraciones comúnmente usada en los sistemas de distribución subterráneos es con cables en disposición triangular, por eso a continuación se muestra la simulación con este tipo de configuración geométrica en los cables.

El sistema es básicamente el mismo que el de la Fig. 25, pues la intención de esta simulación es ver cómo se comporta el mismo sistema pero con diferente disposición geométrica en los cables. Debido a esto el sistema sigue siendo de 23 kV y los parámetros eléctricos y datos del transformador siguen siendo los mismos que en la simulación anterior y que en las tablas VI y VII, igualmente los tiempos de cierre de los interruptores son los de la Tabla VIII.

La diferencia significativa se encuentra en la disposición geométrica del cable ya que ahora será triangular por lo que las posiciones de las fases y el neutro corrido serán distintas a los casos anteriores, la Tabla IX muestra la posición de los cables que componen las 3 fases y el neutro corrido para formar la disposición triangular.

Tabla IX Posición de las fases para cable con disposición triangular

| Cable | Posición vertical (m) | Posición horizontal (m) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | 1.097 | 0.0342 |
| 2 | 1.097 | -0.0342 |
| 3 | 0.09606 | 0 |
| Neutro corrido | 0.9803 | -0.0394 |

A partir de estos datos se construye el cable con disposición triangular, para los 3 módulos de acoplamiento. El botón *View*, visto en el capítulo anterior, muestra que los datos ingresados para esta simulación han sido correctos puesto que como se aprecia en la Fig. 4.26 el cable ha quedado en disposición triangular.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

La longitud de los acoplamientos es de 100 m para el primero, 250 para el segundo y 800 para el tercero.

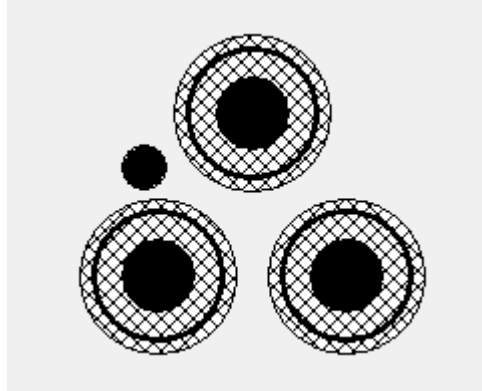


Fig. 4.26 Cable en disposición triangular usado en la simulación.

Los datos de muestreo para realizar la simulación en ATP/EMTP son los mismos que en el caso anterior.

La Fig. 4.27 muestra los voltajes, una vez realizada la simulación. Se puede apreciar que aunque la geometría del cable y las longitudes de los acoplamientos son diferentes, la forma de onda del voltaje y los sobrevoltajes inducidos que se presentaron, debido a la ferroresonancia, son muy parecidos a la simulación anterior pues nuevamente hubo un pico de voltaje cercano a los 50 kV en la fase b, mientras que en la fase c se presentaron voltajes cercanos a los 80 kV.

Con esto se demuestra que este tipo de cables, en disposición triangular, también pueden colaborar para que se presente ferroresonancia en el sistema.

Capítulo 4 Uso de elemento eléctricos y simulaciones de casos ferroresonantes en ATPDraw.

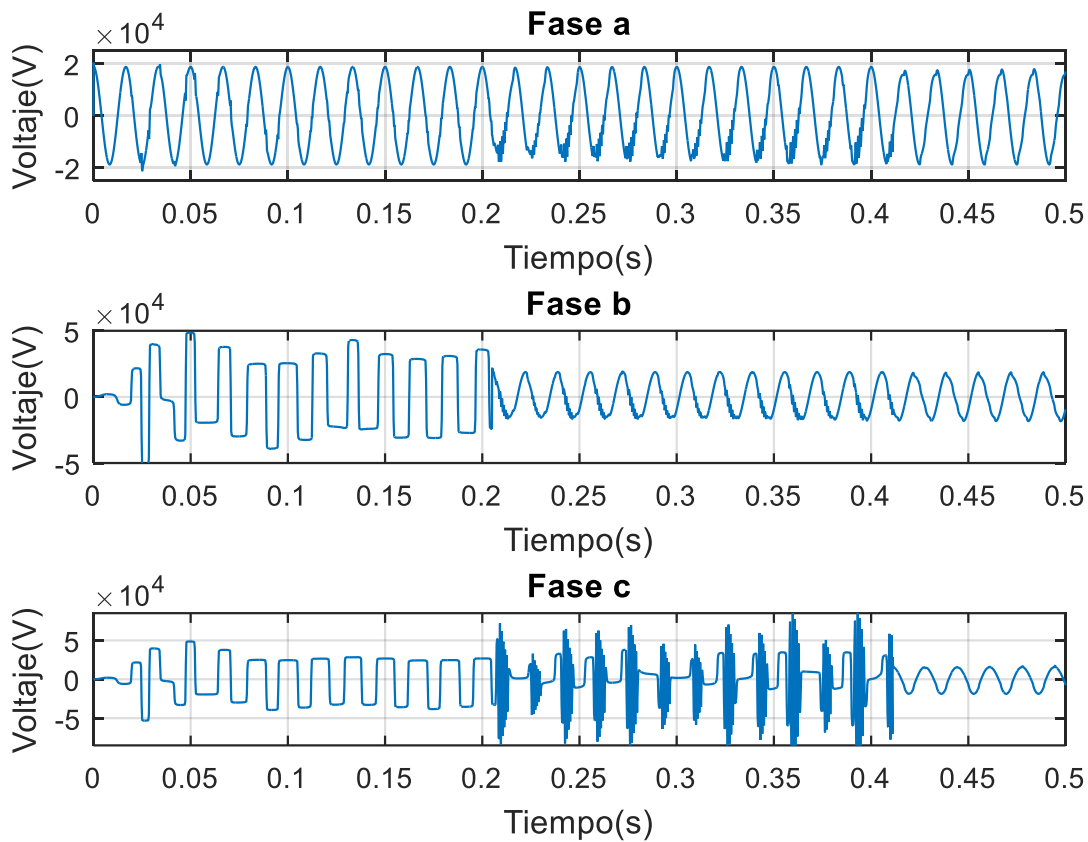


Fig. 4.27 Comportamiento de los voltajes fases para la ferroresonancia en un sistema de distribución subterráneo con cables en disposición triangular.

La Tabla X muestra los sobrevoltajes obtenidos en las simulaciones. Los peores casos se dieron en el sistema de 13.8 kV pues se observaron sobrevoltajes mayores a los 100 kV, mientras que para el sistema de 23 kV los sobrevoltajes de 80 kV se presentaron en la fase c.

Tabla X Comparativa con los sobrevoltajes obtenidos en todos los casos simulados.

| Caso | Nivel de voltaje (kV) | Longitud (m) | Sobrevoltaje aproximado (kV) |
|----------|-----------------------|--------------|------------------------------|
| 1 | 13.8 | 50 | >40 |
| | | 150 | >100 |
| 2 | 23 | 1350 | 80 |
| 3 | 23 | 1150 | 80 |

Capítulo 5 Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Es claro que la ferresonancia es un fenómeno el cual es difícil anticipar o predecir en qué momento pasará, además de que por lo visto en el capítulo 1 es un tema que si bien es cierto que no es del todo nuevo, también es una realidad que no tiene mucho que comenzó a estudiarse dentro de los sistemas de distribución subterráneos, que en el caso de México comenzaron a construirse a partir de 1960. Aunque hayan existido técnicas y métodos para estudiar y comprender la ferresonancia, hasta ahora la mejor manera de estudiar y poder predecir dicho fenómeno es a través de las simulaciones y en ese aspecto el software ATPDraw es sin duda una gran herramienta para simular circuitos con posibilidades de ferresonancia.

Aunque las configuraciones en delta, del lado primario del transformador, son las más expuestas a la ferresonancia, se concluye que no son únicos ya que basta con que la trayectoria de la corriente forme un circuito en serie con la característica no lineal del transformador y el efecto capacitivo del cable para que pueda existir un punto de operación ferresonante.

El caso monofásico sirvió como el ejemplo más básico para entender la ferresonancia y también para concluir que aumentar la capacitancia no siempre tiene efectos negativos ya que para ese caso al usar una capacitancia de $10 \mu\text{F}$ no existe ferresonancia, debido a que para ese valor de capacitancia, la pendiente de la recta de la ecuación (3.7) mostrada en la Fig. 3.4 del capítulo 3 se hizo muy pequeña y entonces ya no toca ningún punto de operación ferresonante, por lo que ese valor de capacitancia, sería un valor seguro para operar el sistema. Esto es importante porque prueba que no siempre al tener longitudes grandes de cable y por lo tanto mayores capacitancia, se presentará ferresonancia, tal y como menciona la ANSI/IEEE Std C62.2-1987.

5.2 Recomendaciones

- Una vez que el sistema ha sido propuesto y diseñado, se recomienda simularlo para ver qué tan expuesto está a problemas por ferresonancia, y si es necesario ajustar diversos parámetros eléctricos que hagan al sistema más seguro.
- Diseñar las protecciones contra sobrevoltajes (apartarrayos) teniendo en cuenta los sobrevoltajes que se puedan presentar por ferresonancia en el transformador.
- Limitar la longitud de los cables no necesariamente hace que el sistema sea menos propenso a la ferresonancia pues los puntos de operación ferresonantes no sólo dependen de que la capacitancia sea pequeña sino también de la curva de saturación del transformador, pero en las simulaciones se observó que al aumentar la longitud de los cables, el sobrevoltaje también era mayor (cuando se presenta ferresonancia).
- En caso de que el sistema ya diseñado presente fallas continuas por ferresonancia, existen algunas medidas recomendadas como usar la conmutación controlada, o el uso de un resistor - capacitor snubber, ambos mencionados en la norma IEEE Std C57.142-2010.
- En caso de que el sistema de distribución subterráneo no cuente con apartarrayos, considerar instalarlos porque pueden ser una medida contra las sobretensiones por ferresonancia.
- Realizar un estudio del sistema en caso de que aparezca un síntoma ferresonante como los mencionados en el capítulo 3 y prestar mucha atención a los posibles síntomas.
- Conectar cargas resistivas, como menciona la norma IEEE Std C57.142-2010, ayuda a amortiguar los sobrevoltajes inducidos por ferresonancia así como las cargas inductivas.

5.3 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se recomienda la investigación sobre el uso y selección de apartarrayos para evaluar el riesgo de daño a este tipo de equipos de protección, debido a que como se menciona en la norma ANSI/IEEE Std C62.2-1978 [51], los sobrevoltajes por ferresonancia han sido responsables de dañar o destruir apartarrayos por ello no es sencillo seleccionarlos o simularlos.

Evaluar la ferresonancia en transformadores de potencial en SEP ya que es un fenómeno que también suele presentarse en estos transformadores de instrumento capacitivos donde incluso puede llegar a dañarlos dependiendo de la configuración o conexión de estos [41]. La norma IEC 60044-5:2004 [52] dedica unos párrafos a hablar sobre esto con más detalle.

Referencias

Referencias

- [1] T. Gönen, *Electric Power Distribution Engineering*, Third Edition ed., Florida: CRC Press, 2014.
- [2] R. E. y. Lara, *Sistemas de Distribución*, Primera edición ed., D.F.: LIMUSA, 1990.
- [3] *Programa de Desarrollo del Sistemas Eléctrico Nacional 2019-2033 (PRODESEN)*. Secretaría de Energía (SENER).
- [4] I. V. García, «Redes de distribución subterránea,» *Eléctrica la guía del electricista. Aura Solar 1 Energía Iluminada*, nº 65, p. 44, 2016.
- [5] CFE, «DOF,» 04 enero 2018. [En línea]. Available: <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5510072>. [Último acceso: 19 01 2020].
- [6] P.Boucherot, "*Existence de Deux Régimes en Ferrorésonance*", R.G.E, Diciembre 10, 1920, pp. 827-828.
- [7] J.Bethenod, "*Sur le transformateur et résonance*," L'Eclairae Electricque, Nov. 30,1907, pp. 289-296.
- [8] J.W.Butler y C. Concordia, «"Analysis of series capacitor application,"» *AIEE Trans.*, vol. 56, pp. 975-988, Agosto 1937.
- [9] R. Rudenberg, *Transient Performance of Electric Power Systems*, New York: McGraw-Hill , 1950.
- [10] C. Hayashi, *Nonlinear Oscillations in Physical Systems*, New York: McGraw-Hill, 1964.
- [11] A. K. S. Chaudhary, W. J. Giesbrecht, I. E. Hassan, A. J. F. Keri, K. C. Lee, J. A. Martinez, A. S. Morched, B. A. Mork, M. Parniani, A. Sharshar, D. Shirmohammadi, R. A. Walling, D. A. Woodford, «Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients—Part III: The Study of Ferroresonance,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 15, nº 1, 2000.
- [12] R. H. Hopkinson, «Ferroresonance during single-phase switching of 3-phase distribution transformer banks,» *IEEE Trans. PAS*, vol. 84, nº 4, pp. 289-293, Abril 1965.
- [13] D. R. Smith, S. R. Swanson y J. D. Borst, «Overvoltages with remotely-switched cable-fed grounded wye-wye transformers,» *IEEE Trans. PAS*, vol. 94, nº 5, pp. 1843-1853, Sept./Oct. 1975.
- [14] L. B. Crann y R. B. Flickinger, «Overvoltages on 14.4/24.9 kV Rural Distribution Systems,» *AIEE Transactions*, vol. 79, pp. 1208-1212, Septiembre 1956.

Referencias

- [15] G. G. Auer y A. J. Schultz, «An Analysis of 14.4/24.9 kV Grounded Wye Distribution System Overvoltages,» *AIEE Transactions*, Agosto 1954.
- [16] R. A. Walling, T. Compton, K. Barker y L. E. Zimmerman, «FERRORESONANT OVERVOLTAGES IN GROUNDED WYE-WYE PADMOUNT TRANSFORMERS WITH LOW-LOSS SILICON-STEEL CORES,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, nº 3, pp. 1647- 1654, Julio 1993.
- [17] G. W. SWIFT, «An analytical approach to ferroresonance,» *IEEE Trans.*, vol. 88, nº 1, pp. 42-46, 1969.
- [18] S. PRUSTY y M. RAO, «New method for determination of true saturation characteristics of transformem and nonlinear reactos,» *IEE Proc. C*, vol. 127, nº 2, pp. 106-110, 1980.
- [19] J. R. Marti y A. Soundack, «Ferroresonance in power systems : Fundamental solutions,» *IEE Proc. C*, vol. 138, nº 4, pp. 321-329, Julio 1991.
- [20] C. Kieny, G. L. Roy y A. Sbai, «FERRORESONANCE STUDY USING GALERKIN METHOD WITH PSEUDO-ARCLENGTH CONTINUATION METHOD,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, nº 4, pp. 1841-1847, Oct. 1991.
- [21] A. E. A. Araujo, A. C. Soundack y J. R. Marti, «Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour,» *IEE PROCEEDINGS-c*, vol. 140, nº 3, pp. 237-240, Mayo 1993.
- [22] B. Mork y D. Stuehm, «APPLICATION OF NONLINEAR DYNAMICS AND CHAOS TO FERRORESONANCE IN DISTRIBUTION SYSTEMS,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, nº 2, pp. 1009-1017, Abril 1994.
- [23] S. Mozaffari, S. Henschel y A. Soudack, «Chaotic ferroresonance in power transformers,» *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, nº 3, pp. 247-250, Mayo 1995.
- [24] R. Saravanaselvan, R. Ramanujam, K. Al-Anbarri y S. Naresh, «Ferroresonant oscillations in a transformer terminated line due to an energised parallel line on the same right-of-way,» *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, nº 4, pp. 475-481, Jul. 2005.
- [25] U. Karaagac, J. Mahseredjian y L. Cai, «Ferroresonance conditions in wind parks,» *Electric Power System Research*, vol. 138, Abril 2016.
- [26] D. A. N. Jacobcoson, «Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power Systems,» *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, p. 1212, 2003.
- [27] K. Laohacharoensombat, S. Jaruwattanadilok, K. Tuitemwong, C. Wattanasakpubal y K. Kleebmek, «Case Study of Ferroresonance in 33kV Distribution network of PEA Thailand,» de *TENCON IEEE Region 10 Conference*, Chiang Mai, Thailand, Nov. 2004.

Referencias

- [28] S. Ang, J. Peng y Z. Wang, «Identification of Key Circuit Parameters for the Initiation of Ferroresonance in a 400kV Transmission Systems,» de *International Conference on High Voltage Engineering and application*, New Orleans, L.A. USA, 2010.
- [29] P. E. Tippens, Física, conceptos y aplicaciones, 7a ed., Ciudad de México: Mc Graw Hill, 2011.
- [30] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, 6a ed., Madrid, España: Mc Graw Hill, 2008.
- [31] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, 5a ed., Ciudad de México : Mc Graw Hill, 2012.
- [32] J. J. Granier y J. William D. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, Mc Graw Hill, 1996.
- [33] T. Wildi, Sistemas de transmisión de potencia eléctrica, LIMUSA, 1991.
- [34] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, Second Edition ed., CRC Press, 2007.
- [35] L. M. Wedephol y D. J. Wilcox, «Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems: System Model and Wave-Propagation Characteristics,» *Proc. IEE*, vol. 120, nº 2, Feb. 1973.
- [36] O. Breien y I. Johansen, «Attenuation of Travelling Waves in Single-Phase High Voltage Cables,» *Proc. IEE*, vol. 118, nº 6, June 1979.
- [37] CONDUMEX, *Características de cables de energía de media y alta tensión*.
- [38] R. C. Dugan, M. F. M. Granahan, S. Santoso y H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, Mc Graw Hill.
- [39] F. C. D. L. Rosa, Harmonics and Power Systems, CRC, 2006.
- [40] R. P. Pineda, R. Rodrigues y A. A. Telléz, «Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 16, nº 2, pp. 460-466, Feb.2018.
- [41] P. Ferraci, «Ferroresonance,» *Cahier Technique*, nº 190, Groupe Schneider, March 1998.
- [42] R. Cetina, V. Torres y M. Madrigal, «Simulations of ferroresonance in transformers using ATP (Alternative Transient Program),» *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2018)*. Ixtapa, México, 2018.
- [43] A. Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, Second ed., John Wiley & Sons, INC.

Referencias

- [44] A. R. H. Trejo, "Análisis de Ferroresonancia en Sistemas de Distribución", Tesis que para obtener el título de ingeniero electricista, ESIME, Instituto Politecnico Nacional, CDMX, México, 2009.
- [45] D. A. N. Jacobson, «Field Testing, Modelling and Analysis of Ferroresonance in a High Voltage Power,» *Ph.D. dissertatio, Dept. Elect. And Comput. Eng. Univ. of Manitoba, Winnipeg. Canada*, 2000.
- [46] M. V. Escudero, I. Dudurych y M. A. Redfern, «Characterization of Ferroresonant Modes in HV Substation with CB Grading Capacitors,» de *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Montreal, Canada, 2005.
- [47] S. N. Rasban, *Chaotic dynamics of nonlinear systems*, Wiley, 1990.
- [48] D. Mairs, D. Stuehm y B. Mork, «Overvoltages on Five-Legged Core Transformers in Rural Electric Systems,» *IEEE Trans. on Industrial Applications*, vol. 25, nº 2, pp. 366-370, Marzo 1989.
- [49] D. M. a. D. S. R.D. Millet, *The Assessment and Mitigation Study of Ferroresonance on Grounded-Wye to Grounded-Wye 3-Phase Padmounted Transformers*, Summary Report: NRECA Project 86-7, Julio 1987.
- [50] "IEEE Guide to Describe the Occurrence and Mitigation of Switching Transients Induced by Transformers, Switching Device, and System Interaction," in *IEEE Std C57.142-2010*, vol., no., pp.1-56, 27 April 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5759579.
- [51] "IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems," in *ANSI/IEEE Std C62.2-1987*, vol., no., pp.0_1-, 1989, doi: 10.1109/IEEESTD.1989.122641.
- [52] "IEC 60044-5:2004 Intrumen transformers - Part 5: Capacitor voltage transformers", in *IEC 60044-5:2004*, vol., no., pp.143, 14 march 2004.
- [53] F. J. Peñaloza, *Curso LAPEM: Aplicación del programa ATP-EMTP en estudios de redes subterráneas y subestaciones encapsuladas*, Morelia, Michoacan.
- [54] CFE, «Construcción de sistemas subterráneos. Especificación CFE DCCSSUBT,» Enero 2015. [En línea]. Available: <https://lapem.cfe.gob.mx/normas/construccion/pdfs/T/DCCSSUBT.pdf>.
- [55] C. CABLES. [En línea]. Available: https://catalogo.condumex.com.mx/ficha/admin/ficha_vista.aspx?tipo=1&id=53. [Último acceso: Julio 2020].

Referencias

[56] V. T. Garcia, «Introducción al Magnetismo (Notas de clase),» Ciudad de México, Agosto, 2018.

[57] A. Akihiro, N. Naoto, B. Yoshihiro, O. Teruo y Y. Koichi, Power System Transients Theory and Applications, CRC, 2016.