

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS
PARA EL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS**

PRESENTADO POR:

CARDONA ELIAS, DAVID ENRIQUE
CARPIO GUIROLA JORGE ALBERTO
CONTRERAS DEL CID, MARVIN ORESTES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. CRISTÓBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS
PARA EL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN
SUBESTACIONES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS.**

Presentado por:

CARDONA ELIAS, DAVID ENRIQUE
CARPIO GUIROLA JORGE ALBERTO
CONTRERAS DEL CID MARVIN ORESTES

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNÁNDEZ

SAN SALVADOR, MAYO DE 2019

Trabajo de Graduación Aprobado por:

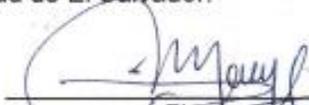
Docente Asesor:

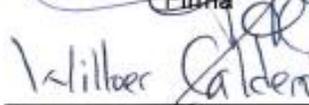
ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNÁNDEZ

ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 3 de mayo de 2019, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 3:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma


Firma



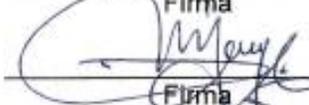
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

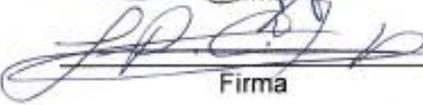
- ING. GERARDO MARVIN JORGE HERNANDEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN


Firma

- MSC. LUIS ROBERTO CHEVEZ PAZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS PARA EL ESTUDIO DEL FENÓMENO DE FERRORESONANCIA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS TRIFÁSICAS

A cargo del Bachilleres:

- CARDONA ELIAS DAVID ENRIQUE
- CARPIO GUIROLA JORGE ALBERTO
- CONTRERAS DEL CID MARVIN ORESTES

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.6

(Ocho punto seis)

AGRADECIMIENTOS

En este espacio, el cual nos permite expresar la gratitud que sentimos por haber culminado nuestra carrera de manera satisfactoria, quiero agradecer primero a Dios, por permitirme llegar hasta este punto de mi carrera, en el cual quedan atrás todos los problemas que surgieron a lo largo del proceso como estudiante universitario.

Agradezco a mis padres, Arnoldo Cardona y Milagro Elias de Cardona, por siempre confiar en mí a pesar de todo y nunca dejar de ayudarme, y aconsejarme a lo largo de todos estos años. También estoy agradecido sobremanera con mis tíos, primeramente, con Omar Turcios quien me impulso durante toda mi carrera y siempre estuvo ahí cuando lo necesite. Además, no puedo olvidarme de mi tía Olga Bonilla, la cual me ha ofrecido su guía y ayuda incondicional desde que comencé mi carrera, hasta el último día de la misma. Por todo esto les estoy agradecido infinitamente. También no puedo pasar por alto a mi abuela Ena Cardona, la cual siempre estuvo pendiente de mí a lo largo de todos estos años. Así como también a todos los familiares que de una u otra manera contribuyeron a que pudiera salir adelante en mi carrera.

A mis compañeros de tesis, Jorge Carpio y Orestes Contreras del Cid, les agradezco por haber me permitido realizar este documento junto a ellos. A Carpio le agradezco el no darse por vencido a pesar de todos los problemas que surgieron en el desarrollo de esta tesis, y que todo el esfuerzo que hicimos no fue en vano.

Finalmente, agradecer a todos los compañeros que tuve a lo largo de toda mi carrera universitaria. Pero, especialmente para aquellos compañeros que, hoy por hoy los considero mis amigos, con los cuales se han hecho más amigables todas las pruebas, alegrías, tristezas y todo lo que conlleva la vida universitaria. De estos amigos, agradezco especialmente a Noé Díaz con el cual pase toda mi carrera y quien, a pesar de todo, nunca me dio la espalda. Estevis Monge, amigo el cual conocí a mitad de la carrera, pero al cual le estaré agradecido por todo lo que ha hecho por mí, y por ser un verdadero amigo. Además, agradecer a todo el “cartón”, entre ellos a Joaquín Ramírez, Tony Alvarado y Samuel Granados, quienes han compartido todo lo que significa ser universitario, y a quienes le guardo aprecio, y espero que ellos también culminen sus estudios de la mejor manera.

David Enrique Cardona Elias

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar por permitirme la vida, la sabiduría y la fuerza para poder culminar mis estudios exitosamente, ya que a pesar de muchas dificultades que surgieron a lo largo del proceso académico, su espíritu me fue guiando y fortaleciendo para llegar a la meta propuesta.

Dedico este logro a mi familia por todo el apoyo que siempre me han brindado, especialmente a mi padre René Carpio y a mi madre María Magdalena de Carpio, los cuales me han motivado a seguir preparándome lo mejor que pueda, para hacer eficaces cada uno de sus esfuerzos.

También quiero agradecer a mis hermanos Julio Carpio, Flor Carpio, Cecilia Guirola y su familia, de igual manera a mi novia Maybelim Díaz y a su familia, por confiar en mí y brindarme su apoyo incondicional.

Gracias a los compañeros Tony Alvarado, Estevis Monge y Noé Ramírez, Samuel Granados, Stanley Vichez, Carolina Ramos, Nairobi Ventura, Santiago Palma, Marvin Orestes y David Cardona, por sus ánimos y colaboración a lo largo de todo el trabajo.

Agradezco a los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica Ing. Armando Martínez Calderón, Ing. Luis Roberto Chevez Paz, Ing. Gerardo Marvin Hernández, y también al personal administrativo la Sra. Reina Vides y los laboratoristas Sr. Posada y Sr. Juan Sánchez, por tener la disponibilidad y amabilidad en brindar la asesoría necesaria para resolver las dificultades que se tuvieron durante el desarrollo de este trabajo hasta su terminación.

Jorge Alberto Carpio Guirola.

MARVIN ORESTES CONTRERAS DEL CID

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por permitirme culminar esta etapa, ya que sin el nada soy y nada puedo hacer, agradezco por las personas que ha puesto y ha quitado de mi camino, por las dificultades y las bendiciones en mi vida y por la nueva etapa que inicia como profesional.

Agradezco a mis padres Héctor Contreras y Lilian del Cid por ser los dos principales pilares para poder seguir adelante, por su apoyo incondicional, por no dejarme solo ni un instante en esta lucha y acompañarme en cada etapa de mi vida. A mis abuelos Juan Merlos (QDDG) y Marta del Cid por todo su cariño, apoyo y palabras de aliento que fueron siempre motivación para seguir con mis estudios. A mi esposa Azucena Portillo por su apoyo incondicional, sus desvelos y su tiempo. A mi hija Lilian Contreras ya que ha sido gran parte de mi inspiración y motivo de lucha en esta etapa final de mis estudios. A mis hermanos Nelson, Wilmer, Héctor y Aldo contreras, mi primo Oscar Lizama, mi tío Carlos Cruz y toda la familia por su apoyo y comprensión, ya que todos me apoyaron en el momento que más los necesite.

A mis compañeros que se convirtieron en mis amigos y con los cuales compartí esta etapa de mi vida Jorge Carpio, David Cardona, Estevis Monge, Gustavo Paiz, Jimmy Herrera, Franklyn Alvarenga, Nairobi Ventura, Noé Díaz, Santiago Palma, Tony Alvarado, Walter Cardona, Joaquín Ramírez, José Herrera, Moisés Romero, Gerson Herrera, Enrique Cáceres y muchas personas más con las aprendí, crecí, lloré y reí en este proceso.

A mis profesores desde educación básicas hasta la universidad, especialmente a mi profesora de básica Niña Cata, mis profesores de bachillerato niña Delvia de Miranda y Miguel Rosa, y todos los Catedráticos de la escuela de ingeniería eléctrica, ya que ellos con su trabajo y esfuerzo me han guiado por el camino del aprendizaje.

DEDICATORIA

Primero a Dios, y luego a toda mi familia especialmente a mis padres Héctor Contreras y Lilian del Cid, mi esposa Azucena Portillo y mi hija Liliam Contreras.

Josué 1:9.

ÍNDICE

RESUMEN	20
OBJETIVO GENERAL.....	22
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
ALCANCES	23
ANTECEDENTES	23
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
JUSTIFICACIÓN	24
CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIÓN DE RESONANCIA Y FERRORESONANCIA EN CIRCUITOS RLC SERIE.....	25
1.0 Conceptos básicos	25
1.1 El fenómeno de Resonancia en una red RLC serie.....	45
1.2 Fenómeno de la ferresonancia en una red RLC serie.....	51
1.3 Principales características del fenómeno de la Ferresonancia.....	56
1.4. Tipos de régimen del fenómeno de la ferresonancia.....	59
LA FERRORESONANCIA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICOS.....	63
2.0 Topologías básicas que presentan riesgo de ferresonancia.....	66
2.1 Maniobras de interrupción en subestaciones trifásicas y formación de circuito ferresonante LC serie.....	68
2.1.1 Caso I. Subestación trifásica en delta, con una fase abierta.....	69
2.1.2 Caso II. Subestación trifásica en delta con dos fases abiertas.....	70
2.1.3 Caso III. Subestación trifásica en estrella con una fase abierta.....	72
2.1.4 Caso IV. Subestación trifásica en estrella con dos fases abiertas.....	73
2.2 Estudio de un caso real de ferresonancia en alimentador de transformadores de distribución tipo Pad-Mounted a 12.47 kV.....	75
DESARROLLO DEL MÓDULO PRUEBAS PARA CIRCUITOS FERRORESONANTES TRIFÁSICOS.....	79
3.0 Ensayos de transformadores monofásicos.....	79

3.1 Levantamiento de curva característica de magnetización de los transformadores.....	84
3.2 Determinación de la capacitancia critica de una subestación trifásica.....	88
3.3 Simulación de circuitos ferresonantes trifásicos en ATPDraw.....	95
3.3.1 Simulación de conexión Estrella-Estrella con una fase energizada $V_A= 120.4$ Vrms y capacitancias de $1.0 \mu\text{F}$	99
3.3.2 Simulación de conexión Estrella-Estrella con dos fases energizadas $V_A= 120.4$ Vrms, $V_B= 120.4$ Vrms, y capacitancias de $1.0 \mu\text{F}$	102
3.3.3 Simulación de conexión Delta-Estrella con una fase energizada con $V_A= 120.4$ Vrms y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$	105
3.3.4 Simulación de conexión Delta-Estrella con una fase energizada con $V_A= 120.4$ Vrms y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	108
3.3.5 Simulación de conexión Delta-Estrella con dos fases energizadas $V_A= 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, capacitancias de $2\mu\text{F}$	110
3.3.6 Simulación conexión Delta-Estrella con dos fases energizadas $V_A = 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	112
3.3.7 Simulación conexión Delta-Delta con una fase energizada $V_A= 120.0$ Vrms y capacitancias de $2\mu\text{F}$	115
3.3.8 Simulación conexión Delta-Delta con una fase energizada $V_A= 120.0$ Vrms y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	117
3.3.9 Simulación conexión Delta-Delta con dos fases energizadas $V_A= 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$	120
3.3.10 Simulación conexión Delta-Delta con dos fases energizadas $V_A= 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	122
3.4 Estimación de la subestación real que se pretende emular con el módulo de pruebas para circuitos ferresonantes.....	124
3.5 Factor de escalamiento de la subestación contra el módulo de pruebas.	126
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULO PARA CIRCUITOS FERRORESONANTES	
TRIFÁSICOS.....	127
4.0 Lista de materiales para implementar el módulo de pruebas.	127
4.1 Construcción de módulo de pruebas.	128
IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL FENÓMENO DE LA FERRORESONANCIA EN CIRCUITOS	
TRIFÁSICOS.....	132
5.0 Equipo y materiales utilizados	132
5.1 Pruebas realizadas y resultados obtenidos de los circuitos ferresonantes trifásicos.....	132

5.1.1 Conexión Delta–Estrella con capacitancia de 3.0 μ F.	133
5.2 Determinación de la longitud de cable equivalente por medio de las capacitancias utilizadas.	140
5.3 Ejemplo de escalamiento utilizando los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.	141
RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....	144
6.1 Recomendaciones	144
6.2 Conclusiones.....	148
REFERENCIAS.....	152
ANEXOS	153
A1. Código fuente de programa de cálculo de método grafico para calcular la relación X_c/X_m	153
A2. SOFTWARE PARA SIMULACION DE SISTEMAS DE POTENCIA ATP-EMTP.	155
A2.1 Estudio con ATPDraw de sobretensiones por maniobra de interruptores.....	157
A2.2 Simulación de transformador trifásico saturable en vacío utilizando ATPDraw.	159

ÍNDICE DE IMÁGENES.

Imagen 1.1. Núcleo de transformadores tipo seco (Fuente: http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1892)	27
Imagen 1.2. Transformador monofásico de distribución (Fuente: http://inatra.com/transformadores-monofasicos-distribucion/)	28
Imagen 1.3. Subestación trifásica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica.....	30
Imagen 1.4. Característica de magnetización de un material ferromagnético. [1].....	31
Imagen 1.5. Efecto del comportamiento de la permeabilidad magnética de un material magnéticamente saturado.....	32
Imagen 1.6. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético. [1]	33
Imagen 1.7. Corriente de magnetización [1].....	34
Imagen 1.8. Fuerza magnetomotriz inducida en una bobina. [1]	36
Imagen 1.9. Campo eléctrico de una línea monofásica de dos conductores. [2].....	38
Imagen1.10. Capas de material de un cable de media tensión monopolar (Fuente: https://www.topcable.com/blog-electric-cable/caracteristicas-constructivas-de-un-cable-de-media-tension/)	39
Imagen 1.11. Campo eléctrico de un cable monopolar apantallado.....	44
Imagen 1.12. Red eléctrica RLC serie.....	46
Imagen 1.13. Red RLC serie en función de los parámetros de resistencia y reactancias inductiva y capacitiva.....	46
Imagen 1.14. Diagrama fasorial de tensión y corriente para una Red RLC cuando $X_L > X_C$	48
Imagen 1.15. Diagrama fasorial de tensión y corriente para una Red RLC cuando $X_C > X_L$	49

Imagen 1.16. Diagrama vectorial de tensión y corriente para una Red RLC serie en resonancia, $X_C \approx X_L$.	51
Imagen 1.17. Red ferresonante RLC serie.	51
Imagen 1.18. Intersección de recta V_L con curva de magnetización del inductor para un valor pequeño de C. [4].	53
Imagen 1.19. Intersección de recta V_L con curva de magnetización del inductor para un valor grande de C. [4].	53
Imagen 1.20. Efecto del aumento de capacitancia C en el circuito ferresonante serie. [4].	54
Imagen 1.21. Puntos de trabajo posibles para el circuito magnético de un transformador. [4].	55
Imagen 1.22. Sensibilidad a los parámetros de la red y fenómeno de salto. [5].	56
Imagen 1.23. Sensibilidad a las condiciones iniciales. [5].	58
Imagen 1.24. Características del régimen fundamental. [5].	60
Imagen 1.25. Características del régimen subarmónico. [5].	61
Imagen 1.26. Características del régimen Casi-periódico. [5].	61
Imagen 1.27. Características del régimen caótico. [5].	62
Imagen 2.1. Circuito ferresonante trifásico. [6].	64
Imagen 2.2. Conexiones trifásicas susceptibles al fenómeno de ferresonancia. [6].	66
Imagen 2.3. a) Sistema trifásico en Delta con fase C abierta, b) Circuito simplificado con trayectoria LC.	69
Imagen 2.4. a) Sistema trifásico en Delta con fases B y C abiertas, b) Circuito simplificado con trayectorias LC serie.	71
Imagen 2.5. a) Sistema trifásico en Estrella con fase C abierta, b) Circuito simplificado con trayectoria LC serie.	72
Imagen 2.6. a) Sistema trifásico en Estrella con fases B y C abiertas, b) Circuito simplificado con trayectoria LC serie.	74
Imagen 2.7. Configuración típica de un sistema en estrella aterrizado. [7].	76
Imagen 2.8: Diseños del núcleo de transformadores. [7].	76

Imagen 2.9. a) Forma de onda de tensión y corriente en el transformador con capacitancia $C = 9 \mu\text{F}$ y $C = 10 \mu\text{F}$. [7].....	78
Imagen 3.1 Circuito para obtener la curva de magnetización del transformador. [3].....	85
Imagen 3.2. Curvas de magnetización a) Transformador T1, b) Transformador T2, c) Transformador T3.....	87
Imagen 3.3 Circuito simplificado LC de conexión trifásica en Delta con una fase energizada.....	89
Imagen 3.4. Salida del programa en Matlab, mostrando la variación de la tensión de línea abierta con respecto a tierra obtenida con el método aplicado.....	92
Imagen 3.5 Tabulación de datos de los cálculos realizados por el programa del método gráfico.....	93
Imagen 3.6. Parámetros de simulación para modelo de transformador saturable en ATPDraw.....	95
Imagen 3.7. Curva característica real del transformador ingresada al modelo de ATPDraw.....	96
Imagen 3.8. Accediendo al menu ATP para abrir ventana de configuración.....	98
Imagen 3.9. Ventana de configuración con parametros de configuración.....	98
Imagen 3.10 Esquema de simulación en ATPDraw para conexión Estrella - Estrella.....	99
Imagen 3.11. Gráfico de tensiones en el primario de los transformadores, simulación estrella – estrella con capacitancia 1.0 F.....	100
Imagen 3.12. Gráfico de señales de corriente, simulación estrella – estrella, una fase energizada.....	101
Imagen 3.13. Formas de onda en las capacitancias a tierra de 1.0 μF , conexión estrella – estrella.....	102

Imagen 3.14. Esquema de simulacion en ATPDraw de conexión estrella – estrella con dos fases energizadas.....	103
Imagen 3.15. Gráfico de tensión en la bobina primaria de cada transformador conexión estrella-estrella.....	103
Imagen 3.16. Gráfico de la corriente, simulación Estrella - Estrella, con dos fases conectadas.....	104
Imagen 3.17. Gráfico de tensiones en los capacitores conexión estrella – estrella con dos fases energizadas.....	105
Imagen 3.18. Esquema de simulación en ATP-Draw para conexión Delta–Estrella.....	105
Imagen 3.19. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta – Estrella, con una fase energizada y $C = 2.0\mu\text{F}$	106
Imagen 3.20. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, una fase energizada con $2.0 \mu\text{F}$	107
Imagen 3.21. Tensiones en capacitores de conexión Delta -Estrella con una fase y capacitancia de 2.0 uF	107
Imagen 3.22. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, una fase energizada con capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$	108
Imagen 3.23. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, una fase alimentada y capacitancia de $3 \mu\text{F}$	109
Imagen 3.24. Tensiones en capacitores conexión Delta – Estrella con una fase energizada y capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$	109

Imagen 3.25. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta - Estrella con dos fases energizadas.....	110
Imagen 3.26. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, dos fases energizadas y $C = 2.0 \mu\text{F}$	111
Imagen 3.27. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, dos fases energizadas y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$	111
Imagen 3.28. Tensiones en capacitores de conexión Delta - Estrella con dos fases y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$	112
Imagen 3.29. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, dos fases energizadas y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	113
Imagen 3.30. Señales de corriente para conexión delta – estrella, dos fases alimentadas y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	113
Imagen 3.31 Tensiones en capacitores de conexión Delta – Estrella, con dos fases energizadas y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$	114
Imagen 3.32. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta – Delta, con una fase energizada.....	115
Imagen 3.33. Gráfico de tensión en arrollamientos primarios, conexión Delta–Delta, una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$	116
Imagen 3.34. Señales de corriente para conexión Delta – Delta, una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$	116
Imagen 3.35. Formas de ondas en capacitores conexión Delta – Delta, con una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$	117
Imagen 3.36. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Delta, una fase energizada y capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$	118

Imagen 3.37. Señales de corriente para conexión Delta – Delta, una fase energizada y capacitancia de 3.0 μF	118
Imagen 3.38. Tensiones en capacitores de conexión Delta–Delta con una fase energizada y capacitancia de 3.0 μF	119
Imagen 3.39. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta – Delta, con dos fases energizadas y capacitancias $C= 2.0\mu\text{F}$	120
Imagen 3.40. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta-Delta, dos fases energizadas y capacitancias de 2.0 μF	121
Imagen 3.41. Señales de corriente para conexión Delta –Delta, dos fases energizadas y capacitancias de 2.0 μF	121
Imagen 3.42. Tensiones en capacitores, conexión delta - delta con dos fases energizadas y capacitancias de 2.0 μF	122
Imagen 3.43. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta-Delta, dos fases energizadas y capacitancias de 3.0 μF	123
Imagen 3.44. Señales de corriente para conexión Delta – Delta, con dos fases energizadas y capacitancias de 3.0 μF	123
Imagen 3.45. Tensiones en capacitores de conexión Delta –Delta con dos fases energizadas y capacitancia de 3.0 μF	124
Imagen 4.1. Gabinete del módulo sin pintura.....	129
Imagen 4.2 Acabado de pintura de tapa frontal.....	129
Imagen 4.3 Distribución interna de los componentes del módulo.....	130
Imagen 4.4. Tapa frontal con las conexiones y conectores de banana hembra.....	130
Imagen 4.5 Módulo de pruebas terminado.....	131
Imagen 4.6. Módulo de pruebas con conexión trifásica Estrella-Delta implementada	131

Imagen 5.1 Conexión primaria en Delta con una fase (Van) energizada.....	134
Imagen 5.2 Sobretensiones en los bornes primarios de los transformadores T1 y T3 (En por unidad) al momento de entrar en ferresonancia.....	135
Imagen 5.3 Comparación de la sobretensión experimentada en el capacitor línea a tierra C2, con respecto al capacitor de la línea energizada C1.....	136.
Imagen 5.4 Elevación súbita de la corriente de línea, al momento de entrar en ferresonancia el circuito delta – estrella con capacitancia de $3\mu\text{F}$	136
Imagen 5.5 Forma de onda del voltaje en el primario de los transformadores antes de la condición de saturación	137
Imagen 5.6. Forma de onda de corriente en condición no saturada para circuito Delta – Estrella con capacitancia $3.0\mu\text{F}$	137
Imagen 5.7 Forma de onda de tensión en el primario en condición de saturación para el circuito delta – estrella con $3.0\mu\text{F}$	138
Imagen 5.8 Forma de onda de corriente en condición de saturación con $V_s 90\text{V}$ para circuito delta – estrella con capacitancia $3\mu\text{F}$	139
Imagen 5.9 Armónico de tensión para circuito Delta – Estrella con capacitancia de $3\mu\text{F}$	139
Imagen 5.10 Forma de onda de voltaje en el primario conexión Estrella – Delta con capacitancia de $3.0\mu\text{F}$	140
Imagen 6.1 Modelo de transformador con carga en el secundario de $25\ \Omega$	144
Imagen A2.1. Esquema, para simular los circuitos resonantes monofásicos utilizando tres interruptores para simular un transitorio.....	158
Imagen A2.2. Resultado obtenido en ATPDraw, de la operación de un interruptor monofásico en un sistema eléctrico.....	159.

Imagen A2.3. Esquema dibujado en ATPDraw, para simular un transformador trifásico saturable en vacío.....	159
Imagen A2.4. Ventana para introducir los respectivos parámetros del transformador saturable en ATPDraw.....	160
Imagen A2.5. Ventana para introducir los datos de carga de la curva de magnetización del transformador saturable en ATPDraw.....	161
Imagen A2.6. Forma de onda de los voltajes trifásicos observados en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.....	161
Imagen A2.7. Forma de onda de las corrientes trifásicas observadas en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.....	162

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1 Valores de capacitancia calculados para cable XLPE. [3].....	45
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T ₁	79
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T ₂	81
Tabla 3.3. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T ₃	83
Tabla 3.4. Datos de la curva de magnetización para los transformadores monofásicos.....	86
Tabla 4.1 Lista de materiales para construir módulo de pruebas.....	128
Tabla 5.1 Datos experimentales de circuito Delta-Estrella utilizando capacitancia de 3.0 μ F.....	134
Tabla 5.2. Equivalente de valores de capacitancia en longitud de cable de potencia.....	141
Tabla 5.3 Escalamiento de los voltajes primarios, obtenidos en el laboratorio con un factor de 110.....	142
Tabla 5.4 Escalamiento de los voltajes de capacitancia a tierra, obtenidos con un factor de 110.....	143

RESUMEN

En el presente trabajo, se muestra el desarrollo e implementación de un módulo para el estudio del fenómeno de ferresonancia en subestaciones eléctricas trifásicas energizadas sin carga, considerando acometidas construidas con cables de potencia apantallado, tomando en cuenta las diferentes configuraciones del conexionado del banco de transformadores. Se describe el fenómeno a partir de la configuración de un circuito formado por la bobina de un transformador y una capacitancia en serie, el cual se forma mediante la apertura o cierre de uno o dos de los cortacircuitos de las fases de suministro de un sistema de distribución, abordando las conexiones trifásicas Estrella-Estrella, Estrella-Delta, Delta-Delta y Delta-Estrella, obteniendo en cada caso su respectivo circuito equivalente.

El diseño y desarrollo del módulo implica realizar una serie de simulaciones previas para cada una de las conexiones trifásicas en estudio, obteniéndose así el modelo real de cada transformador, mediante ensayos de laboratorio de vacío, cortocircuito, y la obtención de la curva característica de magnetización. Dicho modelo es ingresado en el software ATP-Draw para realizar las simulaciones con valores de capacitancia que permite la ocurrencia del fenómeno en la conexión trifásica.

El valor de esta capacitancia se determina de manera aproximada mediante la aplicación de un método gráfico que relaciona el método de cálculo de superposición de las componentes reales de las fuentes de alimentación, cuyo procedimiento se calcula implementando un código de programación en Matlab, determinándose valores de capacitancia de 1.0 μF para la conexión Estrella y de 2.0 μF y 3.0 μF para la conexión en Delta.

La construcción del módulo se realiza en un gabinete estructurado con lámina de hierro y elementos de circuito tales como: transformadores, capacitores, interruptores de palanca, cable eléctrico, fusibles de protección y borneras de conexión. Tiene un acabado de pintura en color amarillo y color gris, con una caratula impresa en vinil de alta calidad con la simbología de cada uno de los elementos de circuito.

Los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio, se muestran a partir de imágenes capturadas con el medidor Power Guide Dranetz 4400, y mediante gráficos de tablas con los valores de tensión y de corriente medidos en las terminales de cada elemento del circuito LC serie. Determinándose así, la ocurrencia del fenómeno de ferresonancia de tipo fundamental para los cuatro casos de las conexiones trifásicas analizadas, específicamente cuando son energizadas con una fase y sin carga conectada. También se ha verificado que al energizar la conexión trifásica con una carga equivalente al 10% de la capacidad total de la subestación, el fenómeno es mitigado considerablemente.

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar e implementar un módulo de pruebas controladas que permita observar el fenómeno de la ferresonancia en subestaciones eléctricas trifásicas, que son energizadas sin carga, en las cuales existe la posibilidad de formar circuitos inductivo capacitivo en configuración serie y que son propensas a desarrollar el fenómeno de la ferresonancia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el fenómeno de la ferresonancia para la configuración en serie, bobina de transformador y capacitancia en serie, determinando las condiciones en las cuales se produce el fenómeno, considerando las normativas internacionales vigentes.
- Efectuar simulaciones del fenómeno con software de análisis de circuitos eléctricos ATP-Draw.
- Diseñar un módulo de pruebas de ferresonancia para subestaciones trifásicas y la especificación técnica de sus componentes.
- Realizar pruebas de laboratorio que permitan determinar las topologías eléctricas en subestaciones trifásicas que son más susceptibles a sufrir el fenómeno de la ferresonancia.
- Elaborar manual de uso de módulo de pruebas de ferresonancia en subestaciones trifásicas y guía de laboratorio que permita el estudio del fenómeno.
- Establecer técnicas de mitigación del fenómeno en la operación de una subestación trifásica.

ALCANCES

Establecer la metodología para caracterizar la ferroresonancia como un fenómeno que se da en las topologías de las subestaciones trifásicas que pueden generar redes LC serie. Se desarrollará un módulo de pruebas, para el posterior estudio del fenómeno, estableciendo las recomendaciones para la prevención y las medidas a implementar para la mitigación del mismo.

ANTECEDENTES

Ya se han realizado algunos estudios sobre el fenómeno de la ferroresonancia, sin embargo, no se ha desarrollado un módulo de pruebas de laboratorio que permita evaluar las diferentes topologías que producen la ocurrencia de este fenómeno y su afectación en las subestaciones eléctricas trifásicas.

Es en ese sentido que el proyecto profundiza en el estudio del fenómeno, su análisis, y determinación de las topologías más susceptibles a la ferroresonancia, implementándolas a través del módulo de pruebas, creando así una herramienta didáctica que permite conocer el fenómeno y establecer medidas de mitigación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contar con un módulo de pruebas para el estudio de la ferresonancia en sistemas trifásicos energizados sin carga es de vital importancia, ya que este fenómeno puede ser destructivo para las unidades en que se presente y actualmente, no se tiene un conjunto de prácticas o procedimientos establecidos para observar este fenómeno en el país, inclusive la Universidad de El Salvador. Para esto será necesario detallar el fenómeno de manera exhaustiva, retomando estudios realizados en la Escuela de Ingeniería Eléctrica y revisar estándares que permitan regularizar el fenómeno, así como también los procedimientos aplicables que conlleven el estudio de la ferresonancia de manera didáctica.

JUSTIFICACIÓN

Dentro del proceso de formación es indispensable tener un conocimiento claro del fenómeno de la ferresonancia, en cuanto a su naturaleza y la manera en que se debe de abordar, para tener certeza de cualquier maniobra a ejecutar dentro de una instalación, donde se presente una topología de circuito inductivo capacitivo serie, susceptible al fenómeno de la ferresonancia. Por tal motivo es de mucha importancia que en la Escuela de Ingeniería Eléctrica cuente con un módulo de pruebas que permita desarrollar el fenómeno de la ferresonancia dentro de un ambiente controlado y en el que se pueda constatar de primera mano el tipo de topología de circuitos eléctricos que pueden desarrollar ferresonancia y de esta manera contribuir y asentar una base clara en el proceso de formación.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIÓN DE RESONANCIA Y FERRORESONANCIA EN CIRCUITOS RLC SERIE.

1.0 Conceptos básicos

El fenómeno de ferresonancia, se relaciona con el funcionamiento y características magnéticas de algunos elementos eléctricos básicos que forman parte en una subestación eléctrica, por lo que es importante mencionar sus principales aspectos para obtener una mejor comprensión del desarrollo del fenómeno en un circuito.

a) Transformador eléctrico.

El transformador eléctrico es una máquina capaz de convertir energía eléctrica de un cierto nivel de tensión, en energía eléctrica de otro nivel de tensión, a partir del principio de inducción magnética. Físicamente consiste de dos o más bobinas arrolladas en un mismo núcleo de material ferromagnético, ambas bobinas están aisladas eléctricamente, conectadas únicamente por el flujo magnético común que se establece en el núcleo. Los transformadores en función del tipo de tensión de alimentación pueden ser monofásico o trifásico.

El funcionamiento de un transformador inicia desde el momento en que éste es energizado y se describe de la siguiente manera, cuando se alimenta el bobinado primario de un transformador con una fuente de tensión senoidal, circulará una corriente I_p , la cual produce una fuerza magnetomotriz que causa que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno Φ_1 en el circuito magnético del transformador. El

flujo Φ_1 , al estar canalizado en el núcleo, induce en las espiras del bobinado secundario una fuerza electromotriz E_2 . Las espiras del bobinado primario también están bajo la influencia de Φ_1 , por lo tanto, en ellas se va a inducir una fuerza contra electromotriz E_1 , que se opone a la tensión de alimentación, dando como resultado una disminución de la intensidad de corriente I_p .

Al aplicar una carga al secundario del transformador, circula por él una intensidad de corriente I_s , la cual produce el flujo magnético Φ_2 , opuesto a Φ_1 , por lo tanto, reduce el flujo resultante en el núcleo, dando como resultado que la fuerza contra electromotriz disminuya y la intensidad de corriente I_p aumente. De esta manera se comprende cómo un aumento de la corriente en el secundario I_s provoca un aumento de la corriente en el primario I_p , sin que exista conexión eléctrica establecida entre ambos bobinados. Se cuentan con dos tipos de transformadores, los cuales están bien diferenciados por su forma constructiva, los cuales son transformadores secos y transformadores sumergidos.

Transformadores secos.

En los transformadores de tipo seco, el circuito magnético está aislado o recubierto con un material aislante seco, como por ejemplo el encapsulado de resina epoxi. La refrigeración se consigue por medio de la circulación del aire ambiente, sin líquido intermedio. Este tipo de transformador tiene la ventaja de no presentar ningún riesgo de fuga o contaminación. Sin embargo, requiere precauciones de instalación y mantenimiento tales como un local ventilado y eliminación del polvo. Algunos de estos equipos están provistos de sondas de detección que vigilan la temperatura interna del núcleo y bobinado, y permite la desconexión de la carga y de la

alimentación en caso de un exceso de temperatura debido a una falla a tierra en el circuito.

Algunos ejemplos de este tipo de máquinas son los transformadores secos de resina epoxi, transformador de núcleo toroidal, transformador de aire, transformador de piezoeléctrico y de núcleo envolvente.



Imagen 1.1. Núcleo de transformadores tipo seco con encapsulado en resina. Tomada de Electro Industria (2012). Transformadores aislados en resina, aceite y aire. Recuperado de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1892>

Transformadores sumergidos.

En este tipo de transformador el circuito magnético y los arrollamientos están sumergidos en un líquido aislante como el aceite. Este puede ser de tipo mineral, de silicona, o vegetal. La elección del aceite está vinculada al tipo de instalación y a la necesidad específica del usuario en caso de que se requiera garantías particulares en cuanto a impacto medioambiental o seguridad en caso de incendio.

Los arrollamientos primarios y secundarios de los transformadores en aceite se construyen en aluminio o cobre con aislamiento de los conductores de papel de celulosa pura o, para hilos de pequeño diámetro, de esmalte doble. Estos arrollamientos son de sección oval o circular y de tipo concéntrico, coaxiales en las columnas del núcleo.

Los transformadores pueden ser de tipo hermético, con colchón de aire, nitrógeno o con conservador. Conforme al nivel de tensión de servicio pueden ser trifásicos o monofásicos.

En las subestaciones elevadoras y reductoras se utilizan este tipo de transformadores, por lo que aplican para servicios de tensión trifásica y monofásica. En la *imagen 1.2* se puede observar un transformador monofásico de tipo sumergido.



Imagen 1.2. Transformador monofásico de distribución tipo sumergido en aceite. Inatra

Transformadores. Transformadores monofásicos de Distribución

<http://inatra.com/transformadores-monofasicos-distribucion/>

b) Subestación eléctrica.

Una subestación eléctrica es una instalación, o conjunto de dispositivos eléctricos, que forma parte de un sistema eléctrico de potencia, cuya principal función es la transformación, regulación y distribución de la energía eléctrica.

La subestación debe modificar y establecer los niveles de tensión de una infraestructura eléctrica, para que la energía eléctrica pueda ser transportada y distribuida, siendo el transformador el equipo principal de una subestación. Las subestaciones eléctricas pueden ser estaciones de transformación, con uno o varios transformadores que elevan o reducen la tensión; o subestaciones de maniobra permiten la interconexión de dos o más circuitos.

Una subestación elevadora se encarga de elevar el nivel de la tensión generada de media tensión a alta tensión, para poderla transportar mediante las líneas de transmisión. Mientras que una subestación reductora reduce el nivel de tensión de las líneas de transmisión para poder ser utilizado en las líneas de distribución, las cuales proporcionan a los usuarios un servicio de energía en media tensión y baja tensión.

Las subestaciones de distribución se clasifican de acuerdo al tipo de servicio proporcionado en el nivel de tensión, las cuales pueden ser trifásicas o monofásicas, en ambos casos se utilizan transformadores, siendo de tipo trifásico para el primero y de tipo monofásico para el segundo caso. Sin embargo, se puede crear un banco de transformadores monofásicos para crear una subestación trifásica, como se muestra en la *imagen 1.3*.



Imagen 1.3. Subestación trifásica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador.

c) Materiales ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes y se utilizan para el diseño y constitución de núcleos de los transformadores y máquinas eléctricas. En un transformador se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados, así como para disminuir la corriente de excitación necesaria para la operación del transformador.

En las máquinas eléctricas se usan los materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par.

Algunas de las principales propiedades de un material ferromagnético son:

- Permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando una elevada densidad de flujo magnético.
- Presentan una relación no lineal entre la densidad de flujo B y la intensidad magnética H .

- Tienen a magnetizarse fuertemente en la misma dirección del campo magnético en el que se encuentren inmersos.
- Presentan saturación e histéresis magnética.

d) Saturación magnética.

Es una de las propiedades de los materiales ferromagnéticos, la cual resulta más fácil de explicar mediante el grafico mostrado en la *imagen 1.4*, la cual se denomina característica de magnetización, y cada material magnético posee su propia característica de magnetización.

Observando el grafico, el lugar donde la curva se separa de la línea recta se conoce como la rodilla o punto de inflexión de la curva.

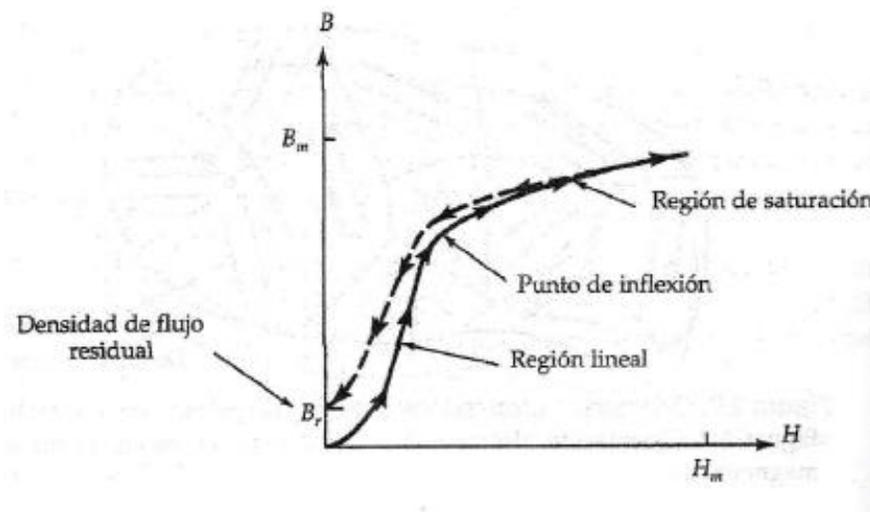


Imagen 1.4. Característica de magnetización de un material ferromagnético. Tomado de: Bhag S. Guru.

“Maquinas Eléctricas y Transformadores”, Tercera Edición 2003.

Conforme aumenta la intensidad de campo de magnetización externo H , el campo B en el material se vuelve más intenso a medida que más dipolos magnéticos se alinean con el campo B . Si se mide el campo B dentro del material, se notará que al principio se incrementa con

lentitud, luego con más rapidez, a continuación, muy lentamente otra vez y al final se estabiliza como lo indica la línea gruesa de la *imagen 1.4*. La saturación magnética ocurre conforme se avanza por encima de la rodilla y cualquier incremento posterior en H no provoca un aumento en B. Se dice que un material magnético está completamente saturado cuando su permeabilidad se vuelve casi la misma que la del vacío, esto se ilustra en la *imagen 1.5*.

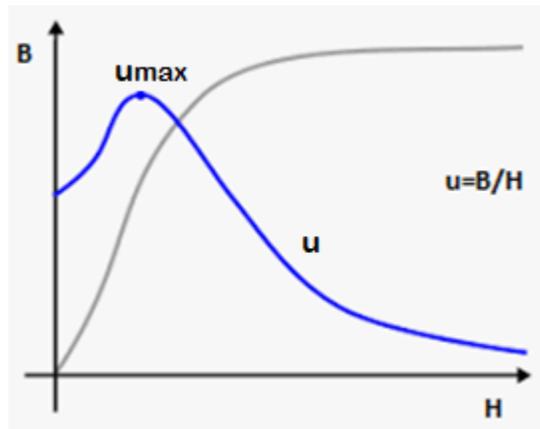


Imagen 1.5. Efecto del comportamiento de la permeabilidad magnética de un material magnéticamente saturado.

e) Histéresis magnética.

Cuando el núcleo de un material ferromagnético está sujeto a magnetización cíclica, con un flujo inicial igual a cero, el comportamiento de la característica de magnetización o curva de magnetización B-H experimenta cambios. La *imagen 1.6* muestra que cuando la curva B-H comienza a nivelarse, la densidad del flujo en el material magnético es máxima B_{max} y es cuando el material está saturado.

Al disminuir el campo H , la curva no se repite sobre su trazo previo, sino que sigue otra trayectoria, por tanto, indica que el campo B no decrece con la misma rapidez con la que creció. Esta irreversibilidad es lo que conoce como histéresis magnética, y simplemente significa que el campo B se atrasa con respecto al campo externo H .

Ahora cuando el campo H se reduce a cero, todavía existe en el material cierta densidad de flujo magnético, esto es llamado remanencia o densidad de flujo residual B_r , es decir que el material se ha magnetizado y actúa como un imán.

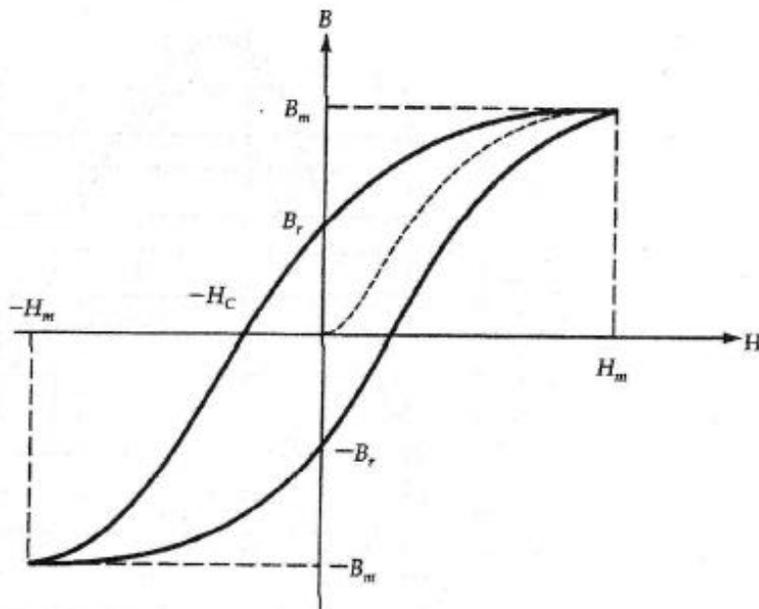


Imagen 1.6. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético.

Tomado de: Bhag S. Guru. "Maquinas Eléctricas y Transformadores", Tercera Edición 2003.

f) Corriente de magnetización.

Es la corriente requerida para producir el flujo magnético en el núcleo de un transformador.

Esta corriente se produce, al conectar una fuente de potencia de corriente alterna en el circuito

primario del transformador, dicha corriente fluye por este circuito, incluso si el circuito secundario del transformador se encuentra abierto.

La corriente de magnetización, está formada por dos componentes, la primera es la corriente de magnetización, encargada de producir el flujo en el núcleo del transformador, la segunda componente es la corriente de pérdida en el núcleo, requerida para compensar la histéresis y las pérdidas de corriente parásitas.

Si se conoce el flujo en el núcleo del transformador, entonces la magnitud de la corriente de magnetización se puede establecer directamente con base en la *imagen 1.7*.

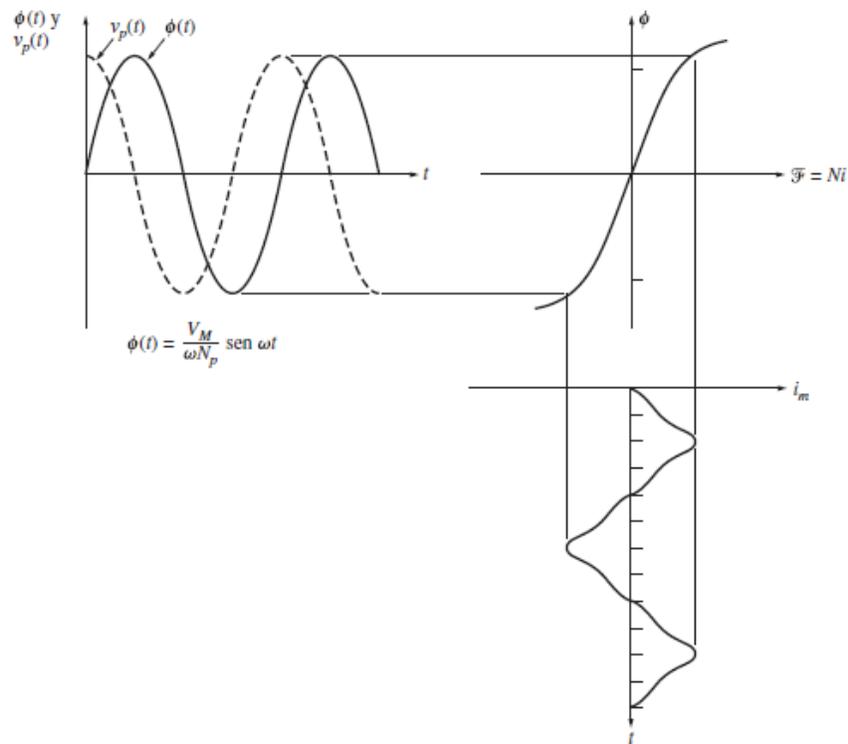


Imagen 1.7. Corriente de magnetización causada por el flujo en el núcleo del transformador.

Tomado de: Stephen J. Chapman. "Maquinas Eléctricas", Quinta Edición 2012.

De la imagen anterior se detallan los siguientes aspectos:

1. La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal. Los componentes de las frecuencias más altas en la corriente de magnetización se deben a la saturación magnética en el núcleo del transformador.
2. Una vez que el flujo pico alcanza el punto de saturación en el núcleo, un pequeño incremento en el flujo pico, requiere un gran aumento en la corriente de magnetización pico.
3. El componente fundamental de la corriente de magnetización atrasa 90° el voltaje aplicado al núcleo.
4. Los componentes de las frecuencias más altas en la corriente de magnetización pueden ser bastante grandes en comparación con el componente fundamental. En general, cuanto más fuerte sea el proceso de saturación en el núcleo, mayores serán los componentes armónicos.

g) Inductancia.

Es una magnitud física que está relacionada con el campo magnético que aparece alrededor de toda corriente eléctrica, dichas corrientes provocan fuerzas electromotrices y éstas se realizan sobre el mismo conductor que las produce o sobre otro conductor que está cerca. Si dicha fuerza se realiza sobre el mismo conductor que provocó el campo magnético, entonces se denomina autoinductancia, y si es sobre otro conductor distinto se le llama inductancia mutua.

Por tanto, para definir matemáticamente la inductancia, es necesario considerar un circuito magnético, como el que se muestra en la *imagen 1.8*. En ella se observa que una corriente cambiante en la bobina establece un flujo magnético ϕ cambiante, en el material magnético.

El flujo magnético induce una fuerza electromotriz e , establecida por la ley de Faraday y determinada por,

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

donde ϕ es el flujo inducido y N el número de vueltas en la bobina.

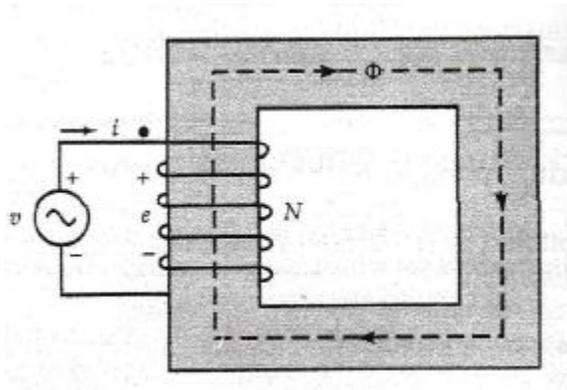


Imagen 1.8. Fuerza magnetomotriz inducida en una bobina. Tomado de: Bhag S. Guru. "Maquinas Eléctricas y Transformadores", Tercera Edición 2003.

En vista de que el flujo magnético ϕ depende del campo magnético y éste último es función de la corriente eléctrica que lo produjo, entonces el flujo ϕ también depende de la corriente. Por lo tanto, la fuerza electromotriz inducida también puede expresarse de la siguiente manera:

$$e = -N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} \quad (1.2)$$

A partir de la ecuación anterior se define la inductancia como el número de vueltas N de la bobina por la razón de cambio del flujo magnético ϕ con respecto a la corriente, se representa por la letra L y se mide en henrios [H]. Es decir,

$$L = N \frac{d\Phi}{di} \quad (1.3)$$

Físicamente la inductancia L representa la oposición que presenta el circuito a la variación de la corriente que circula por el mismo.

También es posible definir la inductancia con respecto a la permeabilidad magnética del material a partir de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{N^2 A}{\ell} \frac{dB}{dH} = \frac{N^2 A}{\ell} \mu \quad (1.4)$$

Donde N es el número de espiras de la bobina, A es la sección transversal del material magnético, ℓ es la longitud media de la trayectoria magnética y $\frac{dB}{dH}$ es la permeabilidad magnética μ del material magnético.

A partir de la ecuación (1.4), resulta evidente que la inductancia L depende de las dimensiones físicas del circuito magnético y de la permeabilidad magnética del material. Si la bobina esta devanada sobre un material no magnético, la inductancia es constante. Pero si el núcleo de la bobina está constituido por un material de tipo ferromagnético, entonces la inductancia L no es constante, sino una función de la densidad del flujo magnético en el núcleo y en consecuencia el valor de L será variable.

h) Capacitancia

La capacitancia es la capacidad de un componente o circuito, para recoger y almacenar energía en forma de carga eléctrica, es una medida de la cantidad de energía almacenada para una diferencia de potencial dada. Matemáticamente se expresa con la ecuación (1.5), indicando la relación entre la carga eléctrica de cada conductor Q y la diferencia de potencial aplicada V .

$$C = \frac{Q}{V} \quad [\text{F}] \quad (1.5)$$

Cuando se tiene una diferencia de potencial aplicada V entre dos conductores con un extremo abierto como lo muestra la *imagen 1.9*, los conductores adquieren una carga eléctrica q , la cual es proporcional a la diferencia de potencial aplicada y a la capacitancia C ; entonces se crea un campo eléctrico asociado a las cargas de cada uno de los conductores, por lo que la línea se comporta como un capacitor, siendo los conductores las placas del capacitor y el dieléctrico el aire u otro medio aislante que separa los conductores, por lo tanto, la capacitancia de una línea eléctrica es función de la naturaleza del dieléctrico.

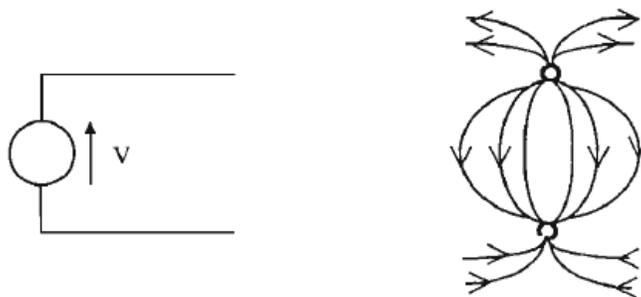


Imagen 1.9. Campo eléctrico de una línea monofásica de dos conductores. Tomada de Tesis de grado: Bayardo Raúl Villamarin Granda (2000). Programa computacional didáctico para el Cálculo de Parámetros en Líneas y redes de Distribución Aéreas y Subterráneas.

i) Cables para media tensión apantallado.

Los cables para media tensión pueden ser unipolares o multipolares, los primeros están constituidos por un conductor aislado que es casi siempre de sección circular (cable unipolar), llevando alrededor los correspondientes aislamientos y recubrimientos protectores que sean necesarios con el fin de evitar corrosión o daños mecánicos.

Los cables multipolares se conforman por dos o más conductores independientes y aislados entre sí, todo el conjunto se complementa con una cubierta aislante, pantalla electrostática, recubrimiento contra corrosión y efectos químicos, y más externamente armaduras metálicas destinadas a resistir los esfuerzos mecánicos que pudieran presentarse. La *imagen 1.10* muestran la constitución interna de estos cables.

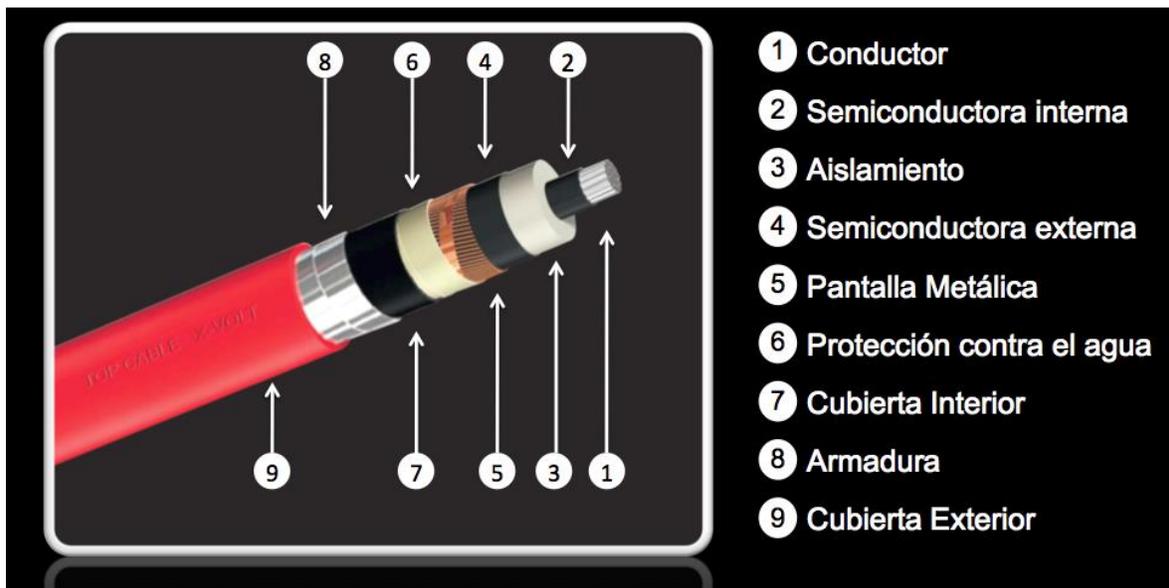


Imagen 1.10. Capas de materiales que componen un cable de media tensión monopolar. Tomado de TopCable MKT. (2016). Características constructivas de un cable de Media Tensión. Recuperado de <https://www.topcable.com/blog-electric-cable/caracteristicas-constructivas-de-un-cable-de-media-tension/>

A continuación, se describe brevemente cada una de las partes que componen este tipo de cable:

1. Conductor.

Es el elemento central, cuyo propósito es el de transportar la corriente eléctrica. Posee una sección circular y están constituidos por alambres en capas concéntricas hechas de cobre o aluminio de alta pureza.

2. Pantalla semiconductor interna.

Recubre totalmente el conductor. Su función es mejorar la distribución del campo eléctrico en la superficie del conductor para obtener una superficie equipotencial uniforme, a la cual, las líneas de fuerza del campo eléctrico sean perpendiculares, eliminando las distorsiones del campo eléctrico debidas a las protuberancias constituidas por los hilos, además de evitar la formación de hosquedades o burbujas de aire que, al estar sometidos a una diferencia de potencial provocaría la ionización del aire, con el consiguiente deterioro del aislante.

Se realiza con compuestos poliméricos con alta concentración de negro de humo para obtener la propiedad semiconductor. Este material está reticulado y totalmente adherido al aislamiento.

3. Aislamiento.

Es el componente crítico del cable, ya que ha de soportar el elevado campo eléctrico presente en el interior. La tensión máxima que puede soportar un cable depende del material y del espesor del aislamiento, que aumenta con la tensión asignada del cable.

El aislamiento está compuesto de material no conductor o dieléctrico, aplicado sobre la capa semiconductor, con el fin de limitar el campo eléctrico desde su valor máximo, en su capa más interna, hasta su valor mínimo, en su capa más externa. La función del aislamiento es confinar la corriente eléctrica en el conductor, contener el campo eléctrico dentro de su masa y dar la rigidez dieléctrica necesaria para la operación normal del cable, donde la rigidez dieléctrica se define como la capacidad del aislamiento para soportar la tensión nominal del cable sin que este se deteriore.

Los materiales utilizados en los aislamientos de cables de Media Tensión son los siguientes:

Polietileno reticulado (XLPE)

Etileno-Propileno de alto módulo (HEPR)

Etileno-Propileno (EPR)

4. Pantalla semiconductor externa.

Es la capa que recubre totalmente el aislamiento, está formada por un material semiconductor compatible con el material del aislamiento ubicada en contacto inmediato con éste. Su principal función es crear una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos en dirección de la máxima resistencia del aislamiento.

Los cables de energía, bajo un potencial aplicado quedan sometidos a esfuerzos eléctricos radiales, tangenciales y longitudinales. Los esfuerzos radiales siempre están presentes en el aislamiento del cable energizado, el aislamiento cumplirá su función de forma eficiente si los esfuerzos eléctricos se distribuyen uniformemente.

5. Pantalla metálica.

Los cables de media tensión llevan una pantalla metálica en contacto con la semiconductora externa. Esta pantalla está constituida por fibras de cobre colocadas en hélice recubriendo uniformemente todo el perímetro del cable. Su función principal es confinar totalmente el campo eléctrico en el interior del aislamiento evitando la formación de superficies de descargas peligrosas en la periferia del cable. La pantalla sirve también para proteger el cable contra potenciales inducidos por campos eléctricos externos y como protección para el personal, contra riesgos de descargas accidentales, la cual es efectiva solo si la pantalla del cable es conectada a tierra.

6. Protección contra el agua.

En cables con obturación longitudinal, se coloca bajo la cubierta una cinta de material higroscópico, que impide la propagación longitudinal del agua.

7. Cubierta interior.

Todos los cables armados llevan una cubierta de separación entre la pantalla metálica y la armadura, esta cubierta interna es del mismo material que la cubierta exterior.

8. Armadura.

La armadura se utiliza para mejorar la protección del cable frente a agresiones mecánicas externas como golpes y roces. Las armaduras están constituidas por alambres o flejes metálicos dispuestos sobre la cubierta interior. El metal utilizado en cables unipolares es el aluminio.

9. Cubierta exterior.

Ésta es la capa más externa del cable y protege al cable de las agresiones mecánicas y químicas del entorno. Los materiales utilizados normalmente son el PVC.

j) Capacitancia del cable de media tensión apantallado.

Una característica importante de los cables de Media Tensión, es la rigidez dieléctrica del material aislante, la cual indica el valor de la intensidad de campo eléctrico al que hay que someterlo para que se produzca una perforación del aislamiento.

En un cable donde se tiene un conductor cilíndrico con una cubierta semiconductor, el aislamiento dispuesto alrededor del conductor, una pantalla metálica colocada sobre el aislamiento, conectada a tierra y por un forro o cubierta protectora. El campo eléctrico tiene una disposición radial; las líneas de fuerza del campo eléctrico emanan radial y uniformemente del conductor y terminan en la pantalla metálica.

La capacitancia de un cable es directamente proporcional a la constante dieléctrica de su aislamiento. El conductor del cable que se encuentra al potencial de la línea, constituye una de las placas, la otra placa sería la pantalla metálica que está conectada a tierra y el aislamiento del cable es el dieléctrico del condensador, en la *imagen 1.11* se muestra la disposición del campo eléctrico en el interior del cable de media tensión.

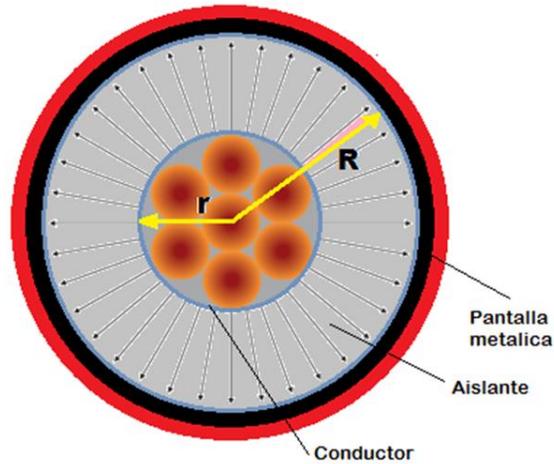


Imagen 1.11. Campo eléctrico de un cable monopolar apantallado.

Por lo tanto, la capacitancia a tierra en el cable de media tensión está dada por la ecuación

(1.6):

$$C_n = \frac{0.02413 * k}{\log_{10} \frac{R}{r}} \left[\frac{\mu F}{\text{km de cable}} \right] \quad (1.6)$$

Donde:

K: es la constante dieléctrica del aislamiento.

r: es el radio exterior del conductor.

R: el radio exterior del aislamiento.

La reactancia capacitiva a tierra se determina mediante la ecuación (1.7) :

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C_n} \quad [\Omega * km] \quad (1.7)$$

La tabla 1.1 mostrada a continuación, muestra algunos valores calculados de capacitancia para cable de Media Tensión XLPE con permitividad relativa de 2.28 para distintos calibres.

CABLE SUBTERRANEO DE DISTRIBUCION -15KV- TIPO URD						
AWG Ó KCMIL	No. De conductores	a (Pulg.)	b (Pulg.)	Permitividad en vacío	Permitividad relativa	Capacitancia (μF/Km)
175 mils de aislamiento nominal XLPE – 100% de nivel de aislamiento						
2	1	0.479	0.654	8.850E-12	2.28	0.407
2	7	0.504	0.679	8.850E-12	2.28	0.425
1	1	0.510	0.685	8.850E-12	2.28	0.429
1	19	0.543	0.718	8.850E-12	2.28	0.453
1/0	1	0.546	0.721	8.850E-12	2.28	0.456
1/0	19	0.583	0.758	8.850E-12	2.28	0.483
2/0	19	0.627	0.802	8.850E-12	2.28	0.515
3/0	19	0.677	0.852	8.850E-12	2.28	0.551
4/0	19	0.733	0.908	8.850E-12	2.28	0.592
250	37	0.791	0.966	8.850E-12	2.28	0.634
350	37	0.894	1.069	8.854E-12	2.28	0.709
500	37	1.022	1.197	8.854E-12	2.28	0.801
750	61	1.209	1.384	8.854E-12	2.28	0.937
1000	61	1.358	1.533	8.854E-12	2.28	1.045

Tabla 1.1 Valores de capacitancia calculados para cable XLPE de diferentes calibres AWG. Tomada de Tesis de grado: Miguel Parada, Amílcar Barrientos, Eliezer Pasasin. (2015). “Estudio y Evaluación del Fenómeno de Ferroresonancia en Subestaciones Eléctricas de Distribución”.

1.1 El fenómeno de Resonancia en una red RLC serie.

La resonancia es un fenómeno físico importante, que se describe como la condición existente en un sistema cuando una función forzada senoidal de amplitud fija produce una respuesta de amplitud máxima. Este fenómeno puede ocurrir en una red eléctrica que involucra elementos de resistencia, capacitancia e inductancia, conectados en serie como se muestra en la imagen 1.12. Y se caracteriza por colocar en fase los parámetros de tensión y corriente del circuito. La resonancia aparece en redes RLC lineales y no lineales, considerando para esta última, la característica no lineal de los inductores cuyos núcleos están contruidos con materiales magnéticamente saturables.

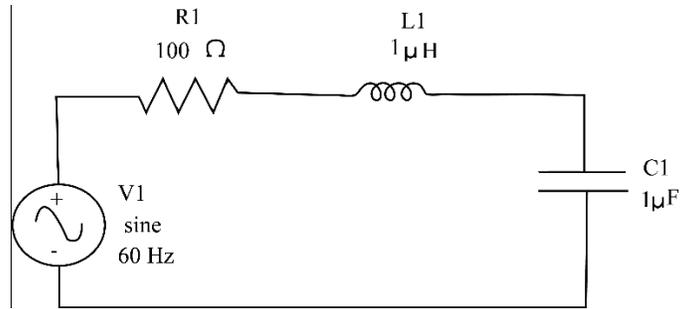


Imagen 1.12. Red eléctrica RLC serie.

La imagen 1.13, se muestra un circuito RLC serie en términos de resistencia R , la reactancia inductiva X_L debida a una inductancia L y la reactancia capacitiva X_C atribuida a la capacitancia C .

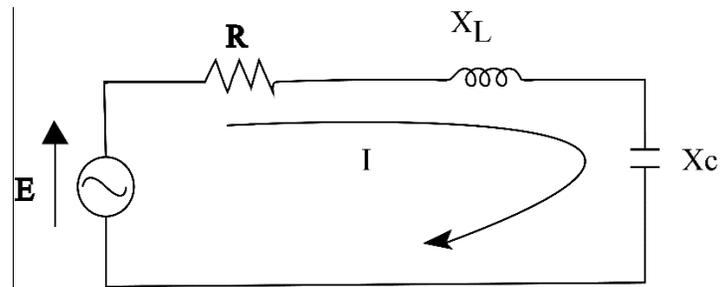


Imagen 1.13. Red RLC serie en función de los parámetros de resistencia y reactancias inductiva y capacitiva.

En resonancia lineal los valores de las impedancias representadas por los componentes de la red son predecibles. Aplicando la ley de tensión de Kirchhoff se resuelve el circuito de la imagen 1.13, cuya solución corresponde a la ecuación (1.8) y (1.9).

$$E = R * I + jX_L * I - jX_C * I \quad (1.8)$$

$$I = \frac{E}{R + jX_L - jX_C} \quad (1.9)$$

Las magnitudes de las reactancias de cada elemento de la red están establecidas por las ecuaciones (1.10) y (1.11)

$$X_C = \frac{1}{\omega * C} \quad (1.10)$$

$$X_L = \omega * L ; \quad (1.11)$$

Donde $\omega = 2 * \pi * f$, la cual es la frecuencia de la tensión y de la corriente con formas de onda senoidales. La magnitud de la impedancia total de la red mostrada en la *imagen 1.13*, está determinada por la ecuación (1.12), aplicando los valores de la resistencia R y de las reactancias capacitiva e inductiva se tiene:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} ; \quad (1.12)$$

De acuerdo a las ecuaciones (1.10) y (1.11) se observa que la reactancia inductiva es proporcional a la frecuencia, mientras que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir que disminuye con los aumentos de frecuencia.

Por lo tanto, las redes convencionales RLC serie como la mostrada en la *imagen 1.13*, tienden a ser resonantes cuando la reactancia inductiva X_L se iguala con la reactancia capacitiva X_C , es decir $X_L = X_C$, o lo que es lo mismo $\omega * L = \frac{1}{\omega * C}$, y la caída de tensión en L y en C son iguales y directamente opuestas, esto ocurre a una frecuencia específica denominada frecuencia de resonancia f_0 , ecuación (1.13).

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \quad (1.13)$$

Considerando despreciables los parámetros disipativos del circuito, debidas a las perdidas en el devanado y la parte resistiva en la capacitancia por perdidas dieléctricas, se pueden dar dos condiciones importantes en función del componente predominante en el circuito RLC serie:

a) Circuito RLC serie con $X_L > X_C$

La primera condición a analizar se da cuando $X_L > X_C$, el efecto se muestra en el diagrama de la *imagen 1.14*, a partir de las tensiones generadas en cada elemento, debidas a una tensión E aplicada al circuito.

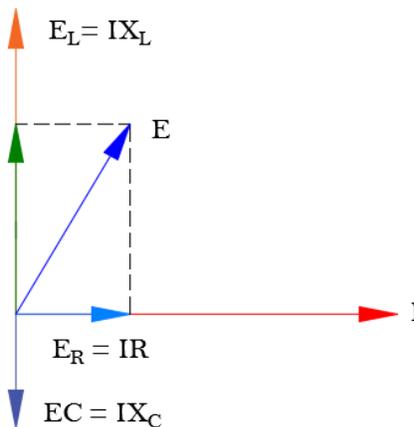


Imagen 1.14. Diagrama fasorial de tensión y corriente para una Red RLC cuando $X_L > X_C$.

Por ser un circuito RLC serie, la corriente I es la misma a través de todos los elementos que lo forman, por tanto, se ubica en el eje de referencia. La resistencia R es de magnitud pequeña comparada con las reactancias capacitiva e inductiva y como ya se sabe, su caída de tensión E_R voltios estará en fase con el fasor de la corriente I .

La caída de tensión en la reactancia inductiva $E_L = I * X_L$ voltios, está en adelanto 90° con respecto a la corriente. Y la tensión en la reactancia capacitiva $E_C = I * X_C$ voltios, está en atraso 90° con respecto a la corriente. En vista de que $X_L > X_C$, E_L es mayor que E_C , de manera que se obtiene una diferencia de tensiones $IX_L - IX_C$, la cual se suma con la caída de tensión en la resistencia E_R , que da como resultado la tensión de alimentación E del circuito. Entonces se dice que la corriente I queda en atraso a la tensión E , en un ángulo θ y en el circuito predomina el elemento inductivo.

b) Circuito RLC serie con $X_C > X_L$

Cuando se reduce el valor de la capacitancia C en el circuito, el valor de X_C se hace mayor según la ecuación (1.10), de manera que X_L es menor con respecto a X_C , como se observa en la imagen 1.15.

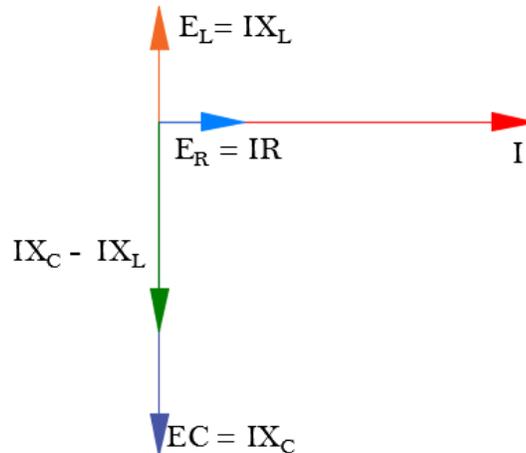


Imagen 1.15. Diagrama fasorial de tensión y corriente para una Red RLC cuando $X_C > X_L$.

En este caso se ha considerado despreciable el valor de la resistencia, aunque en circuitos reales siempre existe un valor de R al menos pequeño, esta consideración se ha hecho para

ver más claro el efecto producido en el circuito, y es que la tensión E se ha movido -90° , es decir que la corriente está en adelanto 90° respecto a la tensión E, predominando en el circuito el elemento capacitivo.

Fuera de los dos casos vistos anteriormente, se da el fenómeno de la resonancia, en el cual las reactancias capacitiva e inductiva se igualan, es decir $X_L = X_C$, y en vista de que éstas están desfasadas 180° , la impedancia total del circuito se verá reducida drásticamente al valor de la resistencia R.

La corriente total que circula por el circuito también se verá modificada en magnitud, de manera que la ecuación (1.6) se convertirá en la ecuación (1.14)

$$I = \frac{E}{R} \quad (1.14)$$

Bajo esta condición la corriente I, es limitada únicamente por la resistencia R del circuito, si el valor de R es bajo, la magnitud de esta corriente puede llegar a ser muy grande, creando sobretensiones en los bornes de la inductancia $V_L = I * X_L$ y de la capacitancia $V_C = I * X_C$, las cuales están desfasadas 180° entre sí.

Con un valor fijo de resistencia R, la corriente limitada por ella se convierte en un máximo. Esta corriente se coloca en fase con la tensión de alimentación E, indicando una situación de resonancia como lo muestra el diagrama de la *imagen 1.16*.

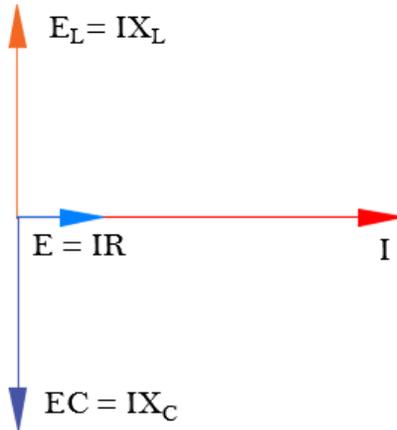


Imagen 1.16. Diagrama vectorial de tensión y corriente para una Red RLC serie en resonancia, $X_C \approx X_L$.

1.2 Fenómeno de la ferresonancia en una red RLC serie.

La ferresonancia se considera un caso especial de la resonancia en serie, que se desarrolla en circuitos como el mostrado en la *imagen 1.17*, en el cual la resistencia R se considera despreciable y los valores de las reactancias capacitiva X_C e inductiva X_L son cercanas, y por tener signos opuestos, generan una reducción en la impedancia total vista por la fuente, provocando así corrientes de elevada magnitud que pueden causar la desconexión del circuito o causar tensiones elevadas en los bornes de la capacitancia e inductancia.

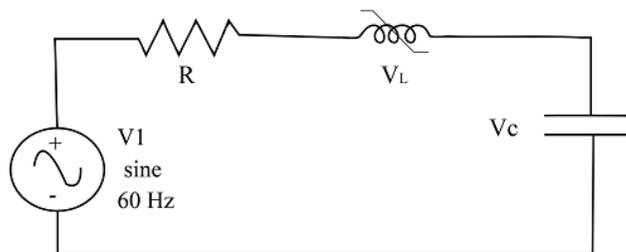


Imagen 1.17. Red ferresonante RLC serie.

Para comprender el fenómeno de ferresonancia en una red RLC, se debe tener en cuenta que este fenómeno guarda similitud con la condición de resonancia previamente analizada

para un circuito RLC serie, donde estos tres parámetros se consideran constantes y por lo cual el circuito era lineal.

Sin embargo, en un circuito ferresonante existe un punto esencial que marca la diferencia respecto a ambos fenómenos y se debe a la característica no lineal del material ferromagnético con el cual está hecho el núcleo del inductor. Esto es importante ya que mediante esta propiedad es posible analizar el comportamiento de la reactancia de un transformador por el hecho de tener un núcleo de material ferromagnético saturable.

Tomando despreciable el valor de la resistencia R, se obtienen las ecuaciones que describen el circuito de la *imagen 1.17*.

$$E = V_L + V_C \quad (1.15)$$

$$V_C = -j \frac{1}{\omega * C} * I \quad (1.16)$$

$$V_L = E + j \frac{1}{\omega * C} * I \quad (1.17)$$

La ecuación (1.17) corresponde a una recta con pendiente igual a $\frac{1}{\omega * C}$ que corta el eje V en el valor de la tensión E, esta recta representa el efecto combinado de la de la fuente y la capacitancia.

En vista de que la relación entre la tensión y corriente para un inductor ferromagnético está dada de manera similar mediante la curva característica de magnetización, entonces el punto de operación para del circuito estará dado por la intersección con la recta V_L , como se muestra en la imagen 1.18

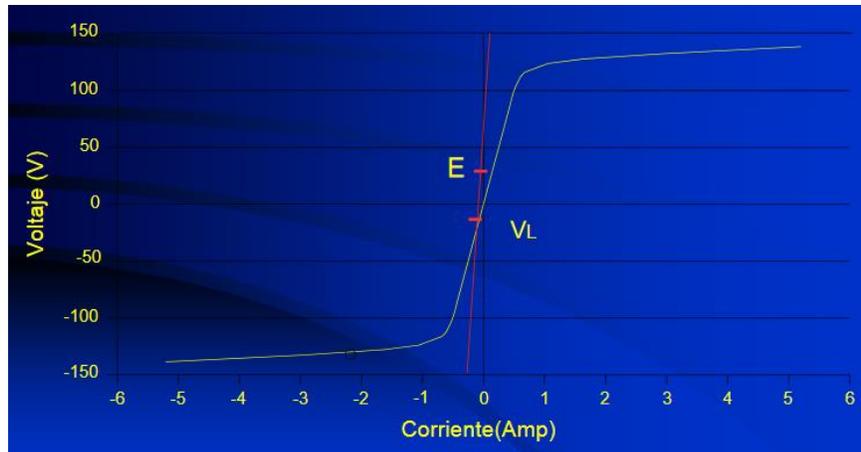


Imagen 1.18. Intersección de recta V_L con curva de magnetización del inductor para un valor pequeño de C .

Tomado de: Guillermo Aponte M. "La ferroresonancia en transformadores de Distribución".

Puede notarse que cuando el valor de la capacitancia C es pequeño, la pendiente de la recta es grande, y el valor resultante para V_L también es pequeño y muy cercano al valor de la tensión de la fuente E . Pero, si el valor de la capacitancia C es grande, la recta adquiere un menor valor de pendiente, de manera que el valor resultante para V_L aumenta considerablemente. En la imagen 1.19 se observa el comportamiento de V_L conforme cambian los valores de la reactancia capacitiva.

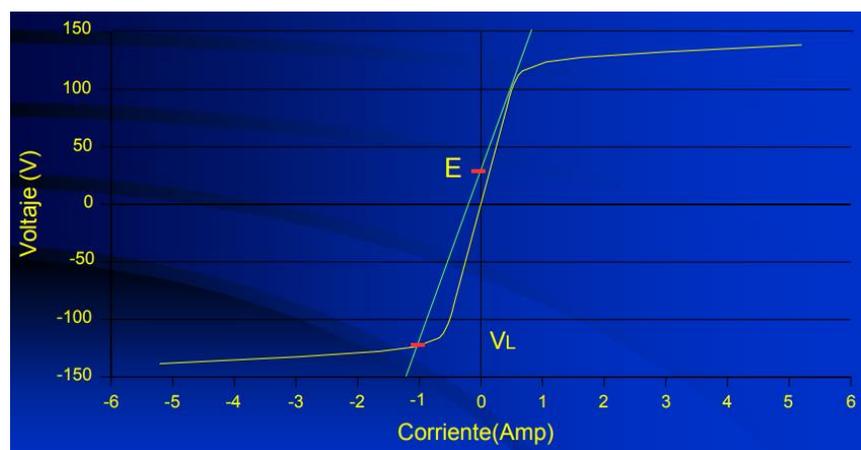


Imagen 1.19. Intersección de recta V_L con curva de magnetización del inductor para un valor grande de C .

Tomado de: Guillermo Aponte M. "La ferroresonancia en transformadores de Distribución".

Es importante notar que la recta gira alrededor del punto E de tensión de la fuente, por lo que a medida que cambian los valores de la capacitancia C solo existirá un cambio en la pendiente de la misma. En la *imagen 1.20* puede apreciarse este efecto, y además se muestra que existe un amplio rango de variación de capacitancia para el cual puede desarrollarse ferresonancia.

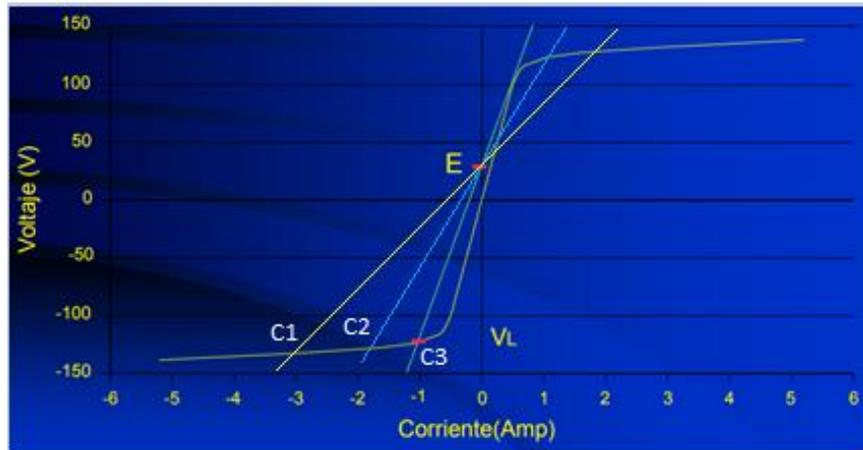


Imagen 1.20. Efecto del aumento de capacitancia C en el circuito ferresonante serie. Tomado de: Guillermo Aponte M. "La ferresonancia en transformadores de Distribución".

En la *imagen 1.21*, se observan que, para una capacitancia dada, se tienen tres puntos de intersección con la curva de magnetización denominados A, B, C. Estos corresponden a los tres puntos posibles de operación para el circuito magnético de un transformador.

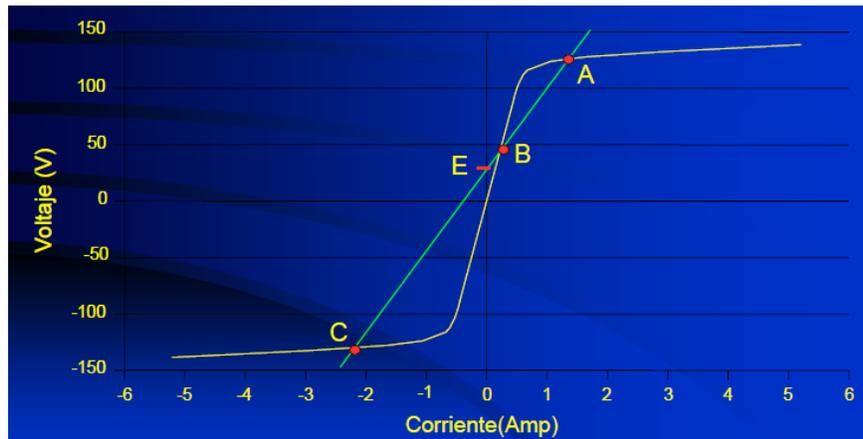


Imagen 1.21. Puntos de trabajo posibles para el circuito magnético de un transformador. Tomado de: Guillermo Aponte M. “La ferroresonancia en transformadores de Distribución”.

De estos puntos B y C se consideran estables, mientras que A es inestable. En el punto B la tensión V_L será pequeño, ya que el punto de operación está dentro de la región lineal, en el punto C las tensiones de V_L como V_C pueden tener valores altos, por lo que corresponderá a un punto de ferroresonancia, y bajo este estado el punto de trabajo del sistema puede estar cambiando del punto B al C y viceversa.

Por lo tanto, la condición de ferroresonancia se da cuando hay varios puntos de operación en la curva de magnetización, ya que el punto de trabajo del sistema no está en la región lineal, sino que también se mueve a la región de saturación.

1.3 Principales características del fenómeno de la Ferroresonancia.

- El fenómeno de la ferroresonancia es un fenómeno complejo caracterizado por una multiplicidad de regímenes permanentes para un circuito dado, los cuales, presentan una alta sensibilidad a los valores de los parámetros de la red, y a las condiciones iniciales del circuito para que puedan ocurrir.
- Sensibilidad a los valores de los parámetros de la red, generando un fenómeno de salto. La curva de la *imagen 1.22* describe la tensión de cresta en bornes de la inductancia no lineal V_L , en función de la amplitud de cresta E de la fuente de tensión senoidal.

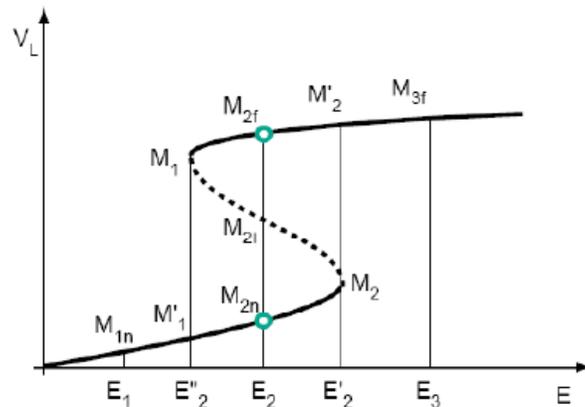


Imagen 1.22. Sensibilidad a los parámetros de la red y fenómeno de salto. Tomado de: Philippe Ferraci. "La Ferroresonancia", Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

En la imagen anterior se observa que al aumentar progresivamente la amplitud de cresta E a partir de cero, la curva ilustra la posibilidad de ocurrencia de tres comportamientos diferentes según el valor de E , así como el fenómeno de salto:

- Para $E = E_1$ la solución M_{1n} es única y corresponde a un régimen normal como si fuera un caso lineal.
- Para $E = E_2$ existen tres soluciones posibles que son M_{2n} , M_{2i} , M_{2f} , dos de las cuales son estables M_{2n} y M_{2f} . Una de ellas, M_{2n} , corresponde al régimen normal y la otra, M_{2f} al régimen ferresonante, la parte de la curva a trazo discontinuo no puede ser obtenida en la realidad porque corresponde a regímenes inestables.
- Para $E = E'_2$, la tensión V_L pasa brutalmente del punto M_2 al punto M'_2 , debido al fenómeno de salto. El punto M_2 se llama punto límite.
- Para $E = E_3$, sólo el régimen ferresonante M_{3f} es posible, mientras el valor de E decrece a partir de E_3 , la solución pasa muy bruscamente del segundo punto limite M_1 al punto M'_1 .

El fenómeno de salto característico de la ferresonancia también se puede obtener a partir de otro parámetro de la red como la resistencia R o la capacidad C .

Una variación pequeña de un parámetro de la red o del régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos y desencadenar uno de los cuatro tipos de regímenes permanentes de ferresonancia; los regímenes que se encuentran más a menudo son el régimen fundamental y el régimen subarmónico.

- Sensibilidad a las condiciones iniciales.

La obtención de M_{2n} o de M_{2f} depende de las condiciones iniciales. La *imagen 1.23*, ilustra las trayectorias del régimen transitorio de los pares (ϕ, V_c) en función del tiempo para distintas condiciones iniciales M_{01} y M_{02} . La curva C determina una frontera. Si las condiciones iniciales como el flujo remanente y la tensión en bornes del condensador se encuentran a un lado de la frontera, la solución converge hacia M_{2n} . Si las condiciones iniciales se encuentran al otro lado, la solución converge hacia M_{2f} . Como el punto M_{2i} pertenece a la frontera, cerca de este punto el régimen permanente obtenido es muy sensible a las condiciones iniciales.

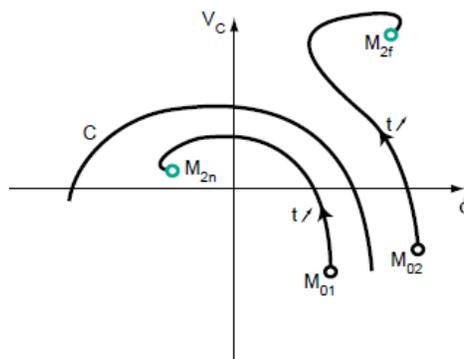


Imagen 1.23. Sensibilidad a las condiciones iniciales.

Tomado de: Philippe Ferraci. "La Ferroresonancia", Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

- La frecuencia de las ondas de tensión y corriente pueden ser diferentes a las de la fuente de tensión senoidales aplicada E, debido a la naturaleza no lineal del circuito ferroresonante.
- Existen varios regímenes permanentes y estables para una configuración y valores de parámetros dados.

- Se desarrolla para una amplia gama de valores del parámetro de capacitancia C .
- Las tasas de armónicos anormales, las sobretensiones o las sobre intensidades transitorias o permanentes que provoca la ferresonancia son a menudo las causas del deterioro de los materiales eléctricos y destrucción total o parcial de equipos.
- La ferresonancia se produce principalmente en transformadores cuando están operando en vacío o con muy poca carga, también cuando estos operan cerca del codo de la curva de magnetización; es decir, con el núcleo saturado, la corriente en el circuito deja de ser senoidal y lleva un alto contenido de armónicos impares.

1.4. Tipos de régimen del fenómeno de la ferresonancia.

De las características de la ferresonancia, se sabe que en los transformadores se produce la ferresonancia principalmente cuando están en vacío o con carga mínima, de igual manera cuando se operan muy cerca del codo de la curva de magnetización, presentando armónicos en la onda de corriente, perdiendo su forma senoidal.

Sin embargo, las experiencias con los diferentes tipos de ondas registrados en múltiples redes y el continuo estudio, el análisis y los modelos reducidos de redes han permitido lograr una clasificación de diferentes tipos de regímenes permanentes de resonancia, en cuatro tipos que se detallan a continuación.

- a) Régimen fundamental.
- b) Régimen sub armónico.
- c) Régimen casi-periódico.
- d) Régimen caótico.

Cada uno de estos regímenes está asociado con la cantidad de puntos de operación que están fuera de la región lineal de la curva de magnetización vista en la *imagen 1.21*.

a) Régimen fundamental.

La *imagen 1.24* indica que, si existe un punto de operación fuera de la región lineal de la curva de magnetización, el régimen será fundamental. Éste se caracteriza por mantener las corrientes y tensiones periódicas con un periodo igual al de la red, con cierto contenido armónico. El espectro de la señal muestra un espectro discontinuo formado por una frecuencia fundamental f_0 de la red y sus respectivos armónicos.

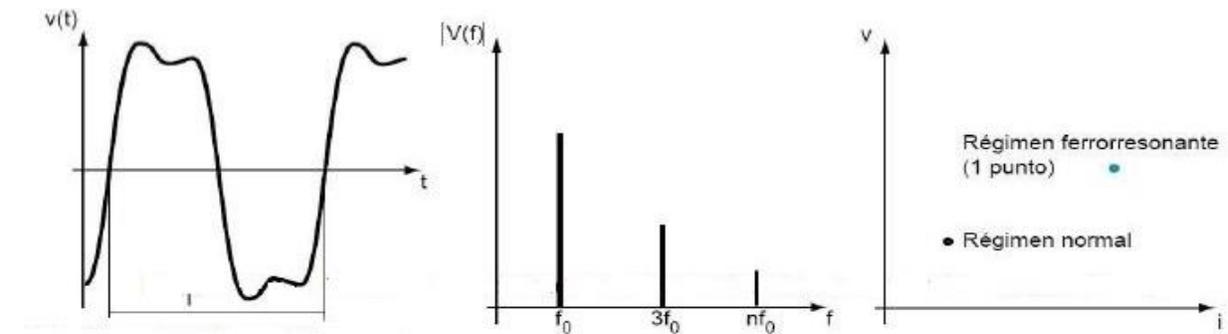


Imagen 1.24. Características del régimen fundamental. Tomado de: Philippe Ferraci. "La Ferroresonancia", Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

b) Régimen subarmónico.

La *imagen 1.25* indica que, si se tienen varios puntos de operación fuera de la región lineal de la curva de magnetización, el régimen será subarmónico. Las señales son periódicas con periodo nT múltiplo del de la red. También se le llama régimen subarmónico n o armónico $1/n$. El espectro muestra una fundamental igual a f_0/n y sus armónicos, donde f_0 es la

frecuencia de la red y n un número entero; la frecuencia fundamental de la red f_0 forma parte del espectro.

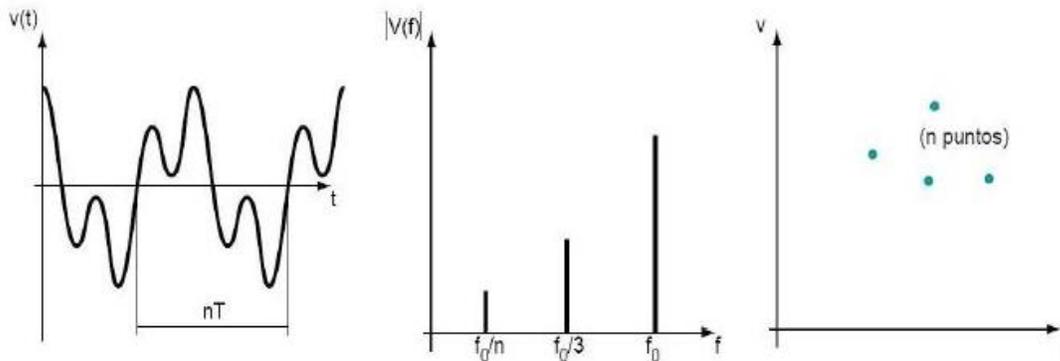


Imagen 1.25. Características del régimen subarmónico. Tomado de: Philippe Ferraci. “La Ferroresonancia”, Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

c) Régimen Casi-periódico.

La imagen 1.26, indica que, si se tienen muchos más puntos de operación fuera de la región lineal de la curva de magnetización, el régimen será casi-periódico. También llamado pseudo periódico, se caracteriza porque no es periódico y su espectro muestra múltiples rayas y las frecuencias se expresan de la forma: $nf_1 + mf_2$ (donde n y m son números enteros y f_1/f_2 son números reales irracionales).

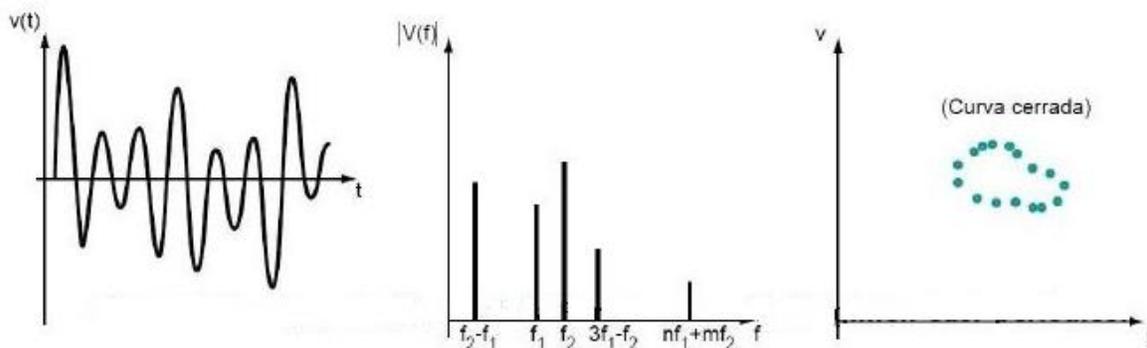


Imagen 1.26. Características del régimen Casi-periódico. Tomado de: Philippe Ferraci. “La Ferroresonancia”, Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

d) Régimen caótico.

La imagen 1.27 indica que, entre más puntos existan fuera de la región lineal de la curva de magnetización, el régimen será caótico. Para este caso el espectro correspondiente es continuo, es decir, que no se anula para ninguna frecuencia, provocando serios problemas en el suministro eléctrico. La disposición constituida por puntos distintos dentro del plano $v-i$, es llamada atracción extraña.

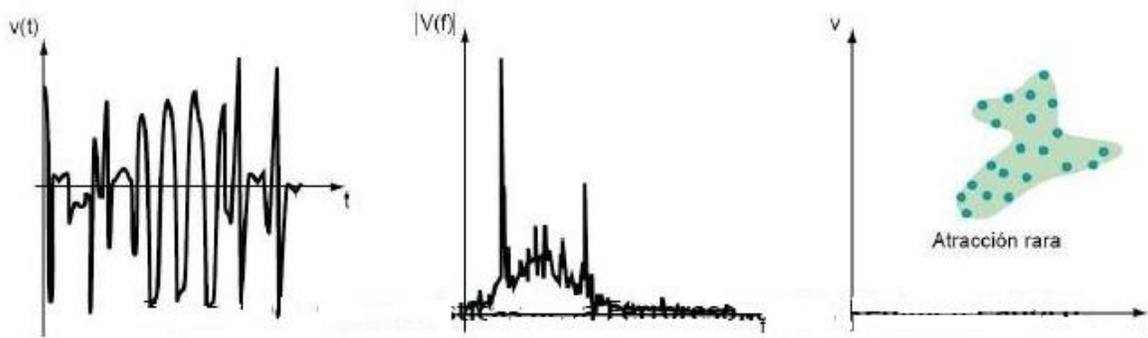


Imagen 1.27. Características del régimen caótico.

Tomado de: Philippe Ferraci. "La Ferroresonancia", Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.

CAPÍTULO 2

LA FERRORESONANCIA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICOS.

Para un sistema eléctrico de distribución dado, el fenómeno de la ferroresonancia se presenta cuando se forma un circuito LC serie con los elementos que componen al sistema, en el cual uno de ellos tiene característica no lineal. Dicho circuito se crea por causa de una falla o maniobra de conexión o desconexión de los dispositivos de interrupción de una o dos de las fases. Esta condición puede presentarse cuando en el sistema se utilizan dispositivos de interrupción monopulares o también por la operación de fusibles de protección.

La capacitancia C puede deberse a la presencia de bancos de capacitores, cables, líneas de interconexión y a la capacitancia propia del transformador, mientras que la inductancia L normalmente es aportada por un transformador cuyo núcleo es de material ferromagnético, y es así como una reactancia capacitiva X_C aparece conectada en serie con la reactancia inductiva del transformador X_L .

En el circuito trifásico de la *imagen 2.1*, se muestra un sistema de distribución trifásico, compuesto por una fuente trifásica conectada sólidamente a tierra y cables alimentadores apantallados con tres cortacircuitos monopulares, este tipo de cables posee una capacitancia de fase-tierra C_0 , pero no presenta capacitancia fase-fase. En el otro extremo del circuito, se encuentra una subestación trifásica en vacío con las bobinas del primario en conexión Delta.

En el momento en que se cierra el cortacircuito monopolar de la fase A, dos fases del transformador se energizan siguiendo la trayectoria a través de las capacitancias a tierra de los cables correspondientes a las fases B y C.

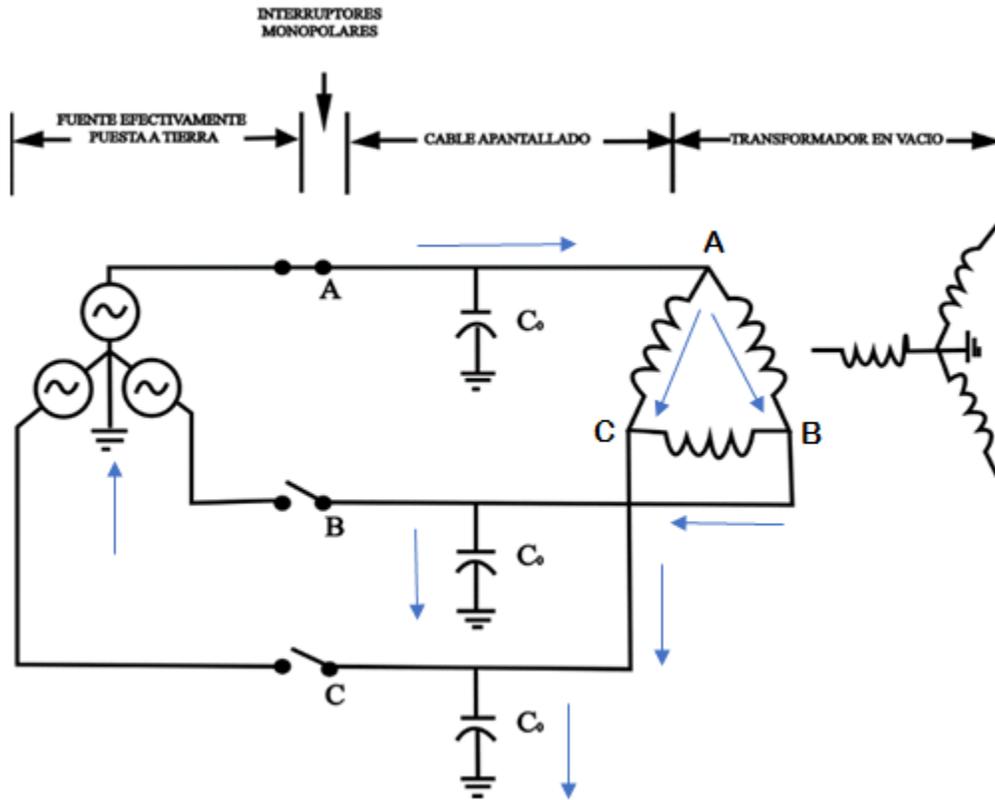


Imagen 2.1. Circuito ferroresonante trifásico. Tomado de norma ANSI 57.105-1978-R1999-IEEE-Guide-for-Application-of-Transformer-Connections-in-Three-Phase-Distribution-Systems.

los arrollamientos de las columnas A-B y A-C del núcleo del transformador trazan una corriente de excitación, esta corriente tomada por el transformador puede llevarlo a la saturación del núcleo por su característica magnética no lineal y por flujos magnéticos residuales.

La saturación produce un largo pulso de corriente a través de los arrollamientos del transformador y las capacitancias de las fases B y C, de manera que cuando el núcleo del transformador sale de saturación, deja almacenado un voltaje de carga importante en la capacitancia del cable.

Si el transformador continúa entrando y saliendo de saturación, pueden ocurrir altas y sostenidas sobretensiones de fase-fase y fase-tierra, que persisten aleatoriamente o de manera cíclica, las cuales causan una sobre excitación del transformador, provocando fallas en los pararrayos, e incluso fallas en el aislamiento del transformador o del sistema involucrado.

Cuando se cierra el cortacircuito de la segunda fase en el circuito de la *imagen 2.1*, el fenómeno podría persistir con el mismo comportamiento, podría ser mayor, o podría reducirse, esto depende de los parámetros de las condiciones iniciales del sistema y las características magnéticas propias del núcleo del transformador. Sin embargo, al cerrar el cortacircuito de la tercera fase, la operación del circuito cambia totalmente, ya que se restauran las condiciones para obtener un balance en las tres fases, suprimiéndose así el efecto ferresonante.

Por lo tanto, un sistema de distribución debe ser diseñado y operado de tal manera que la probabilidad de que ocurra el fenómeno de ferresonancia sean mínima durante condiciones monofásicas. También la selección del sistema y el método de operación, las conexiones y los dispositivos de interrupción, deben seleccionarse adecuadamente para reducir tanto la ocurrencia como los efectos nocivos que origina el fenómeno.

2.0 Topologías básicas que presentan riesgo de ferroresonancia

Las subestaciones eléctricas con ciertas conexiones, son más susceptibles a experimentar ferroresonancia cuando el banco es energizado o desenergizado usando cortacircuitos monopolares, que se encuentran distantes del transformador, o cuando se abre un conductor o fusible en un lugar remoto. Por lo general, la ferroresonancia es posible si las bobinas del primario del banco de transformadores no están puestas a tierra y el sistema de suministro está sólidamente aterrizado, entonces se presentan capacitancias fase-fase, fase-tierra o ambos tipos, entre los cortacircuitos monopolares, los cables de potencia de alimentación y el transformador. La *imagen 2.2*, muestra las conexiones más frecuentes en los transformadores, los cuales son susceptibles a ferroresonancia durante condiciones monofásicas normales y anormales.

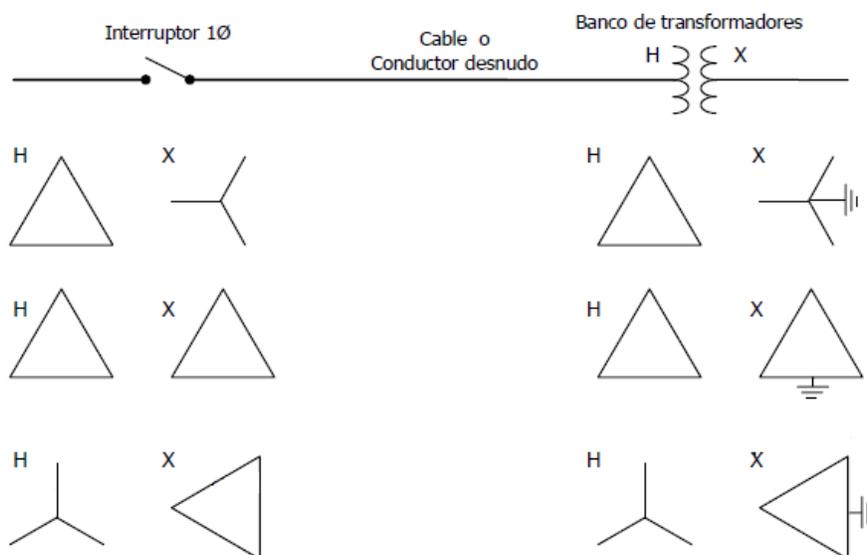


Imagen 2.2. Conexiones trifásicas susceptibles al fenómeno de ferroresonancia. Tomado de: ANSI/IEEE, IEEE Guide for Application of Transformers Connections in Three Phase Distribution Systems: Ferro-resonance. P22-23 ANSI/IEEE Norma: C57.105-1978-R1999.

La posibilidad de que ocurra o no ferresonancia con las conexiones mostradas en la *imagen 2.2*, depende de las características eléctricas del transformador y del sistema. Para una conexión en particular las capacitancias fase-tierra y fase-fase del circuito más la capacitancia interna del transformador son los parámetros que tienen mayor influencia en el establecimiento de la ferresonancia sostenida en condiciones monofásicas.

La norma ANSI/IEEE Norma: C57.105-1978-R1999 establece que la ferresonancia sostenida ocurrirá solo si la capacitancia del circuito y la inductancia del transformador caen dentro de un rango dado, y los valores límites de este rango de capacitancias son determinados principalmente por el nivel de tensión del primario, las dimensiones y parámetros de diseño del transformador.

El fenómeno puede ocurrir en un intervalo de tensión primaria, del cual el límite inferior es el más importante. El límite inferior decrece en la medida que se reduce el tamaño del transformador, por lo que, para un transformador de un tamaño dado, el límite decrece a medida que se incrementa el nivel de tensión primaria, por lo tanto, el fenómeno de ferresonancia es más probable su ocurrencia para tensiones grandes tensiones primaria con transformadores de un tamaño pequeño.

Para sistemas aéreos de 25 kV con neutro multi aterrizado y particularmente en los sistemas de 35 kV, la ferresonancia es más probable con las conexiones de la *imagen 2.2*. Se ha observado ferresonancia con altas sobretensiones con niveles de 4 a 5 en p.u., al energizar los terminales de bancos de transformadores conformados por pequeños transformadores monofásicos con conexión Y- Δ .

La ferresonancia es posible si el voltaje del primario es de 12 kV o mayor, para un sistema efectivamente puesto a tierra y que, además, se emplea en el circuito cables monoplares apantallados o un cable tripolar apantallado.

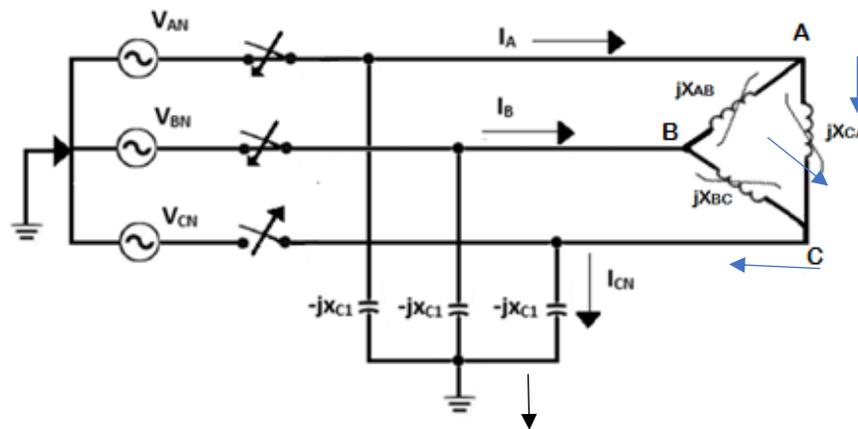
Las conexiones trifásicas mostradas en la *imagen 2.2*, pueden estar conformado por tres transformadores monofásicos o un solo transformador trifásico, con cualquier conexión en la que no esté aterrizado el lado primario de la subestación eléctrica, es factible que se pueda presentar una condición favorable para que el fenómeno ocurra. Sin embargo, no ocurre ferresonancia si la tensión en el primario es de 15 kV o inferior y si además se emplea en el circuito una línea aérea de longitud relativamente corta entre el banco de transformadores y los dispositivos monoplares de apertura y cierre.

2.1 Maniobras de interrupción en subestaciones trifásicas y formación de circuito ferresonante LC serie.

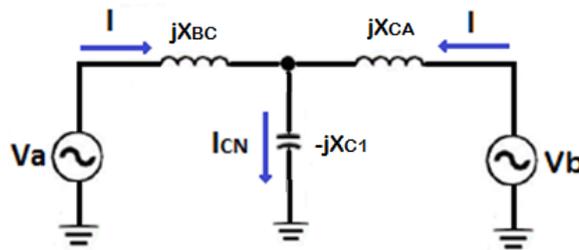
A continuación, se analizan dos de las conexiones vistas en la *imagen 2.2*, siendo estas las más comunes en las subestaciones trifásicas de distribución, y en las cuales se da la ferresonancia. Dichas conexiones se abordan a lo largo de cuatro casos, considerando en cada uno una maniobra de interrupción en un sistema de distribución con cable monopolar apantallado, cuyo efecto capacitivo está representado por una capacitancia conectada a tierra a cada una de las fases de suministro. En cada diagrama no se ha dibujado la conexión del secundario debido a que el caso más crítico para que el fenómeno ocurra es en vacío, y también debido a que la tensión del secundario no tiene efecto sobre la tensión y corrientes del lado primario.

2.1.1 Caso I. Subestación trifásica en delta, con una fase abierta.

Este caso se ilustra con el circuito de distribución de la *imagen 2.3*, en el cual se observa una subestación trifásica en conexión primaria Delta sin carga, cuyos interruptores monopolares para las fases A y B están cerrados, pero debido a una apertura ya sea por una condición de falla o de mantenimiento, la fase C no está conectada a la fuente de alimentación, por lo que, al estar desconectada la fase C, ésta no tiene efecto incidente sobre el sistema.



a)



b)

Imagen 2.3. a) Sistema trifásico en Delta con fase C abierta, b) Circuito simplificado con trayectoria LC

Para simplificar el análisis del circuito se ha despreciado el efecto capacitivo del sistema con respecto a tierra, las cuales aparecen en las líneas A y B, junto con la reactancia del transformador jX_{AB} , y en vista de que éstas no afectan la tensión del nodo C y no forman parte de la trayectoria del circuito ferresonante LC, no se consideran parte del circuito simplificado de la *imagen 2.3 b)*.

Las capacitancias mencionadas siempre tienen aplicada la tensión nominal, y por la topología de la red, la reactancia del transformador jX_{AB} , queda sin efecto al estar energizado en ambos extremos con un mismo nivel de tensión, por lo que la corriente tomada por el banco de transformadores I_A e I_B , establecen una trayectoria LC serie a tierra, a través de la reactancia capacitiva jX_{C1} de la fase C, por la que circula una corriente I_{CN} .

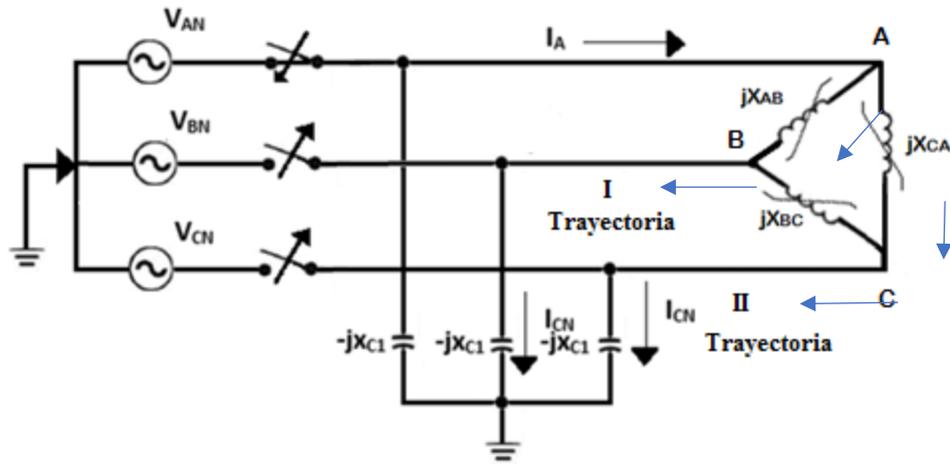
Esta corriente I_{CN} determina la tensión en la terminal de línea abierta, y que a su vez es la misma tensión a extremos de la reactancia capacitiva a tierra del circuito simplificado. Si se abre cualquiera de las dos fases conectadas del circuito, siempre se obtiene un circuito LC serie, la cual como ya se sabe es una configuración peligrosa que es factible para provocar el fenómeno de ferresonancia.

2.1.2 Caso II. Subestación trifásica en delta con dos fases abiertas.

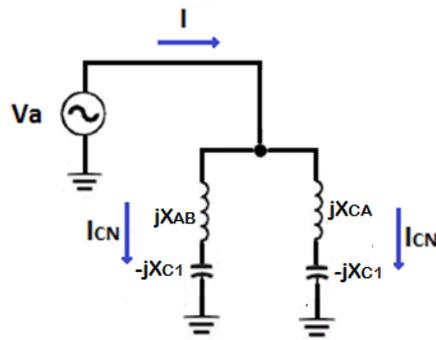
Para este segundo caso, al tener una conexión en Delta con solo la fase A conectada a la fuente de alimentación trifásica, se establecen dos trayectorias a tierra a través de las capacitancias equivalentes de los alimentadores desconectados, de las fases B y C. El efecto capacitivo de la línea de la fase A no se toma en cuenta, debido a que no forman parte de ninguna trayectoria LC serie.

Las reactancias capacitivas a tierra de las líneas B y C son iguales y si las reactancias de los transformadores jX_{AB} y jX_{AC} representados en el circuito de la *imagen 2.4 a)* se consideran iguales, entonces las corrientes I_{CN} que fluyen desde la línea A hacia tierra por las trayectorias I y II, también serán iguales a causa de la simetría que adquiere el circuito, por lo que la tensión en los puntos B y C es la misma, de manera que la reactancia del transformador jX_{BC} queda sin efecto.

Los dos circuitos LC serie creadas por las trayectorias I y II son equivalentes y están conectadas a la misma tensión como lo muestra la *imagen 2.4 b*).



a)



b)

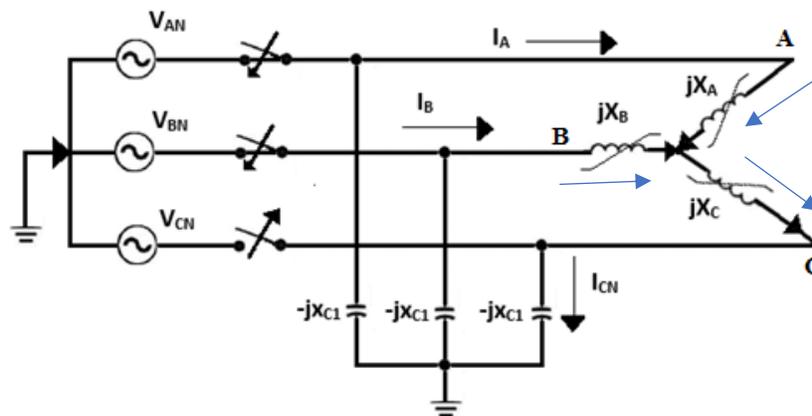
Imagen 2.4. a) Sistema trifásico en Delta con fases B y C abiertas, b) Circuito simplificado con trayectorias LC serie.

Para este caso, los valores de las tensiones de las líneas abiertas a tierra son mayores, que cuando solo se trata de una fase desconectada de la fuente, ya que podría llegar a ser hasta de cuatro veces la tensión normal de línea a neutro del sistema.

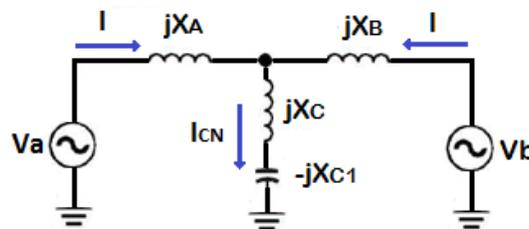
2.1.3 Caso III. Subestación trifásica en estrella con una fase abierta.

En este tercer caso se muestra la *imagen 2.5 a)*, la cual consiste en un sistema trifásico con conexión estrella no aterrizada en el lado primario, en la cual se ha desconectado una de las fases de la fuente de alimentación trifásica.

Al igual que en los casos anteriores, cada uno de los alimentadores tiene asociada una capacitancia equivalente a tierra, sin embargo, solo se toma en cuenta aquella que pertenece a la línea abierta, debido a que las demás no afectan al sistema. De manera que se establece una trayectoria LC serie con la reactancia capacitiva jX_{C1} del alimentador de la fase C, como se muestra en la *imagen 2.5 b)*.



a)



b)

Imagen 2.5. a) Sistema trifásico en Estrella con fase C abierta, b) Circuito simplificado con trayectoria LC serie.

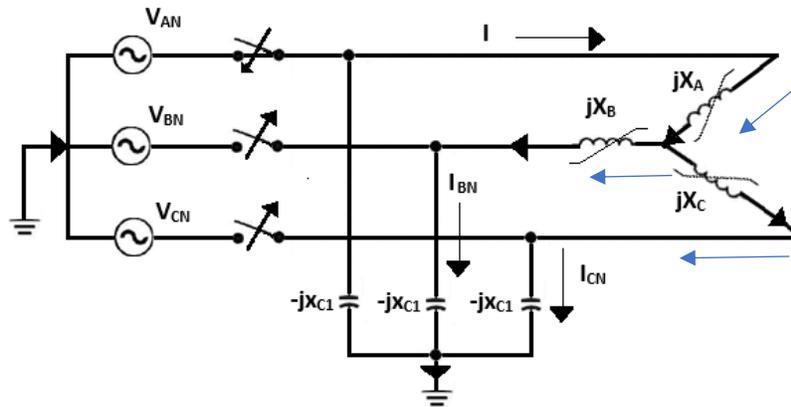
Las tensiones V_{AN} y V_{BN} , aplicados al circuito simplificado son las tensiones nominales de línea a neutro de la fuente de alimentación trifásica, las cuales poseen igual magnitud y un desfase de 120° , entre sí, mientras que la tensión V_{CN} , en la línea abierta del banco es desconocido. Esta tensión depende de la corriente I_{CN} , que fluye hacia tierra a través de jX_C atribuidas a las corrientes proporcionadas por las fases A y B. Debido a la no linealidad existente entre la tensión y la corriente en un transformador eléctrico, el valor de X_A y X_C no puede ser conocido fácilmente.

2.1.4 Caso IV. Subestación trifásica en estrella con dos fases abiertas.

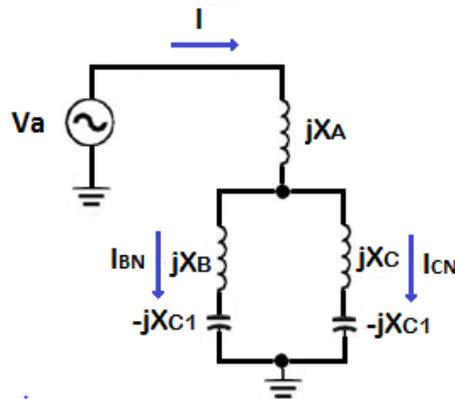
El cuarto caso aborda un sistema trifásico con conexión primaria en estrella no aterrizada, a la cual se le hace una maniobra de cierre en una de sus fases, dando como resultado el sistema mostrado en la *imagen 2.6 a*).

Bajo esta condición solo la fase A se mantiene conectada a la fuente de alimentación trifásica, de manera que se establecen dos trayectorias LC, a través de las capacitancias equivalentes de las líneas abiertas correspondientes a las fases B y C, como se observa en la *imagen 2.6 b*).

Considerando iguales los efectos capacitivos a tierra de las líneas abiertas, así como las reactancias inductivas de los transformadores jX_A , jX_B y jX_C , se establece una simetría en la topología del circuito, entonces la corriente que fluye de la línea en servicio I_A hacia tierra se dividirá en igual proporción por las trayectorias descritas por las corrientes I_{CN} e I_{BN} , y por consiguiente se tendrá el mismo valor de tensión en los puntos de línea abierta.



a)



b)

Imagen 2.6. a) Sistema trifásico en Estrella con fases B y C abiertas, b) Circuito simplificado con trayectoria LC serie.

En vista de que la corriente I_A , es dos veces la corriente I_{BN} , las reactancias jX_A y jX_B están en diferentes puntos de operación de la curva de magnetización, esto hace difícil determinar el valor exacto de la reactancia equivalente de los transformadores en el circuito simplificado. Sin embargo, existe un método gráfico que permite estimar dicho valor en función de las características de magnetización de cada transformador involucrado.

2.2 Estudio de un caso real de ferresonancia en alimentador de transformadores de distribución tipo Pad-Mounted a 12.47 kV.

La ferresonancia es un problema real que afecta a muchas instalaciones industriales y comerciales, y que hasta el día de hoy es un fenómeno poco comprendido por muchos profesionales del área eléctrica. Uno de estos casos, ocurrió en el estado de Minnesota EEUU, en el año 2015.

El caso tiene que ver con un transformador de distribución tipo Pad-Mounted a una tensión de alimentación de 12.47 kV mediante cable monopolar apantallado. Dicho transformador se utilizaba principalmente para suplir cargas imprevistas que surgieran cuando había daños en las líneas de distribución, por lo tanto, dicho transformador estaba sin carga la mayor parte del tiempo. Entonces, al entrar en funcionamiento el transformador, en algunos casos ocurría una falla que era despejada por un fusible ubicado en el lado primario, pero continuaba apareciendo una tensión de alimentación en el lado de la carga del fusible.

Al reparar la falla y hacer maniobras de cierre para poner nuevamente en funcionamiento el transformador, se observó una llamarada en el cable de alimentación hacia el transformador. Por este motivo se hicieron mediciones de campo y pruebas de laboratorio en el transformador para determinar la causa del problema.

La configuración del transformador fue estrella aterrizada tanto en el lado primario como en el secundario, la cual se muestra en la *imagen 2.7*.

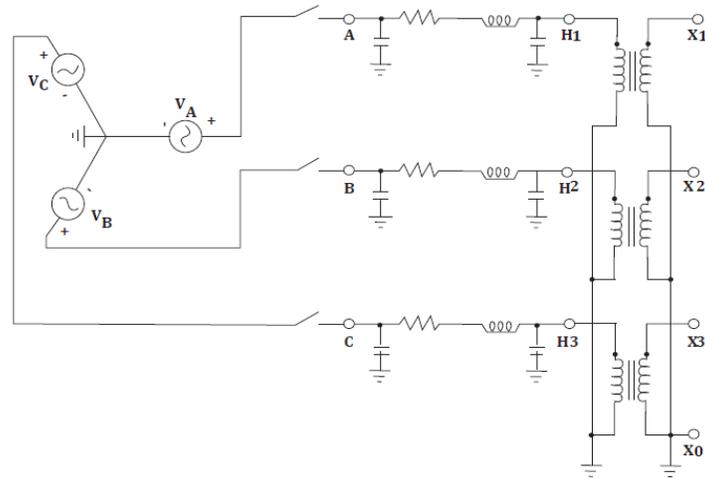


Imagen 2.7. Configuración típica de un sistema en estrella aterrizado. Tomado de: Bruce A. Mork, Ph.D. "Understanding and Dealing with Ferroresonance". Department of Electrical & Computer Engineering Michigan Technological University Houghton, MI 49931-1295.

Usualmente en transformadores tipo Pad-Mounted se usa el núcleo separados de 5 piernas como el mostrado en uno de los diagramas de la imagen 2.8, esta configuración estima un valor de tensión de retroalimentación presente en el núcleo.

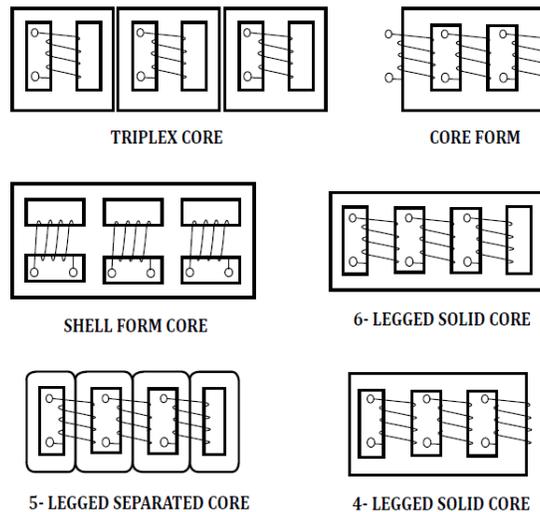


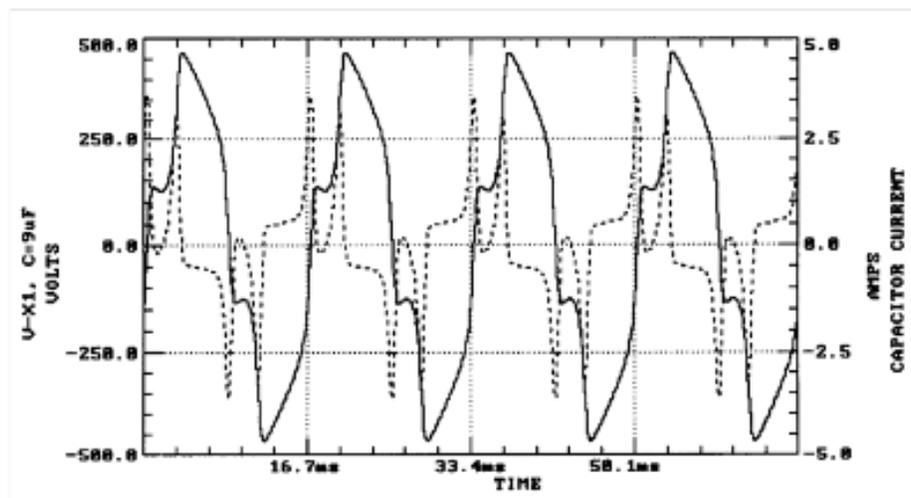
Imagen 2.8: Diseños del núcleo de transformadores. Tomado de: Bruce A. Mork, Ph.D. "Understanding and Dealing with Ferroresonance". Department of Electrical & Computer Engineering Michigan Technological University Houghton, MI 49931-1295.

En las pruebas de laboratorio se usó un transformador de 75 KVA 12.47kV/480V con el núcleo de 5 piernas, típico de estos transformadores mencionado anteriormente.

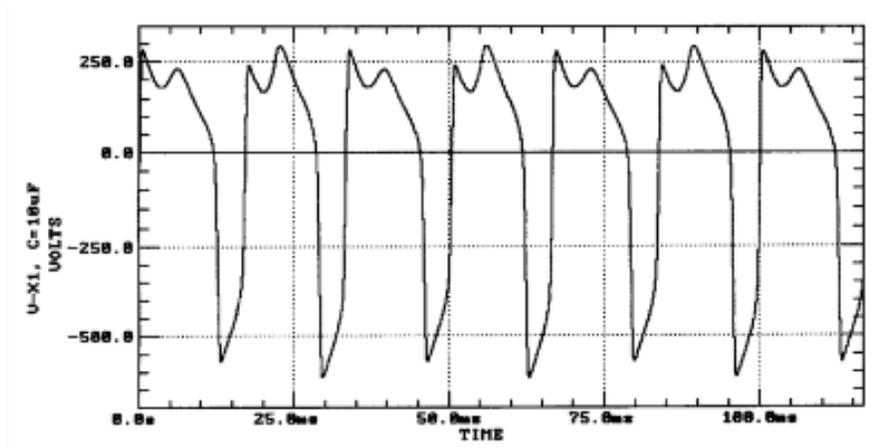
Al momento de des energizar las fases del transformador, se presentaba una tensión de retroalimentación “inducida” en la línea abierta, y era del orden de 50% del acoplamiento magnético de la fase adyacente, siempre y cuando la fase adyacente este energizada.

Entonces, examinado el circuito equivalente del sistema energizado a una fase, la tensión de retroalimentación presente alimentaba una combinación L-C, compuesta por la capacitancia del cable apantallado y la inductancia de magnetización del núcleo del transformador. Por ello, la ferresonancia fue posible en la fase abiertas del circuito y se presentó la falla en el aislamiento del cable de alimentación.

A continuación, se presentan diferentes formas de onda en estado ferresonante, las cuales pueden cambiar dependiendo de la longitud del cable, ya que la capacitancia del cable apantallado se incrementa con la longitud del mismo.



a)



b)

Imagen 2.9. a) Forma de onda de tensión y corriente en el transformador con capacitancia $C = 9 \mu\text{F}$, b) Forma de onda de tensión con capacitancia $C = 10 \mu\text{F}$. Tomado de: Bruce A. Mork, Ph.D. "Understanding and Dealing with Ferroresonance". Department of Electrical & Computer Engineering Michigan Technological University Houghton, MI 49931-1295.

No existen patrones predecibles en el comportamiento del fenómeno, por tal motivo, los mismos parámetros pueden dar diferentes resultados de comportamientos de estado estable.

Como se puede observar en las gráficas de la *figura 2.9*, el fenómeno que se presentó en el transformador Pad-Mounted, fue en efecto ferroresonancia de tipo periódica con régimen subarmónico, caracterizado por grandes sobre tensiones y formas de ondas irregulares, capaces de dañar el equipo.

Se determinó que el motivo de la falla, fue el hecho de que solo una fase del transformador permanecía en operación durante mucho tiempo. Otra observación que se puede hacer es que incluso en una subestación con conexión estrella aterrizada es posible que se presente la ferroresonancia en un circuito de distribución.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL MÓDULO PRUEBAS PARA CIRCUITOS

FERRORESONANTES TRIFÁSICOS.

Para desarrollar el módulo de circuitos ferresonantes, es necesario realizar una serie de procedimientos que permitan modelar adecuadamente una subestación trifásica a escala, capaz de recrear bajo condiciones controladas y seguras el fenómeno de ferresonancia. A continuación, se hace referencia a los procedimientos que van a determinar la caracterización de los componentes más importantes del módulo para la ocurrencia del fenómeno.

3.0 Ensayos de transformadores monofásicos.

Uno de los elementos más importantes para desarrollar el módulo de pruebas ferresonantes, consiste en tres transformadores monofásicos de tipo seco, con una capacidad de 240VA, 240/24 V AC. A cada uno de ellos se les ha realizado ha realizado las pruebas de cortocircuito y prueba de vacío para obtener los parámetros de su circuito equivalente, con el propósito de obtener un modelo de mayor exactitud y por consiguiente obtener resultados confiables.

En las siguientes tablas se han registrado los resultados de las pruebas de vacío y cortocircuito realizadas en el lado de baja tensión para los transformadores T_1 , T_2 y T_3 , así como sus parámetros de circuito equivalente.

Ensayos para T_1	Tensión	Corriente	Potencia
Vacío en BT	$V_{oc} = 23.81V$ $V_{ocH} = 219.9 V$	$I_{oc} = 0.465 A$	$P_{oc} = 4.663 W$
Cortocircuito en BT	$V_{sc} = 3.658V$	$I_{sc} = 8.738 A$ $I_{scH} = 0.8 A$	$P_{sc} = 19.40 W$

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T_1 .

Los parámetros de circuito equivalente se calculan de la manera siguiente:

Resistencia equivalente de pérdida en el núcleo:

$$R_{cL} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = (23.81V)^2 / 4.668 \text{ W} = 121.58 \Omega$$

Reactancia de magnetización:

$$S_{oc} = V_{oc} * I_{oc} = (23.81V) * (0.465A) = 11.07 \text{ VA}$$

$$Q_{oc} = \sqrt{(S_{oc})^2 - (P_{oc})^2} = \sqrt{11.07^2 - 4.668^2} = 10.04 \text{ VAR}$$

$$X_{mL} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} = (23.81V)^2 / 10.04 \text{ VAR} = j56.46 \Omega$$

Refiriendo al primario:

$$\text{Relación de transformación con media bobina primaria: } a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{120}{24} = 5$$

$$R_{CH} = a^2 * R_{cL} = 5^2 * 121.58 = \mathbf{3039.44 \Omega}$$

$$X_{mH} = a^2 * X_{mL} = 5^2 * j56.46 = \mathbf{j1411.50\Omega}$$

Del ensayo de corto circuito:

$$R_{eL} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = 19.40 \text{ W} / (8.738 \text{ A})^2 = 0.254 \Omega$$

$$Z_{eL} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = 3.658 / 8.738 = 0.419 \Omega$$

$$X_{eL} = \sqrt{(Z_{eL})^2 - (R_{eL})^2} = \sqrt{(0.419)^2 - (0.254)^2} = j0.333 \Omega$$

$$R_L = 0.5 * R_{eL} = 0.5 * 0.254 = \mathbf{0.127 \Omega}$$

$$R_H = a^2 * (0.5 * ReL) = 5^2 * (0.5 * 0.254) = \mathbf{3.175 \Omega}$$

$$X_L = 0.5 * X_{eL} = 0.5 * 0.333 = \mathbf{j0.166 \Omega}$$

$$X_H = a^2 * (0.5 * X_{eL}) = 5^2 * (0.5 * 0.333) = \mathbf{j4.16 \Omega}$$

En la *tabla 3.2*, se muestran los resultados de los ensayos realizados al transformador T₂.

Ensayos para T ₂	Tensión	Corriente	Potencia
Vacío en BT	V _{oc} = 24.03V V _{ocH} = 222.0 V	I _{oc} = 0.442 A	P _{oc} = 5.472 W
Cortocircuito en BT	V _{sc} = 3.241V	I _{sc} = 7.713 A I _{scH} = 0.9 A	P _{sc} = 14.55 W

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T₂.

Los parámetros de circuito equivalente se calculan de la manera siguiente:

Resistencia equivalente de pérdida en el núcleo:

$$R_{cL} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = (24.03V)^2 / 5.472 W = 105.52 \Omega$$

Reactancia de magnetización:

$$S_{oc} = V_{oc} * I_{oc} = (24.03V) * (0.442A) = 10.62 VA$$

$$Q_{oc} = \sqrt{(S_{oc})^2 - (P_{oc})^2} = \sqrt{10.62^2 - 5.472^2} = 9.10 VAR$$

$$X_{mL} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} = (24.03V)^2 / 9.10 VAR = j63.45 \Omega$$

Refiriendo al primario:

Relación de transformación con media bobina primaria: $a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{120}{24} = 5$

$$R_{CH} = a^2 * R_{cl} = 5^2 * 105.52 = \mathbf{2638.00 \Omega}$$

$$X_{mH} = a^2 * X_{ml} = 5^2 * j63.45 = \mathbf{j1586.25 \Omega}$$

Del ensayo de corto circuito:

$$R_{eL} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = 14.55 \text{ W} / (7.7132 \text{ A})^2 = 0.24 \Omega$$

$$Z_{eL} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = 3.241/7.713 = 0.42 \Omega$$

$$X_{eL} = \sqrt{(Z_{eL})^2 - (R_{eL})^2} = \sqrt{(0.42)^2 - (0.24)^2} = j0.34 \Omega$$

$$R_L = 0.5 * R_{eL} = 0.5 * 0.24 = \mathbf{0.12 \Omega}$$

$$R_H = a^2 * (0.5 * R_{eL}) = 5^2 * (0.5 * 0.24) = \mathbf{3.0 \Omega}$$

$$X_L = 0.5 * X_{eL} = 0.5 * j0.34 = \mathbf{j0.17 \Omega}$$

$$X_H = a^2 * (0.5 * X_{eL}) = 5^2 * (0.5 * j0.17) = \mathbf{j4.25 \Omega}$$

En la *tabla 3.3*, se muestran los resultados de los ensayos realizados al transformador T_3 .

Ensayos para T_3	Tensión	Corriente	Potencia
Vacío en BT	$V_{oc} = 23.85 \text{ V}$ $V_{ocH} = 220.3 \text{ V}$	$I_{oc} = 0.432 \text{ A}$	$P_{oc} = 5.352 \text{ W}$
Cortocircuito en BT	$V_{sc} = 2.484 \text{ V}$	$I_{sc} = 6.007 \text{ A}$ $I_{scH} = 0.8 \text{ A}$	$P_{sc} = 8.86 \text{ W}$

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de vacío y cortocircuito aplicados al transformador T_3 .

Los parámetros de circuito equivalente se calculan de la manera siguiente:

Resistencia equivalente de pérdida en el núcleo:

$$R_{cL} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = (23.85\text{V})^2 / 5.352 \text{ W} = 106.28 \Omega$$

Reactancia de magnetización:

$$S_{oc} = V_{oc} * I_{oc} = (23.05\text{V}) * (0.432\text{A}) = 10.30 \text{ VA}$$

$$Q_{oc} = \sqrt{(S_{oc})^2 - (P_{oc})^2} = \sqrt{10.30^2 - 5.352^2} = 8.80 \text{ VAR}$$

$$X_{mL} = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} = (23.85\text{V})^2 / 8.80 \text{ VAR} = j64.61 \Omega$$

Refiriendo al primario:

Relación de transformación con media bobina primaria: $a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{120}{24} = 5$

$$R_{CH} = a^2 * R_{cl} = 5^2 * 106.28 = 2657.05 \Omega$$

$$X_{mH} = a^2 * X_{ml} = 5^2 * j64.61 = \mathbf{j1615.25 \Omega}$$

Del ensayo de corto circuito:

$$ReL = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = 8.86 \text{ W} / (6.007 \text{ A})^2 = 0.245 \Omega$$

$$ZeL = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = 2.984 / 6.007 = 0.41 \Omega$$

$$XeL = \sqrt{(ZeL)^2 - (ReL)^2} = \sqrt{(0.41)^2 - (0.245)^2} = j0.332 \Omega$$

$$R_L = 0.5 * ReL = 0.5 * 0.245 = \mathbf{0.123 \Omega}$$

$$R_H = a^2 * (0.5 * ReL) = 5^2 * (0.5 * 0.245) = \mathbf{3.07 \Omega}$$

$$X_L = 0.5 * XeL = 0.5 * j0.332 = \mathbf{j0.167 \Omega}$$

$$X_H = a^2 * (0.5 * XeL) = 5^2 * (0.5 * j0.167) = \mathbf{j4.1590 \Omega}$$

Como puede observarse los valores de los parámetros equivalentes para cada transformador tienen valores muy similares y pueden utilizarse para construir la subestación.

3.1 Levantamiento de curva característica de magnetización de los transformadores.

Obtener la curva de magnetización del transformador, es de fundamental importancia porque nos permite conocer su comportamiento electromagnético, y además brinda información acerca de las características de magnetización del núcleo, los cuales son de interés debido a que a través de la curva se describen las zonas de operación lineal y de saturación, en función de la corriente y tensión del transformador.

Para obtener la curva de magnetización de cada transformador se utilizó el diagrama de conexión mostrado en la *imagen 3.1*.

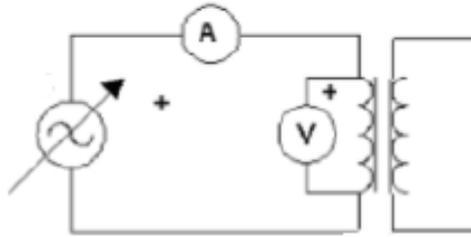


Imagen 3.1 Circuito para obtener la curva de magnetización del transformador. Tomado de: Amílcar Barrientos “Estudio y Evaluación del fenómeno de ferresonancia en subestaciones eléctricas de distribución”

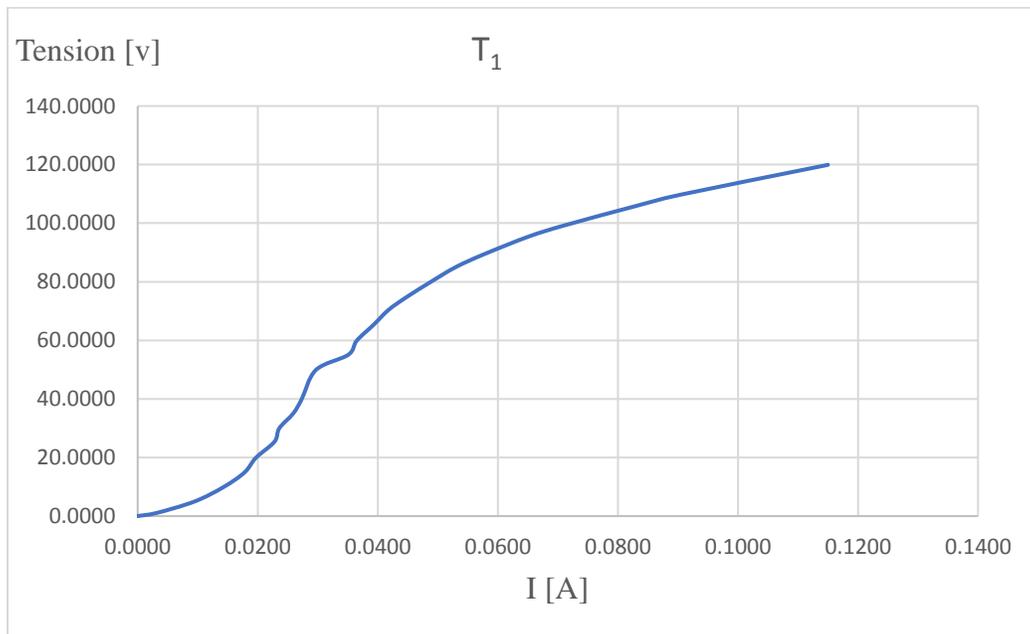
Implementando el circuito anterior se obtuvieron los datos que se muestran en la *tabla 3.4*, cada valor representa los valores eficaces RMS de tensión y corriente del transformador. La tensión se fue variando en intervalos de 5.0 V hasta el nominal de 120.0 V.

Transformador 1		Transformador 2		Transformador 3	
I [A]	V [v]	I [A]	V [v]	I [A]	V [v]
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0032	1.1000	0.0036	1.10	0.0039	1.1000
0.0095	5.0000	0.0112	5.10	0.0111	4.9000
0.0143	9.90	0.0168	10.00	0.0166	9.70
0.0178	14.90	0.0211	15.40	0.0209	15.10
0.0197	19.90	0.0241	19.80	0.0241	20.50
0.0228	25.40	0.0267	25.30	0.0268	25.30
0.0236	30.00	0.0294	30.90	0.0300	30.00
0.0259	35.00	0.0311	35.40	0.0328	35.00
0.0273	39.80	0.0336	40.40	0.0345	40.10
0.0297	49.90	0.0377	50.30	0.0374	50.20
0.0351	55.10	0.0406	54.80	0.0405	55.10
0.0365	59.90	0.0432	59.70	0.0422	59.90
0.0393	65.30	0.0457	65.00	0.0446	64.90
0.0418	70.40	0.0483	70.60	0.0477	69.80
0.0449	74.90	0.0507	74.70	0.0503	75.50
0.0488	79.90	0.0543	80.40	0.0531	79.60

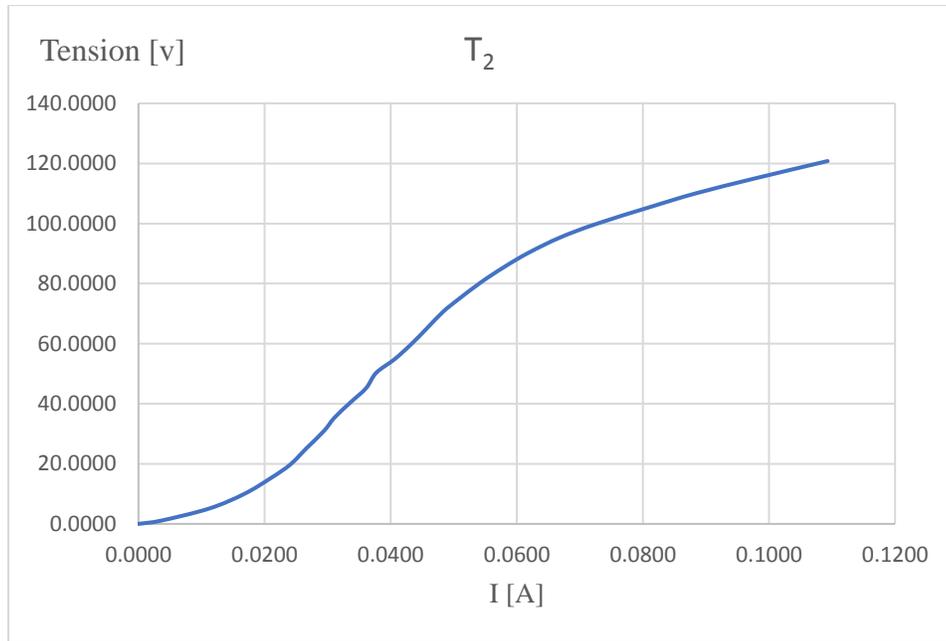
0.0529	84.90	0.0579	85.40	0.0571	85.50
0.0576	89.30	0.0618	90.20	0.0620	90.70
0.0651	95.40	0.0668	95.30	0.0662	94.40
0.0712	99.30	0.0725	99.80	0.0728	100.30
0.0829	105.80	0.0813	105.60	0.0801	105.30
0.0904	109.70	0.0883	110.00	0.0885	110.20
0.1150	119.90	0.1093	120.80	0.1118	121.80

Tabla 3.4. Datos de la curva de magnetización para los tres transformadores monofásicos.

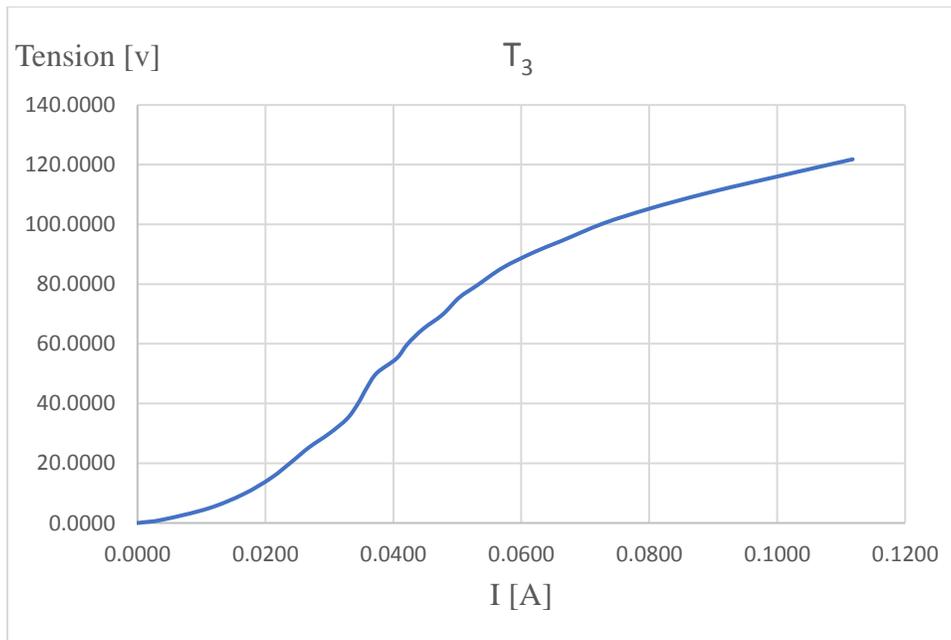
Al graficar los datos obtenidos se obtienen las curvas de magnetización para los tres transformadores como lo muestra la *imagen 3.2*.



a)



b)



c)

Imagen 3.2. Curvas de magnetización a) Transformador T1, b) Transformador T2, c) Transformador T3.

3.2 Determinación de la capacitancia crítica de una subestación trifásica.

Una de las medidas para evitar sobretensiones por ferresonancia es asegurar que la reactancia capacitiva equivalente por el cable apantallado sea mucho mayor que la reactancia inductiva del transformador. Por lo tanto, para calcularla se necesita la relación mínima X_c / X_m , entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva de la subestación.

Sin embargo, definir esta relación para una subestación trifásica no es sencillo, en vista de que cada uno de los transformadores no están en un mismo punto de operación al momento de realizar maniobras de apertura o cierre sobre las fases de alimentación. Ya que la tensión sobre cada una de las inductancias del transformador estará determinada por la topología adquirida de su circuito equivalente simplificado.

Para estimar un valor de esta relación, se hace uso de un método gráfico que proporciona una solución aproximada para el cálculo de las tensiones de línea a tierra que aparecen en las fases abiertas de la fuente de alimentación trifásica. El método se basa en el análisis de las componentes reales de las fuentes de alimentación a través del método de superposición, cuyo análisis no se aborda en este documento y se limita a la aplicación práctica del mismo. Si el lector desea profundizar en un análisis detallado de este método se refiere al documento *“Análisis de Ferresonancia en Transformadores Eléctricos”*, 1987, Salvador Acevedo. *Cap. 3.*

Este método considera despreciables las reactancias de dispersión de los transformadores y los efectos inductivos de las líneas, debido a que son pequeños comparados con las impedancias que presentan las reactancias de magnetización y los efectos capacitivos del sistema. También los tres transformadores deben tener igual curva de magnetización y la tensión de la fuente de alimentación es igual al nominal.

El análisis se va desarrollar para la conexión Delta-Estrella primaria, ya que es una conexión de las más utilizadas en los sistemas de distribución. Se va obtener la magnitud de las líneas abiertas en función de la capacitancia de línea a tierra y de la reactancia nominal de uno de los transformadores del banco trifásico.

Para una conexión primaria en Delta con una fase energizada, se tiene un circuito simplificado mostrado en la *imagen 3.3*

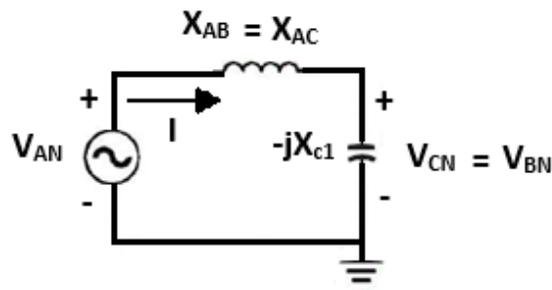


Imagen 3.3 Circuito simplificado LC de conexión trifásica en Delta con una fase energizada.

Dónde: X_m = Reactancia de magnetización de transformador.

X_{c1} = Reactancias capacitivas.

X_{AB} , X_{AC} = Reactancia efectiva de los devanados AB y AC conectado en Delta.

V_{AN} , V_{CN} = Tensiones a tierra en notación fasorial en los terminales del banco.

V_{AN} , V_{CN} = Tensiones a tierra en los terminales del banco de transformadores.

En la figura anterior se observa una de las trayectorias establecidas por el circuito simplificado al momento de energizar solo una de sus fases, de manera que se puede analizar mediante el método gráfico.

Se toma la tensión de alimentación como referencia:

$$\mathbf{V_{AN}} = V_{AN} \angle 0^\circ \text{ V}$$

Por división de tensión en el circuito.

$$V_{BN} = V_{CN} = V_{AN} (-X_{c1}) / [X_{eq} - X_{c1}]$$

Sustituyendo $X_{eq} = X_{AB}$ y despejando para la relación X_{c1}/X_{AB}

$$X_{c1}/X_{AB} = V_{BN} / [V_{BN} - V_{AN}] \quad (3.0)$$

La ecuación (3.0), establece la relación X_{c1}/X_{AB} en función de las tensiones de línea abierta y la tensión de fase de alimentación, mediante el siguiente procedimiento:

i) Suponer un voltaje para las líneas abiertas $V_{CN} = V_{BN} = n V_{AN}$

n es un número entero.

ii) Calcular la relación X_{c1}/X_{AB} a partir de la ecuación (3):

$$X_{c1}/X_{AB} = nV_{AN} / [nV_{AN} - V_{AN}] = n / (n-1)$$

iii) Obtener el voltaje en el transformador equivalente:

$$V_{AB} = V_{AC} = \text{mag} (V_{AN} - V_{BN})$$

$$V_{AB} = V_{AC} = [1 + n^2] V_{AN} \quad (3.1)$$

iv) De la curva de excitación del transformador, encontrar I_{AB} con el valor obtenido de la ecuación (3.1) y determinar:

$$X_{AB} = V_{AB} / I_{AB}$$

v) Determinar el número de veces que X_{AB} es $3X_m$:

$$k = X_{AB} / 3 X_m \text{ por lo que } X_{AB} / X_m = 3k$$

vi) Calcular la relación X_{c1}/X_m a partir de los resultados de los pasos ii) y v):

$$X_{c1}/X_m = (X_{c1}/X_{AB}) (X_{AB} / X_m)$$

Sustituyendo términos:

$$X_{c1}/X_m = (3 k) [n/(n-1)]$$

vii) Se ha obtenido un punto de la gráfica correspondiente al valor supuesto de voltaje en cualquiera de las líneas abiertas B o C, para obtener más valores de la gráfica se debe repetir el procedimiento descrito anteriormente.

Debido a que el procedimiento es repetitivo se ha diseñado un programa de cálculo en MATLAB, al cual se introducen los datos de la curva de magnetización del transformador T_1 y se realizan cada uno de los cálculos. Así la salida del programa nos brinda un gráfico para determinar el valor de la relación X_{c1}/X_m .

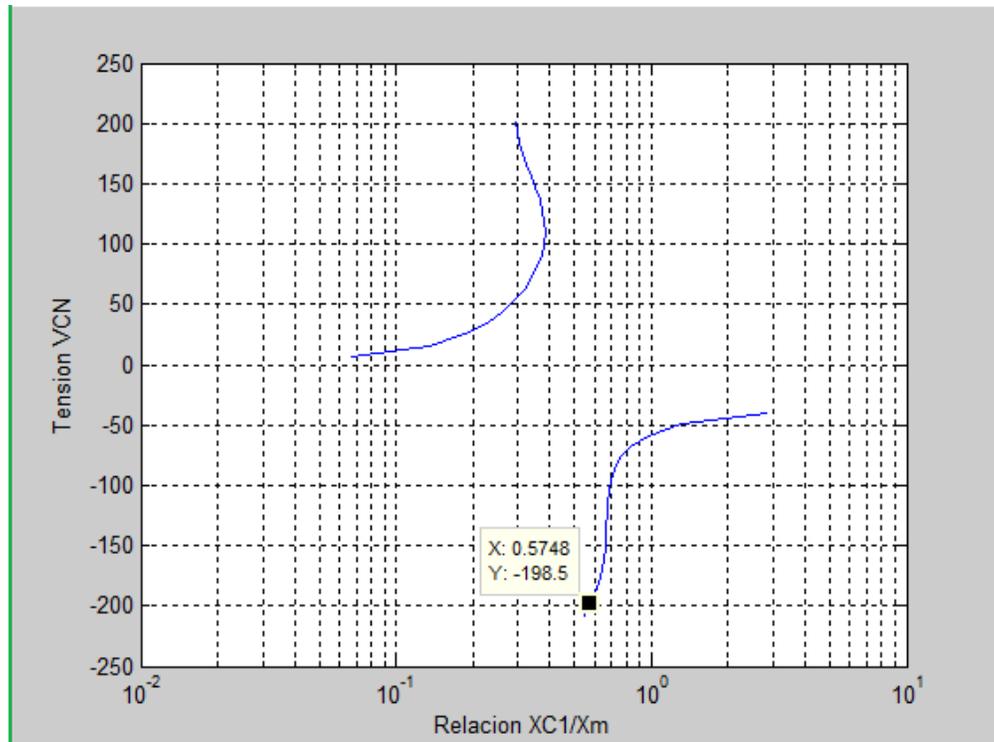


Imagen 3.4. Salida del programa en Matlab, mostrando la variación de la tensión de línea abierta con respecto a tierra obtenida con el método aplicado.

Se observa que conforme el valor de X_{c1}/X_m , disminuye, mayor es el valor de capacitancia del circuito y mayor es la tensión de línea abierta en el lado negativo, correspondiendo al punto de operación de ferresonancia.

También el programa genera una tabla con todos los datos de los cálculos realizados en cada paso del procedimiento, como se muestra en la *imagen 3.5*.

Command Window

	VAN	VCN	XC1/XAB	VAB	XAB/Xm	XC1/Xm
ans =						
	63					
	-220.0000	-207.8461	0.6000	183.3030	0.9092	0.5455
	-210.0000	-198.5197	0.6057	174.5171	0.9490	0.5748
	-200.0000	-189.1932	0.6121	165.7902	0.9827	0.6015
	-190.0000	-179.8668	0.6193	157.1322	1.0078	0.6241
	-180.0000	-170.5404	0.6275	148.5552	1.0225	0.6416
	-170.0000	-161.2140	0.6368	140.0739	1.0267	0.6539
	-160.0000	-151.8875	0.6477	131.7070	1.0212	0.6615
	-150.0000	-142.5611	0.6605	123.4777	1.0077	0.6656
	-140.0000	-133.2347	0.6757	115.4154	0.9883	0.6678
	-130.0000	-123.9083	0.6940	107.5576	0.9652	0.6699
	-120.0000	-114.5818	0.7167	99.9527	0.9399	0.6736

Imagen 3.5 Tabulación de datos de los cálculos realizados por el programa del método gráfico.

Del gráfico mostrado en la *figura 3.4* se toma el valor de la relación $X_{c1}/X_m = 0.5748$, correspondiendo a la peor condición de tensión de línea abierta. Con este valor se puede calcular el valor crítico de capacitancia, y para el caso particular se tiene solo un punto de operación, debido a que no existe un traslape de las curvas de la gráfica.

Por lo tanto:

$$\frac{X_{C1}}{X_m} = 0.5748$$

Despejamos para la reactancia capacitiva critica

$$X_{C1} = X_{C1\text{ critico}} = 0.5748 X_m$$

De los ensayos realizados a T₂ X_m= 1586.25 Ω.

$$X_{C1} = 0.5748 * 1586.25 = 911.78 \Omega$$

$$C_{\text{critica}} = \frac{1}{2 * \pi * f * X_{C1\text{ Critica}}} = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 911.78} = 2.9 \mu\text{F}$$

$$\mathbf{C_{\text{critica}} = 2.9 \mu\text{F}}$$

Este valor de capacitancia representa el valor mínimo que el circuito puede tener para entrar en ferresonancia, ya que, para valores mayores al de la capacitancia crítica, el circuito aumenta la posibilidad de desarrollar el fenómeno. Es importante recordar que entre mayor sea la longitud del cable apantallado utilizado en una subestación, mayor será la capacitancia mostrada por el circuito y a su vez más nocivos los efectos del fenómeno.

El valor critico resultante mediante este método, fue tomado como referencia para comprobar la ocurrencia del fenómeno en las conexiones trifásicas Delta y Estrella vistas en el capítulo 2, con valores mayores y menores en un rango cercano al valor crítico, haciendo uso de simulaciones y pruebas prácticas. Por lo que los valores de capacitancia para que se dé el fenómeno en la conexión Estrella es de C=1.0 μF, mientras que para la conexión en Delta es C= 2.0 μF y C= 3.0 μF.

3.3 Simulación de circuitos ferresonantes trifásicos en ATPDraw.

Para garantizar que el funcionamiento del módulo ferresonante trabaje bajo condiciones de operación controladas, se realizaron simulaciones en el software ATPDraw, de las conexiones trifásicas Delta-Estrella, Delta-Delta, Estrella- Estrella y Estrella- Delta, con una y dos fases energizadas, a fin de verificar la ocurrencia del fenómeno en cada una de ellas.

Para obtener resultados con mayor exactitud en cada una de las simulaciones, se requiere construir un modelo de cada uno de los transformadores a utilizar.

El modelo se construye utilizando los parámetros del circuito equivalente del transformador obtenidos con los ensayos de vacío y cortocircuito realizados a cada uno de ellos. Y se ingresan mediante la ventana mostrada en la *imagen 3.6*.

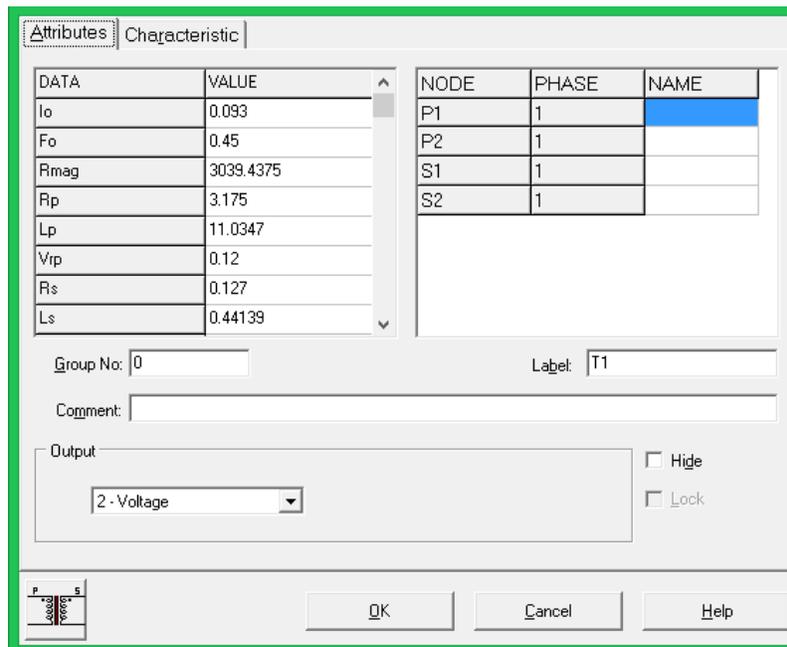


Imagen 3.6. Parámetros de simulación para modelo de transformador saturable en ATPDraw.

Puede observarse que la ventana requiere una serie de datos que es necesario colocar, así como los datos de su característica magnética.

La imagen 3.7 muestra la curva de magnetización obtenida a partir de las mediciones reales.

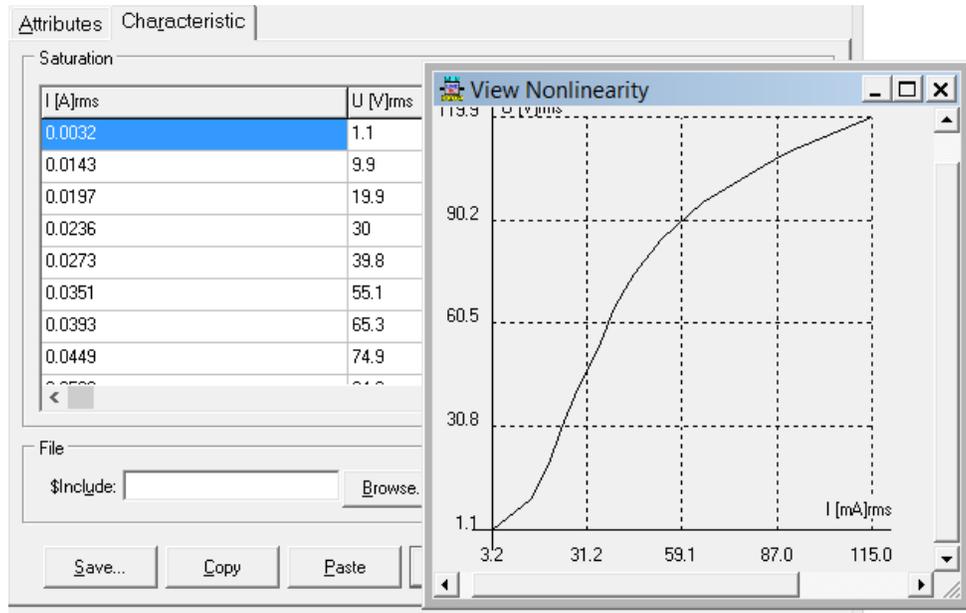


Imagen 3.7. Curva característica real del transformador ingresada al modelo de ATPDraw.

Los parámetros ingresados en ATP para cada transformador son:

Para transformador T₁

$$I_o = \frac{I_{oc}}{a} = \frac{0.465}{5} = 0.093 \text{ A}$$

$$\varphi_0 = \frac{\sqrt{2} * V_{rms}}{2 * \pi * f} = \frac{\sqrt{2} * (120)}{2 * \pi(60)} = 0.45$$

$$R_p = 3.175 \Omega, R_s = 0.127 \Omega.$$

$$R_{mag} = 3039.44 \Omega, X_{otp} = 0$$

$$V_{rp} = 0.12 \text{ kV}, V_{rs} = 0.024 \text{ kV}$$

$$RMS = 1$$

$$L_H = \frac{X_H}{2\pi * f} = \frac{4.16}{2\pi * (60)} = 11.0347 \text{ mH}$$

$$L_S = \frac{X_L}{2\pi * f} = \frac{0.166}{2\pi * (60)} = 0.44139 \text{ mH}$$

Para Transformador T₂

$$I_o = \frac{I_{oc}}{a} = \frac{0.442}{5} = 0.0884 \text{ A}$$

$$\varphi_0 = \frac{\sqrt{2} * V_{rms}}{2 * \pi * f} = \frac{\sqrt{2} * (120)}{2 * \pi * (60)} = 0.45$$

$$R_p = 3.0 \Omega, R_s = 0.12 \Omega.$$

$$R_{mag} = 2638.0 \Omega. \quad X_{otp} = 0$$

$$V_{rp} = 0.12 \text{ kV}, V_{rs} = 0.024 \text{ kV}$$

$$RMS = 1$$

$$L_H = \frac{X_H}{2\pi * f} = \frac{4.25}{2\pi * (60)} = 11.273 \text{ mH}$$

$$L_S = \frac{X_L}{2\pi * f} = \frac{0.17}{2\pi * (60)} = 0.451 \text{ mH}$$

Para transformador T₃

$$I_o = \frac{I_{oc}}{a} = \frac{0.432}{5} = 0.0864 \text{ A}$$

$$\varphi_0 = \frac{\sqrt{2} * V_{rms}}{2 * \pi * f} = \frac{\sqrt{2} * (120)}{2 * \pi * (60)} = 0.45$$

$$R_p = 3.069 \Omega.$$

$R_s = 0.1227 \Omega$.

$R_{mag} = 2657.055 \Omega$, $X_{otp} = 0$

$V_{rp} = 0.12 \text{ kV}$, $V_{rs} = 0.024 \text{ kV}$

$RMS = 1$

Inductancias de dispersión:

$$L_H = \frac{X_H}{2\pi * f} = \frac{4.159}{2\pi * (60)} = 11.032 \text{ mH}$$

$$L_S = \frac{X_L}{2\pi * f} = \frac{0.166}{2\pi * (60)} = 0.4411 \text{ mH}$$

Las simulaciones que se verán a continuación, se realizaron utilizando la siguiente configuración del programa ATP, como lo muestran las imágenes 3.8 y 3.9.

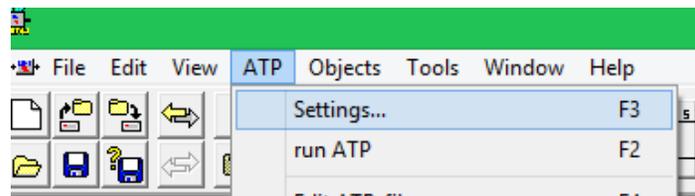


Imagen 3.8. Accediendo al menú ATP para abrir ventana de configuración.

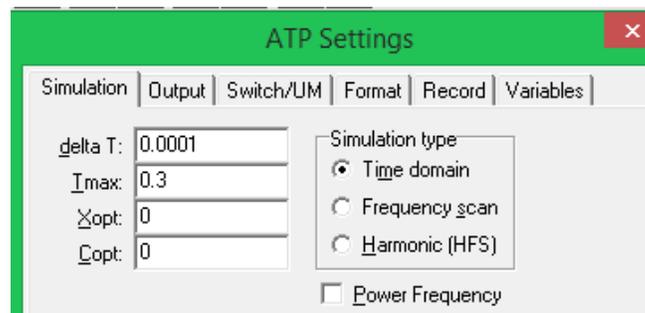


Imagen 3.9. Ventana de configuración con parámetros de configuración.

Esta configuración es importante, ya que en función del valor de los parámetros X_{opt} y C_{opt} , el software puede procesar correctamente los datos ingresados en el modelo del transformador con sus unidades respectivas, según se indicó en la *imagen 3.7*, de lo contrario los resultados obtenidos serán incorrectos.

3.3.1 Simulación de conexión Estrella-Estrella con una fase energizada

$V_A = 120.4 \text{ V}_{rms}$ y capacitancias de $1.0 \mu\text{F}$

En la *imagen 3.10*, se muestra el esquema utilizado en ATP-Draw para simular la conexión Estrella – Estrella, cada elemento del circuito está debidamente etiquetado (transformadores, capacitores, fuente de alimentación, etc.), los medidores están etiquetado con la letra *I*, en el caso de los amperímetros, éstos están colocados para medir la corriente por fase, los medidores de tensión se colocan en las bobinas primarias y capacitores.

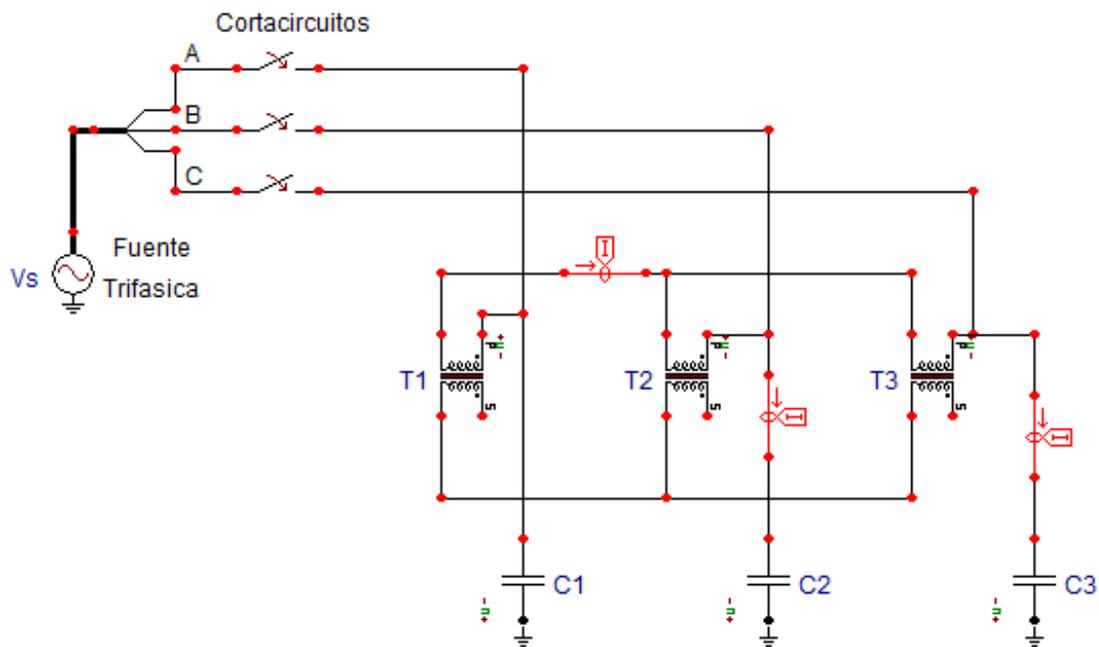


Imagen 3.10 Esquema de simulación en ATPDraw para conexión Estrella - Estrella.

Además, se utiliza una fuente de alimentación trifásica y seccionadores monopolares, que nos permiten desarrollar los diagramas equivalentes presentados en el *capítulo 2*. En la fase A correspondiente al transformador T_1 se conecta la fuente de alimentación V_s , y las fases B, C (transformadores T_2 y T_3 , respectivamente) en circuito abierto, a la salida se ubican los capacitores de $1.0 \mu\text{F}$ en representación de cables de potencia apantallado.

En la *imagen 3.11*, se presenta los resultados de la simulación aplicando una tensión de $120.4\text{V}_{\text{rms}}$. Se pueden observar las formas de onda de tensión resultante al aplicar tensión nominal al transformador energizado.

De las graficas se puede ver claramente como dicha forma de onda no es sinusoidal y presenta distorsión apreciable, las sobretensiones en bobinas primarias son evidentes, ya que se aplican 120 voltios a la entrada y en bobinas de los transformadores se mide 169.53V , esto es mucho más que el voltaje nominal. Por tal motivo, podemos ver que el circuito está saturado y presenta ferresonancia. Según los tipos de regímenes vistos anteriormente, podemos establecer que el régimen simulado es de tipo fundamental.

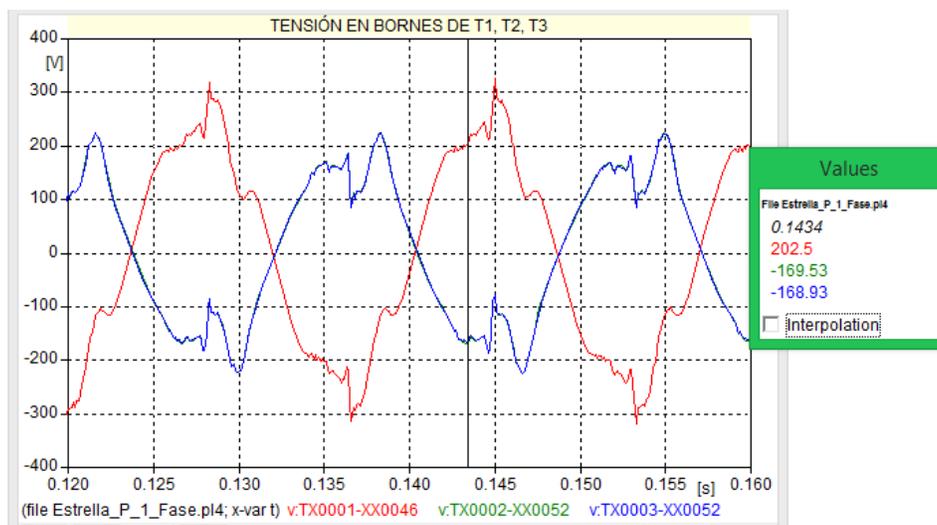


Imagen 3.11. Gráfico de tensiones en el primario de los transformadores, simulación estrella – estrella con capacitancia $1.0 \mu\text{F}$.

En la *imagen 3.12*, se muestran las formas de onda de la corriente que circula por los transformadores, aspectos a destacar es que la forma de onda resultante es característica de un transformador con el núcleo saturado. Además, si se observa el recuadro derecho se puede notar la división de tensión simétrica que proponía el circuito equivalente para esta conexión, visto en el *capítulo 2*, esto nos indica que se está frente a un fenómeno ferresonante.

También observar los valores de corriente manejados en el circuito, es una corriente de línea del orden de 0.485 A. Si se compara este valor con la corriente nominal en el primario, al incrementar la tensión de la fuente de alimentación el circuito real puede verse comprometido por exceso de corriente.

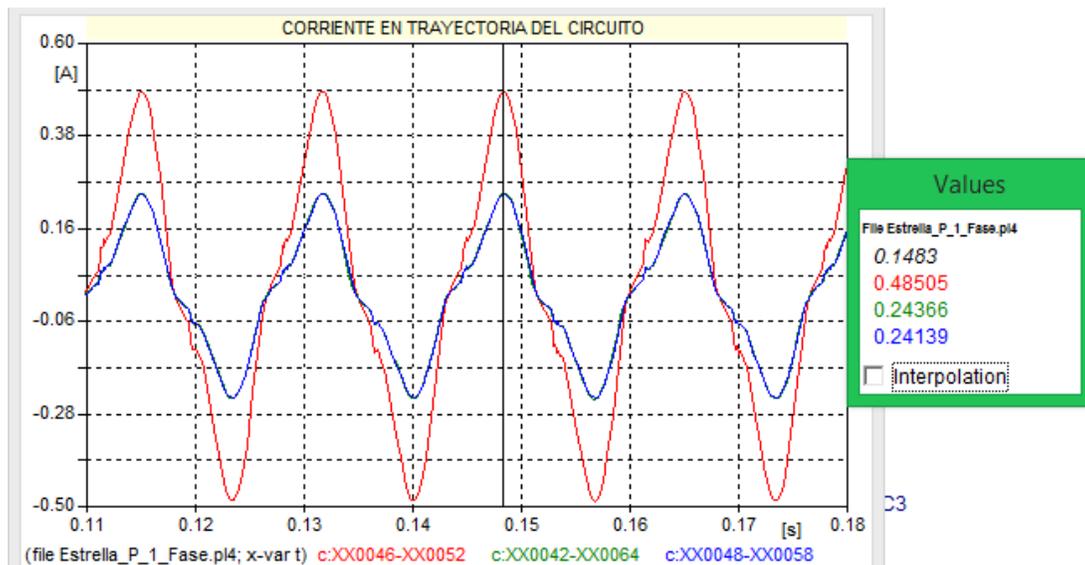


Imagen 3.12. Gráfico de señales de corriente, simulación estrella – estrella, una fase energizada.

En la *imagen 3.13*, se muestran las sobretensiones exageradas que sufre el circuito, establecidas en la capacitancia a tierra del circuito, en este caso los capacitores de 1.0 μ F. Las magnitudes oscilan por arriba de los 450 V, cuando en la entrada se alimentó con 120

voltios. Este efecto de sobretensión en los capacitores es consecuencia de la ferresonancia, aunque hay que destacar que la forma de onda de los capacitores no se ve distorsionada

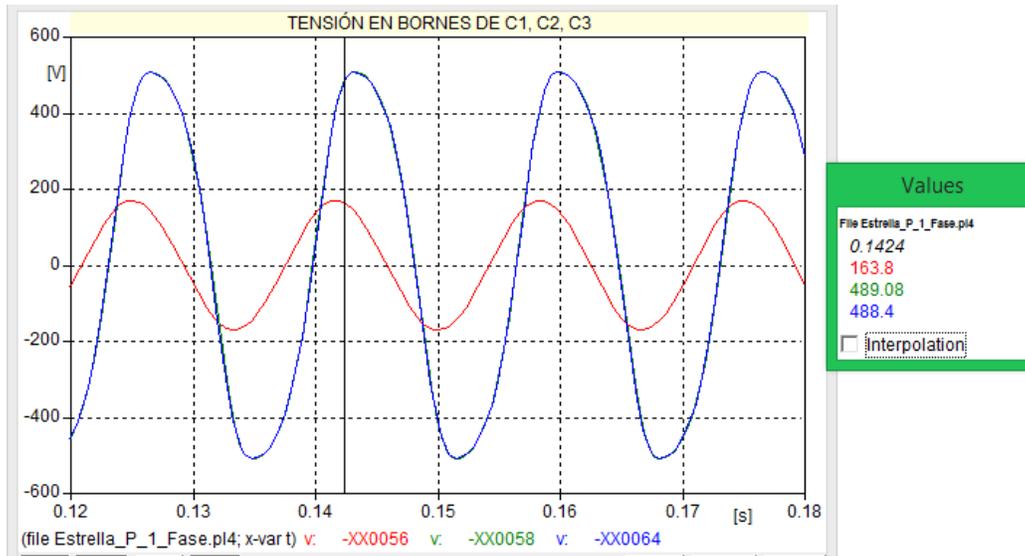


Imagen 3.13. Formas de onda en las capacitancias a tierra de $1.0\mu\text{F}$, conexión estrella – estrella.

3.3.2 Simulación de conexión Estrella-Estrella con dos fases energizadas

$V_A = 120.4 \text{ Vrms}$, $V_B = 120.4 \text{ Vrms}$, y capacitancias de $1.0 \mu\text{F}$.

El esquema de circuito presentado en la *imagen 3.14*, representa la simulación del circuito ferresonante en estrella con dos fases energizadas. Para desarrollar esta simulación se estableció un *delay* en el cierre de los cortacircuitos, que vienen a representar las cuchillas monopolares utilizadas en una maniobra de conmutación real, esto se debe a que en la maniobra real la conmutación se hace una a una, con esto se pretendió eliminar las componentes de error al simular dicha maniobra. En esta simulación las fases energizadas fueron A y B, pero el orden es indiferente.

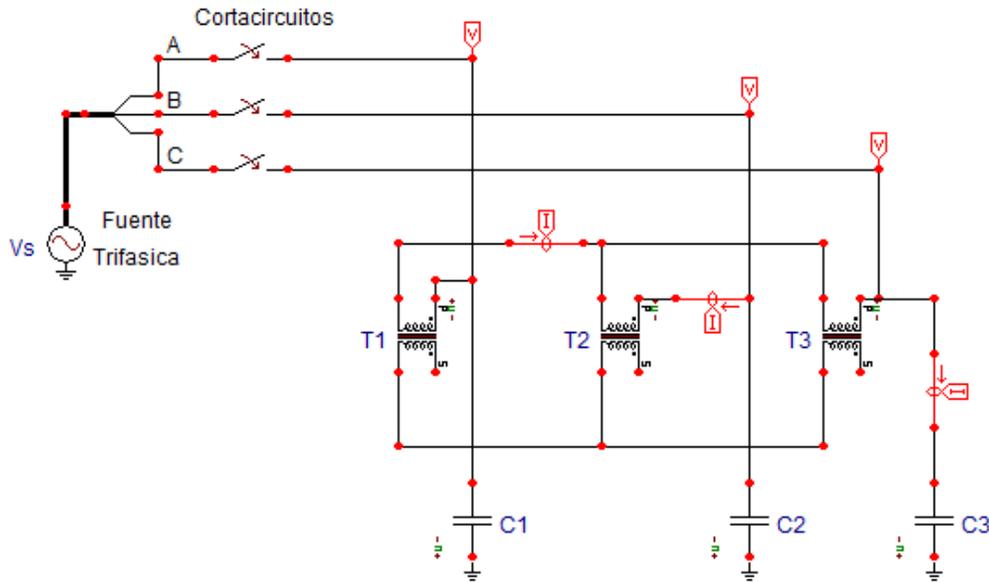


Imagen 3.14. Esquema de simulacion en ATPDraw de conexión estrella - estrella con dos fases energizadas.

En la imagen 3.15, se presentan las formas de onda de tension en los bornes primarios de los transformadores, mostrando distorsión. Pero, las sobretensiones no estan presentes en el circuito, ya que estan por debajo del valor de alimentacion que es 120 V rms, esto indica que el circuito no se encuentra en un estado de ferresonancia. Y que la distorsion que observamos solo es resultado de la alimentancion de la conexión realizada.

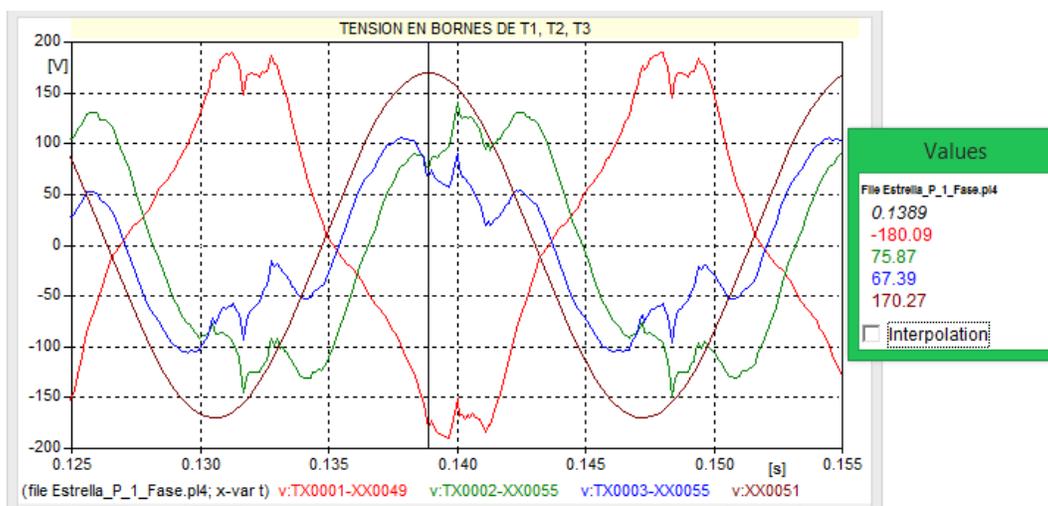


Imagen 3.15. Gráfico de tensión en la bobina primaria de cada transformador conexión estrella – estrella.

La *imagen 3.16*, muestra la forma de onda de corriente que se generó al simular la condición deseada (dos líneas energizadas), como se puede ver dichas formas de ondas no son de un transformador saturado. Además, los valores de corriente apenas sobrepasan los 0.179 amperios, esto es ligeramente mayor que la corriente de vacío que en el caso de los transformadores utilizados sería de 0.1A. Pero es demasiado insignificante para las características que el fenómeno ferroresonante debería de manifestar, por tal razón se deduce que el circuito no sufre el fenómeno

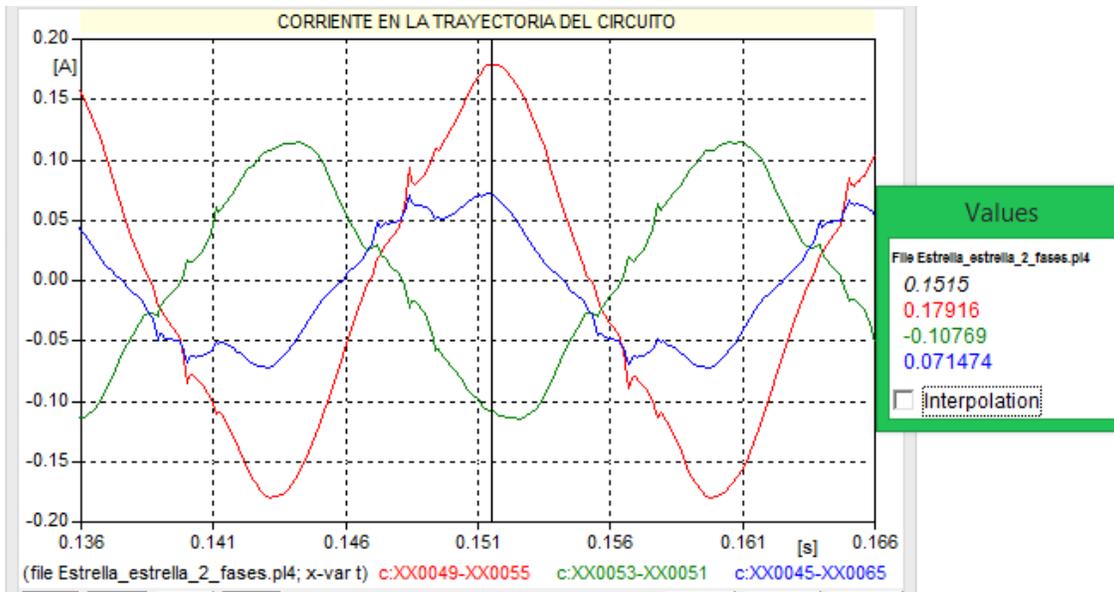


Imagen 3.16. Gráfico de la corriente, simulación estrella - estrella, con dos fases conectadas.

En la *imagen 3.17*, están las gráficas resultantes de las tensiones generadas en las capacitancias a tierra. Como podemos ver los valores están muy por debajo de los esperados, incluso por debajo de la tensión de alimentación, en este caso 120 V rms, esto nos vuelve a confirmar que el fenómeno no se presenta en el circuito simulado.

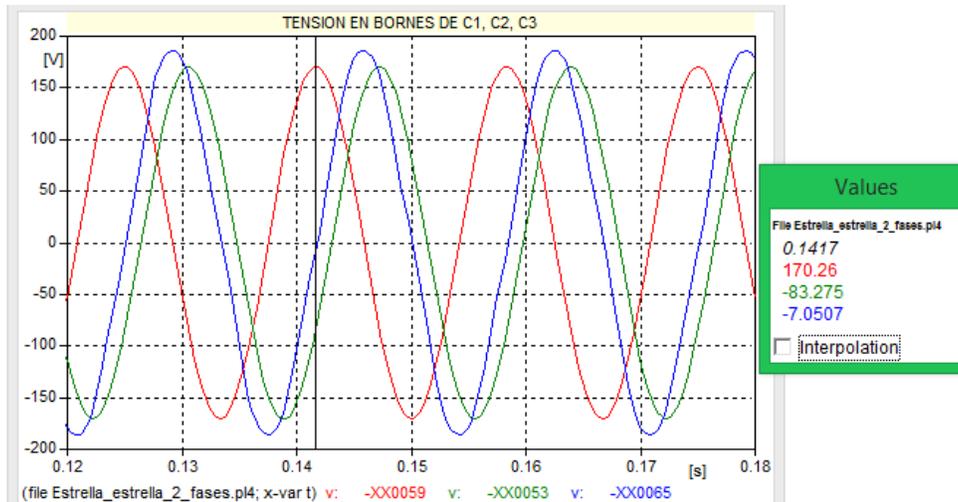


Imagen 3.17. Gráfico de tensiones en los capacitores conexión estrella – estrella, con dos fases energizadas.

3.3.3 Simulación de conexión Delta-Estrella con una fase energizada con $V_A = 120.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$.

En este apartado, se utilizó el ATP-Draw para simular la conexión delta- estrella. En la imagen 3.18, se presenta el esquema de circuito de dicha conexión. En esta conexión se utilizaron capacitancias a tierra de $2.0 \mu\text{F}$.

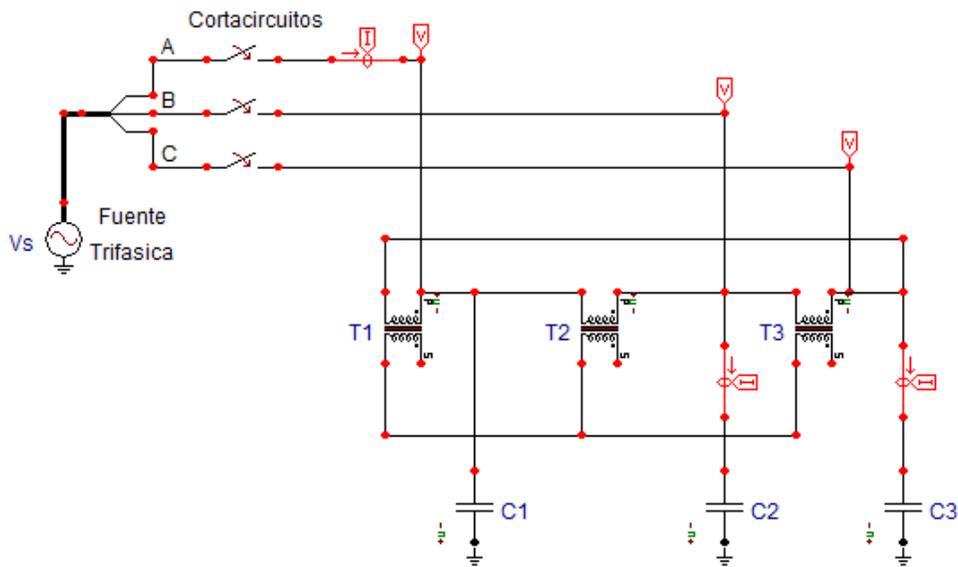


Imagen 3.18. Esquema de simulación en ATP-Draw para conexión Delta-Estrella.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones para la conexión Delta-Estrella para una fase conectada con valores de capacitores de $2.0 \mu\text{F}$ y $3.0 \mu\text{F}$, donde se podrá observar que el valor de capacitancia afecta en el desarrollo y aparición del fenómeno.

En la *imagen 3.19*, se muestran las formas de tensión que se generaron en las bobinas de los transformadores, claramente se observa el transitorio que precede a la ferresonancia. Se observan en el recuadro de la derecha las sobretensiones existentes en las bobinas de los transformadores, estos valores están por arriba del voltaje aplicado a la entrada $V_s = 120 \text{ Vrms}$. Cabe destacar que el transformador T_2 presenta una tensión mínima alrededor de 28 voltios, esto se debe a la configuración que se establece cuando el circuito entra en funcionamiento a una fase.

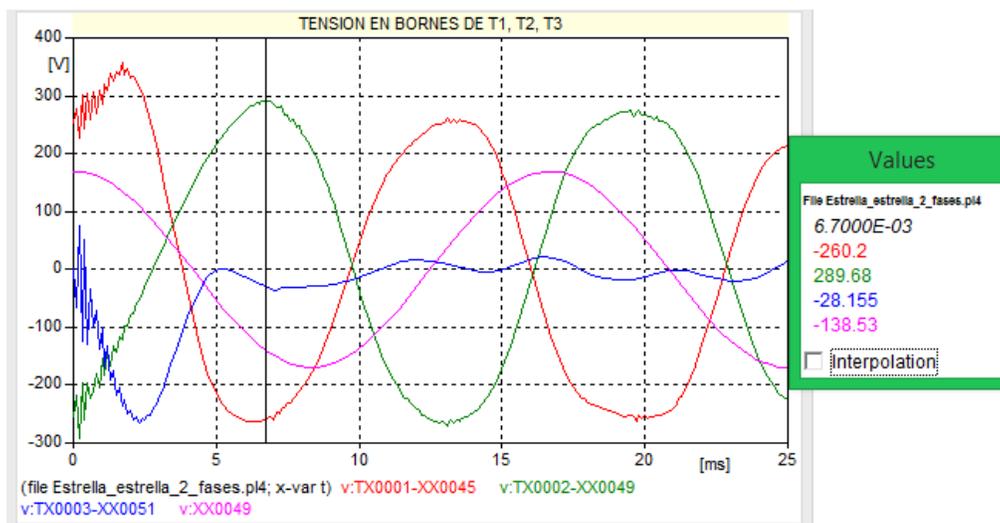


Imagen 3.19. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta – Estrella, con una fase energizada y $C = 2.0 \mu\text{F}$.

Con respecto a las corrientes, en la *imagen 3.20*, se muestran las formas de onda saturada cuando el circuito entra en ferresonancia, destacar que la corriente de alimentación se divide por simetría y circula por los capacitores C_2 y C_3 complementando a través de ellos el circuito RLC. También se observa que una pequeña cantidad de corriente queda circulando

a través de la Delta, esto se debe a que los transformadores tienen ligeras variaciones en su fabricación. Además, el valor de la corriente de alimentación ronda el 80% de la corriente nominal de 1.0 A, en el caso de los transformadores utilizados.

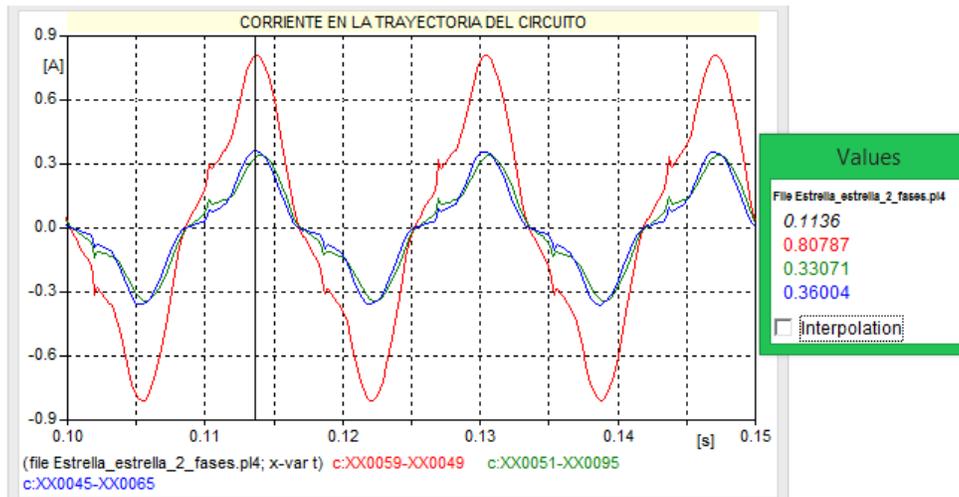


Imagen 3.20. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, una fase energizada con 2.0 μ F.

En la imagen 3.21, se muestran las sobretensiones en las capacitancias a tierra en este caso C2 y C3. Estas sobretensiones están por encima de los 300 voltios, esto quiere decir que la ferresonancia está establecida en el circuito.

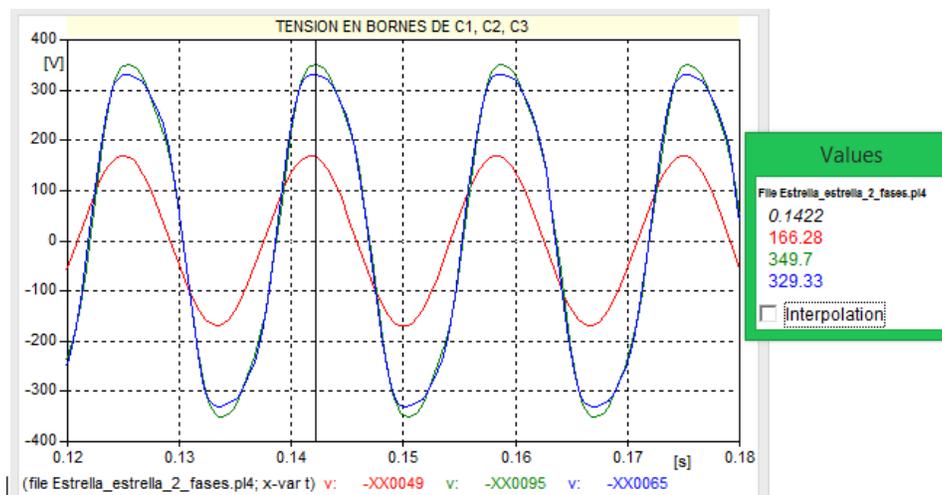


Imagen 3.21. Tensiones en capacitores de conexión Delta -Estrella con una fase y capacitancia de 2.0 μ F.

3.3.4 Simulación de conexión Delta-Estrella con una fase energizada con

$V_A = 120.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$.

En la *imagen 3.22*, se muestra la forma de onda de las tensiones para una conexión Delta, pero con capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$. La deformación se puede observar claramente, las tensiones en bobinas de los primarios muestran sobretensión, esto quiere decir que existe saturación de los núcleos y, por lo tanto, ferresonancia. Además, nuevamente el transformador dos (trazo azul) se muestra con poca tensión, la razón fue explicada en el *capítulo 2*. La diferencia entre los resultados con capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$, se sitúa en la forma de onda, ya que al usar capacitores de $3.0 \mu\text{F}$ se observa una mayor distorsión lo que indica la aparición de más armónicos que alteran la forma de onda de la señal.

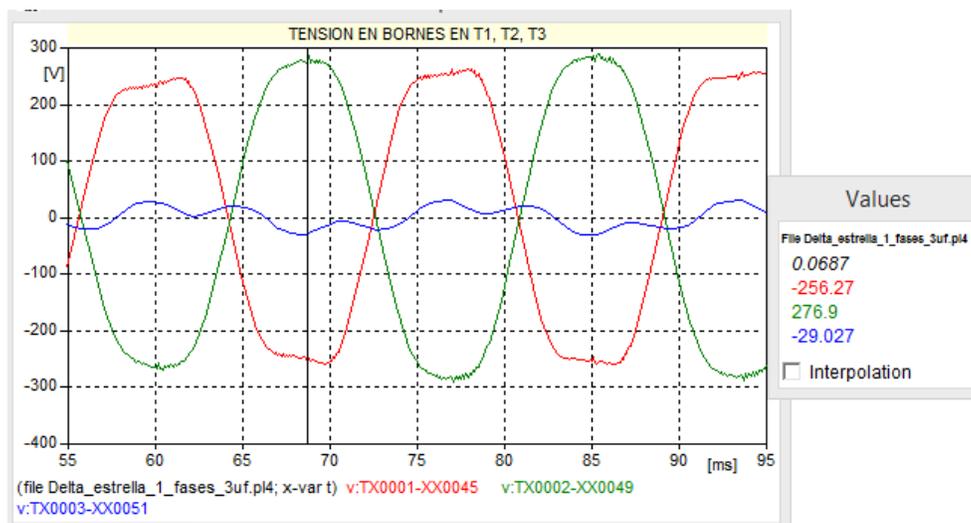


Imagen 3.22. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, una fase energizada con capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$.

La *imagen 3.23*, nos muestra que para el valor de capacitancia de $3 \mu\text{F}$, la corriente de línea llega a 1.3756 A de línea, y por simetría se divide equitativamente por cada ramal del circuito equivalente. La corriente en las bobinas primarias de los ramales activos llega al 60% de la

corriente nominal. Además, la forma de onda que se presenta corresponde a la de un transformador en saturación.

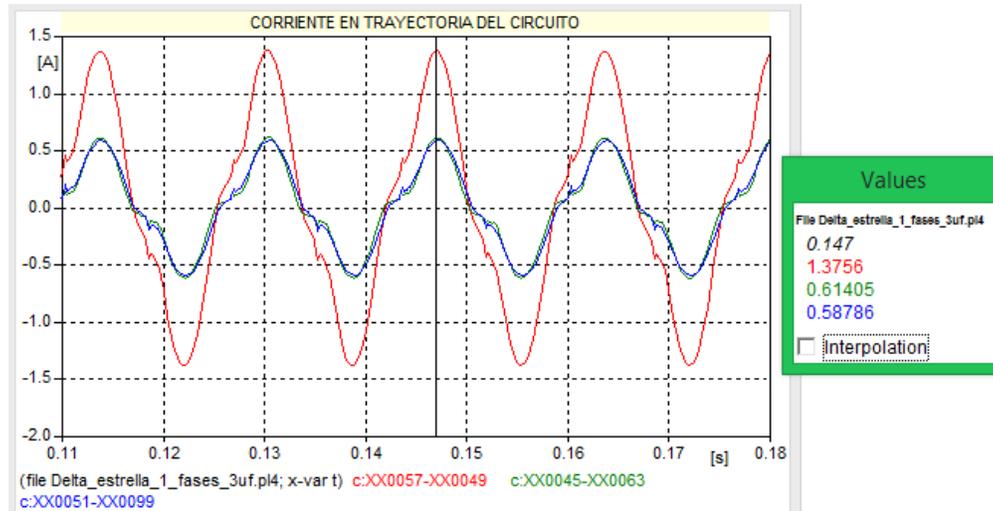


Imagen 3.23. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, una fase alimentada y capacitancia de 3 μ F.

En la imagen 3.24, podemos ver que al pasar de 2.0 μ F a 3.0 μ F tenemos aumentos de casi 100 voltios en las sobretensiones de los capacitores, lo cual también refleja que cambios en la capacitancia puede generar grandes cambios en el desarrollo del fenómeno. Las tensiones sobrepasan los 430 voltios.

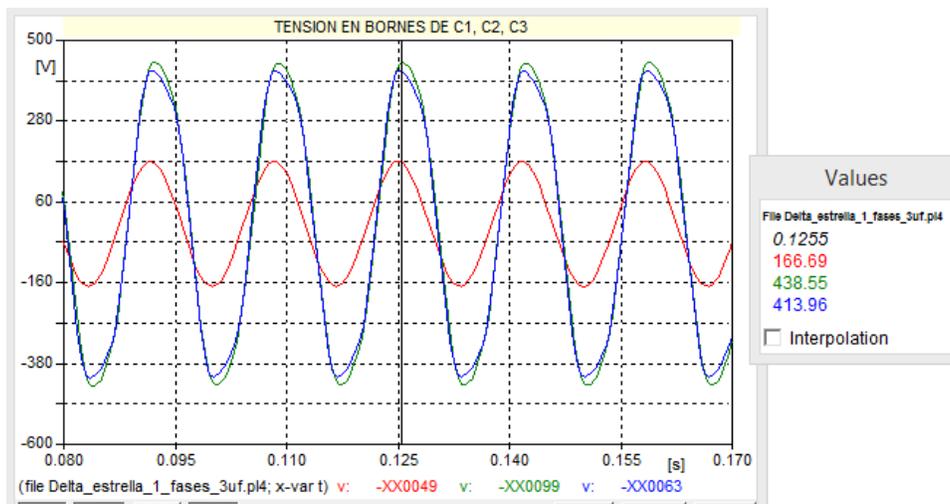


Imagen 3.24. Tensiones en capacitores conexión Delta – Estrella con una fase energizada y capacitancia de 3.0 μ F.

3.3.5 Simulación de conexión Delta-Estrella con dos fases energizadas

$V_A = 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, capacitancias de $2\mu\text{F}$.

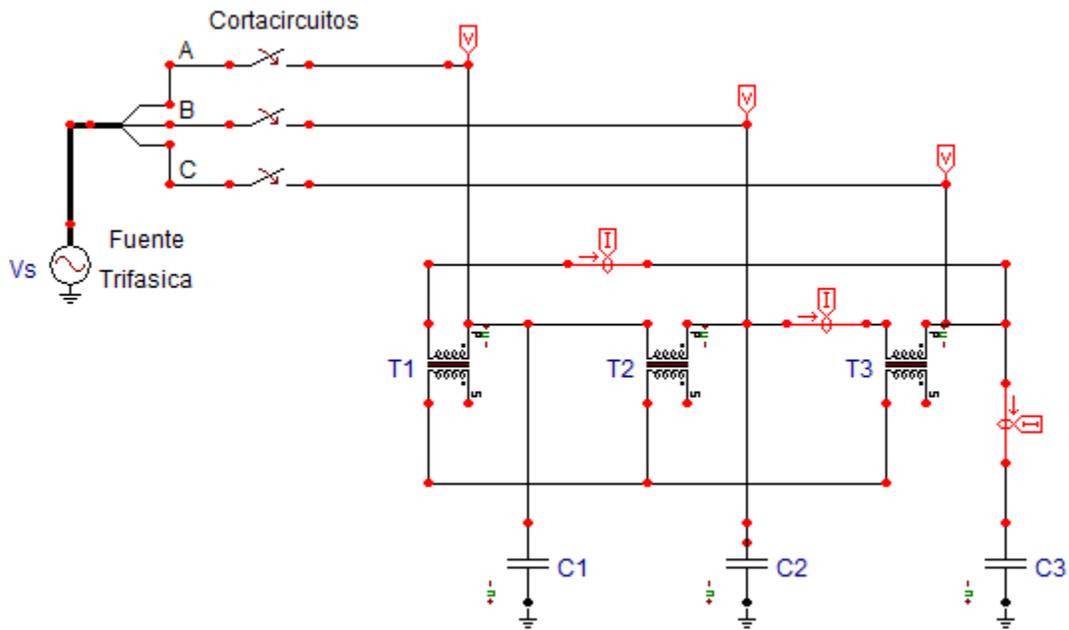


Imagen 3.25. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta - Estrella con dos fases energizadas.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones Delta-Estrella, dichas simulaciones se realizaron con valores de capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$ y $3.0 \mu\text{F}$ para poder ver los efectos de estos valores sobre el circuito resonante.

La imagen 3.26, nos muestra que con este tipo de conexión podemos observar que la mayor sobretensión ocurre en la bobina del transformador T_2 (verde), esto se debe a que las fases que alimentan están situadas en los nodos de sus terminales primarios y ésta no experimenta distorsión visible, las tensiones de T_1 (rojo) y T_3 (azul) presentan distorsiones debido a que a través de sus capacitores se completa el circuito LC. Además, mencionar que las sobretensiones no son considerables y por tal motivo, no existe ferresonancia presente en el circuito.

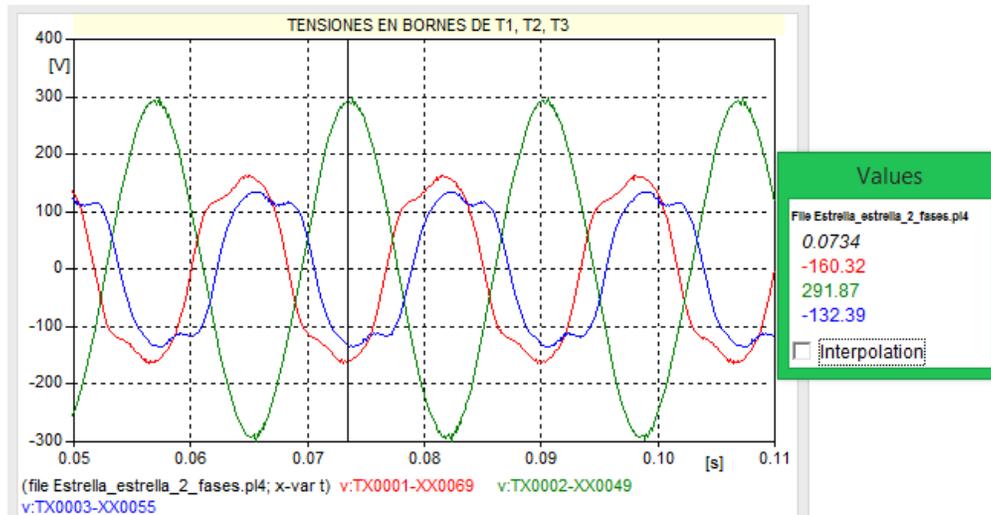


Imagen 3.26. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, dos fases energizadas y $C = 2.0 \mu F$.

En este caso la imagen 3.27, nos muestra que las ondas de corrientes sufren deformaciones debido a la presencia de armónicos, los valores de corriente se mantienen en el rango del 20 % de la corriente nominal, y en los ramales del circuito equivalente del 10% de la corriente nominal, lo cual no representaría un riesgo grande de sobrecorrientes hasta este punto. Y comprueba que la ferresonancia no se ha desarrollado en el circuito.

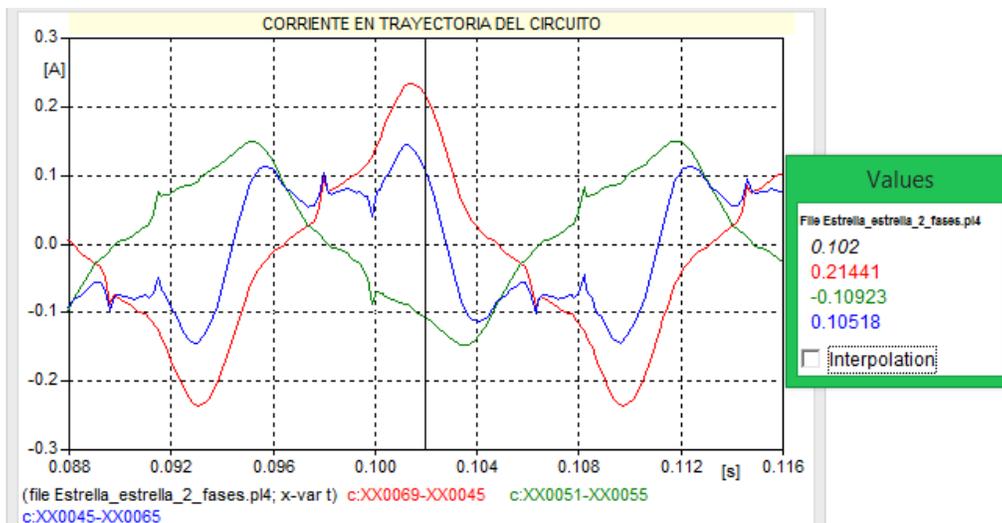


Imagen 3.27. Señales de corriente para conexión Delta – Estrella, dos fases energizadas y capacitancia de $2.0 \mu F$.

En las capacitancias, el que tiene una tensión mayor es C1 (rojo), como se muestra en la *imagen 3.28*. Siendo este por el cual circula mayor corriente y el que más contribuye en la trayectoria LC. Pero estas tensiones son mucho menores que el valor de tensión de alimentación y por lo tanto no hay ferresonancia en el circuito sometido a simulación.

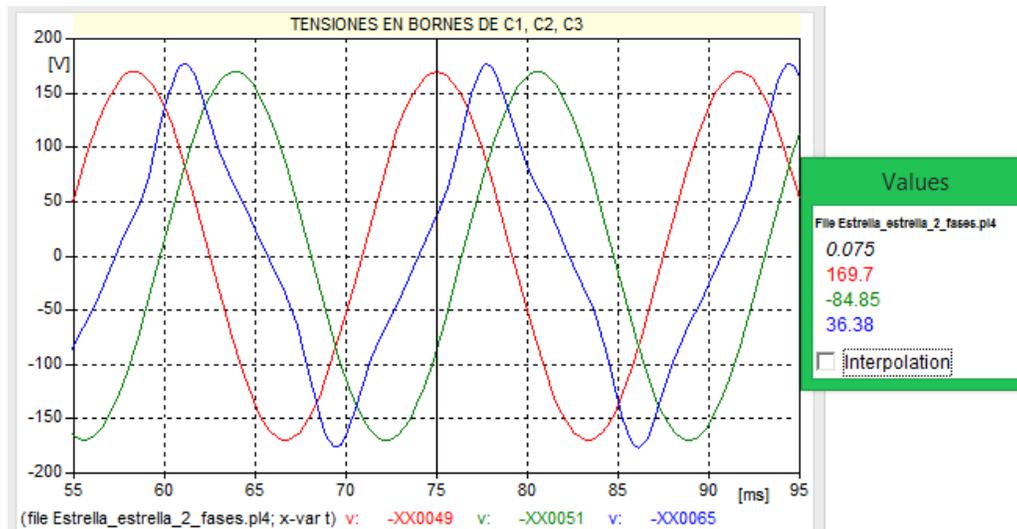


Imagen 3.28. Tensiones en capacitores de conexión Delta - Estrella con dos fases y capacitancia de 2.0 μ F.

3.3.6 Simulación conexión Delta-Estrella con dos fases energizadas $V_A = 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, capacitancias de 3.0 μ F.

En este apartado se utiliza el mismo circuito, pero se aumentó la capacitancia a tierra del circuito, de 2.0 μ F a 3.0 μ F. En la *imagen 3.29*, se observa que ocasiona una mayor distorsión sobre todo en la tensión de T₃ (azul), aunque con respecto a los valores en las tensiones no varían significativamente. Estas distorsiones no son tan significativas para considerar que el circuito entra en ferresonancia, además no hay sobretensiones en las bobinas primarias de los transformadores.

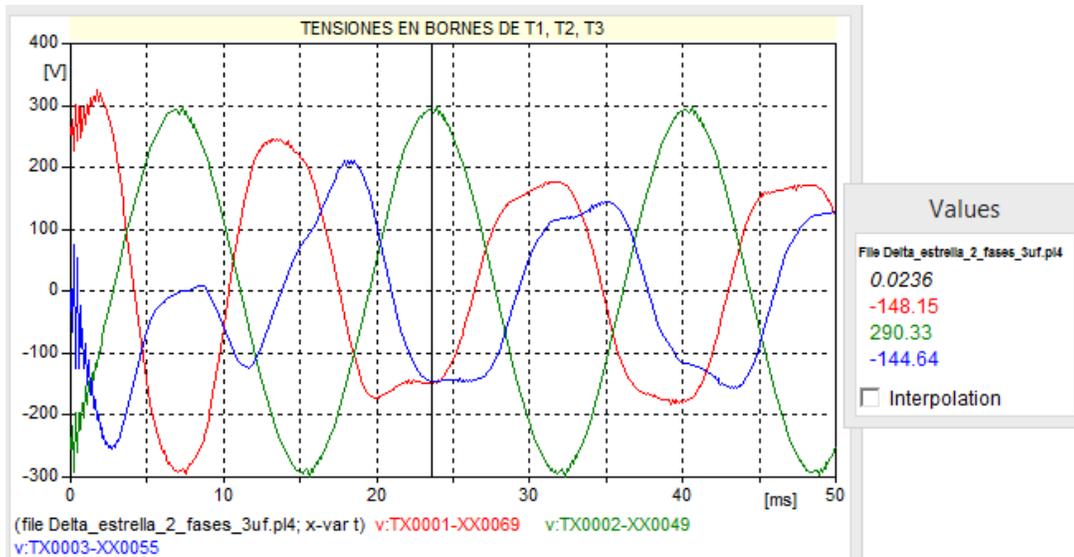


Imagen 3.29. Gráfico de señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Estrella, dos fases energizadas y capacitancias de $3.0 \mu F$.

En la imagen 3.30, se observa el transitorio que genera la conmutación del circuito, las formas de onda están distorsionadas, pero los niveles de corriente son mínimos, esto quiere decir que los transformadores no están saturados y por tal motivo, la ferroresonancia no está presente.

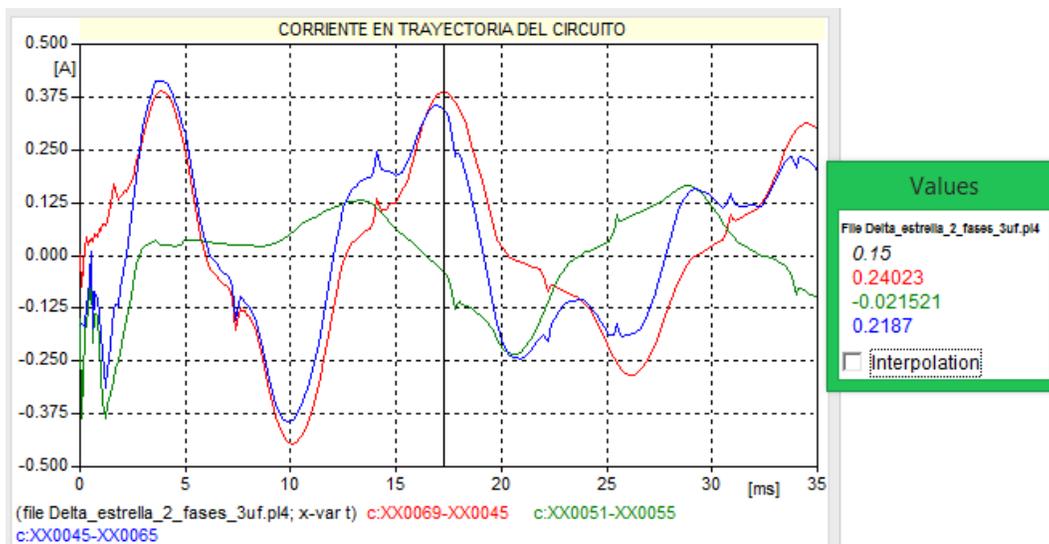


Imagen 3.30. Señales de corriente para conexión delta – estrella, dos fases alimentadas para $3.0 \mu F$.

En la *imagen 3.31*, se muestran las formas de tensión en los bornes de los capacitores, que representan las capacitancias a tierra del equivalente *LC*. Estas tensiones son muy bajas, menores a los 100 voltios, por lo que en el circuito no se presenta en fenómeno.

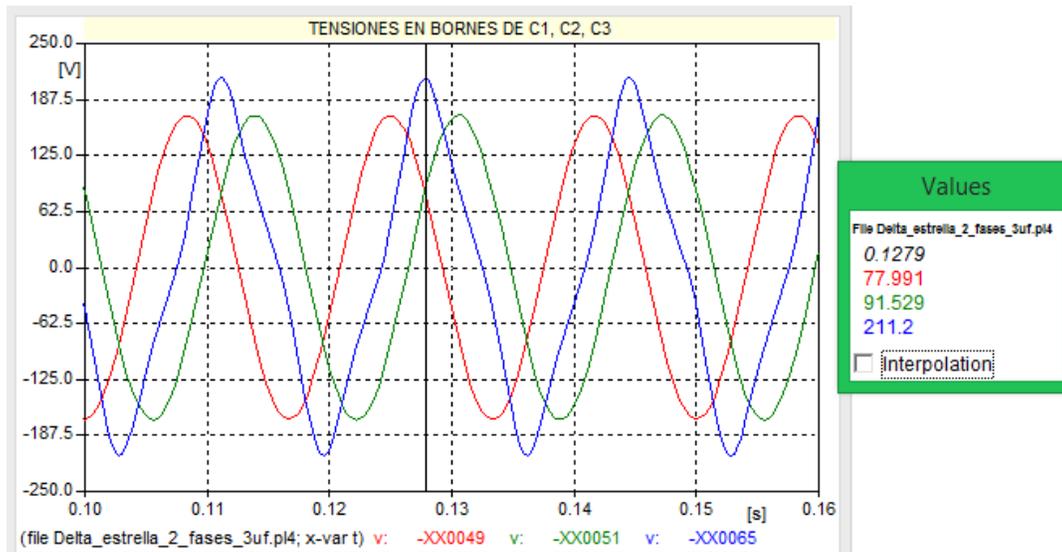


Imagen 3.31 Tensiones en capacitores de conexión Delta – Estrella, con dos fases energizadas y capacitancias de 3.0 μ F.

3.3.7 Simulación conexión Delta-Delta con una fase energizada $V_A= 120.0$ Vrms y capacitancias de $2\mu\text{F}$.

En la *imagen 3.32*, se muestra el esquema de simulación utilizados para observar la ferresonancia en una subestación trifásica conectada en Delta – Delta con capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$.

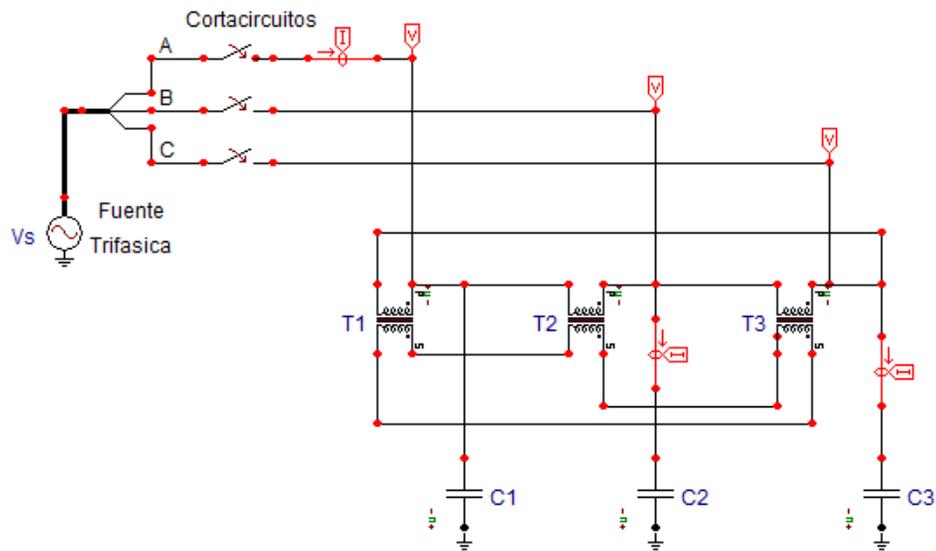


Imagen 3.32. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta – Delta, con una fase energizada.

En la *imagen 3.33*, podemos ver la deformación ocasionada por la ferresonancia en las ondas de tensión de T_1 (rojo) y T_2 (verde) y además por la topología el arrollamiento primario de T_3 (azul) no interviene en el circuito LC.

Las bobinas restantes están siendo sometidos a tensión nominal, a pesar de estar en vacío, esto es una característica clara de ferresonancia en el circuito. La deformación es evidente y el régimen ferresonante presente es de tipo fundamental.

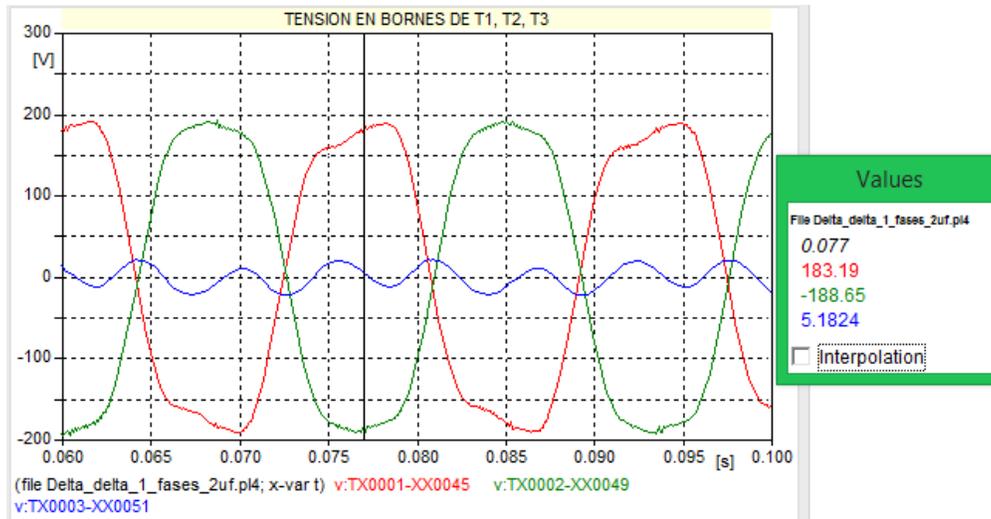


Imagen 3.33. Gráfico de tensión en arrollamientos primarios, conexión Delta-Delta, una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$.

De la imagen 3.34, se observa que las ondas de corriente sufren deformación debido a los armónicos y la ferresonancia presente en el circuito LC resultante. Además, por la topología del mismo, la corriente se divide casi simétricamente. Es de resaltar que la corriente mayor del sistema es el 80 % de la corriente nominal de los transformadores. Este tipo de forma de onda está ligada normalmente a transformadores saturados, otra característica de la ferresonancia (saturación aun cuando la subestación está operando en vacío).

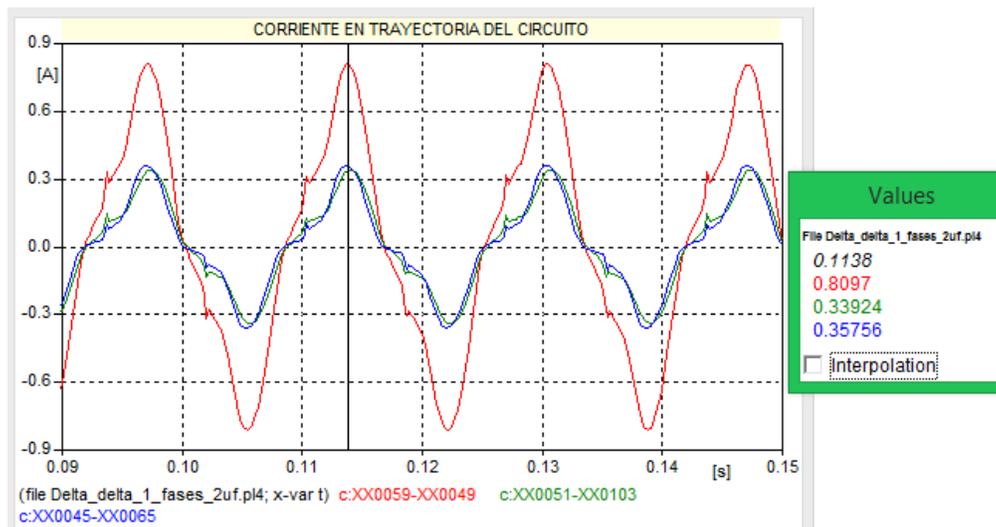


Imagen 3.34. Señales de corriente para conexión Delta-Delta, una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$.

Observamos en la *imagen 3.35*, que la mayor sobre tensión en los capacitores ocurre en C_2 (verde) y C_3 (azul) y esto concuerda con el hecho de que son ellos los que completan la trayectoria del circuito LC resonante.

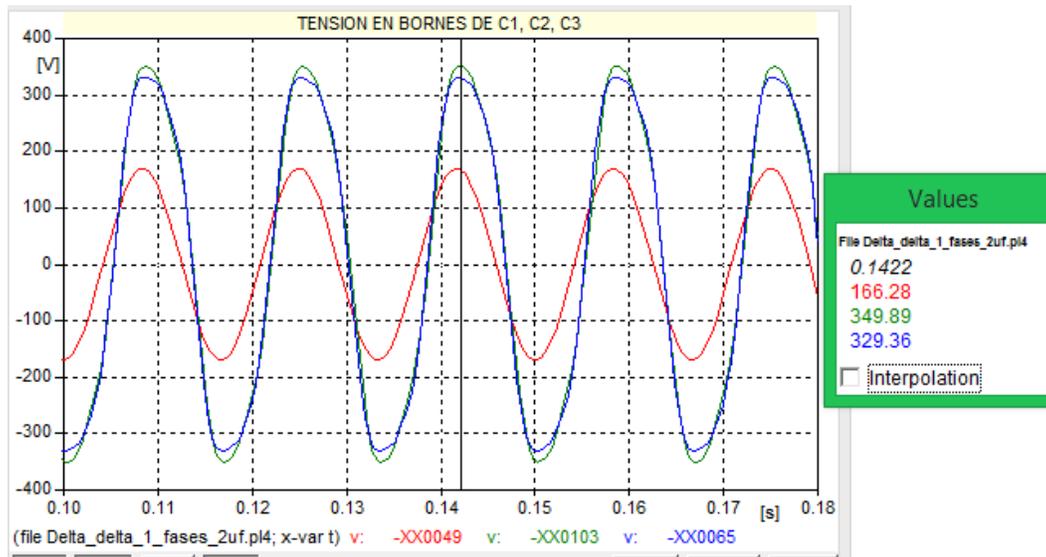


Imagen 3.35. Formas de ondas en capacitores conexión Delta – Delta, con una fase energizada y capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$.

3.3.8 Simulación conexión Delta-Delta con una fase energizada $V_A = 120.0 \text{ Vrms}$ y capacitancias de $3.0 \mu\text{F}$.

Continuando con la topología anterior, pero con una capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$. En la *imagen 3.36*, se observa una reacción más violenta del sistema, ya que la tensión aumenta a niveles arriba de 250 voltios en los bobinados de los transformadores, como se observa en el recuadro de la derecha. Y nuevamente la bobina de T_3 no contribuye a la trayectoria ferroresonante debido a la simetría del circuito equivalente, ya que los bornes del transformador se encuentran al mismo nivel de tensión, y esto genera que la corriente que circule por el mismo sea mínima.

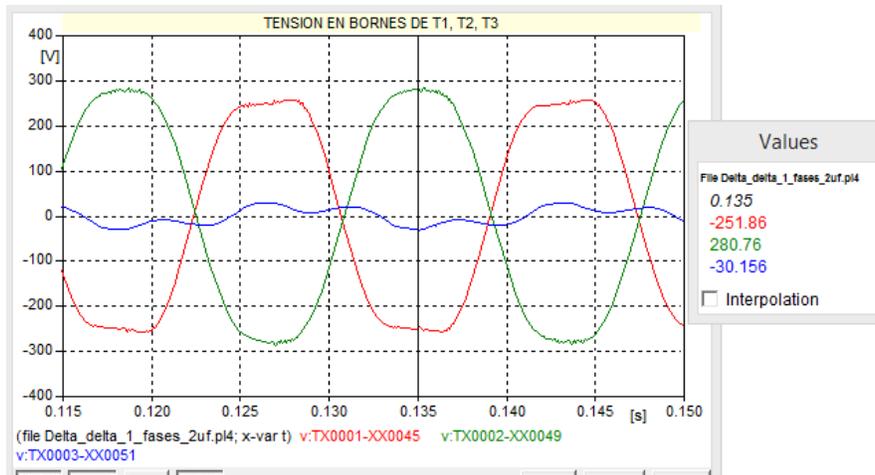


Imagen 3.36. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta - Delta, una fase energizada y capacitancia de $3.0 \mu F$.

En la imagen 3.37, se observa que la capacitancia de $3.0 \mu F$ contribuye a que la corriente de línea de un valor máximo que rebaza un 37% la corriente nominal de los transformadores (1 amperio), lo cual significa que en un sistema real esto ocasionaría una falla catastrófica para el sistema si las protecciones no funcionaran. También la forma de onda de corriente es como las vistas anteriormente cada vez que el estado de ferresonancia ocurre, mostrando un comportamiento de un transformador saturado. Por otro lado, se sigue manteniendo la división de corriente simétrica en cada rama del circuito equivalente de la conexión trifásica.

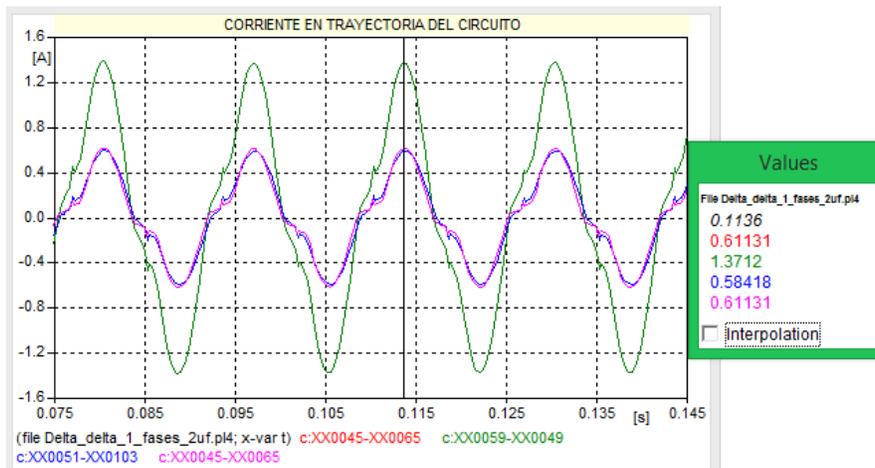


Imagen 3.37. Señales de corriente para conexión Delta – Delta, una fase energizada y capacitancia de $3.0 \mu F$.

En la *imagen 3.38*, se observa que en los capacitores que simulan las capacitancias a tierra del circuito LC, presentan tensiones alrededor de los 430 voltios. Esto representa un aumento de 100 voltios con respecto a la obtenida con capacitancia de $2.0 \mu\text{F}$. Este aumento es muy significativo porque alerta de la capacidad del fenómeno de generar daños en los equipos, con solo cambiar ciertas condiciones iniciales al momento de realizar las maniobras de conmutación.

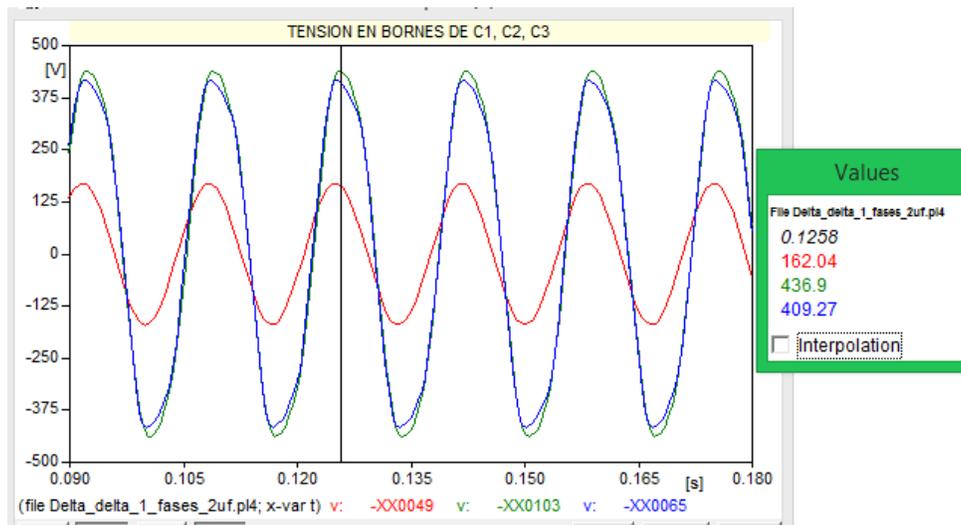


Imagen 3.38. Tensiones en capacitores de conexión Delta–Delta con una fase energizada y capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$.

3.3.9 Simulación conexión Delta-Delta con dos fases energizadas $V_A = 120.0$ Vrms, $V_B = 120.0$ Vrms, y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$.

En este apartado se presenta el ultimo circuito simulado en ATP-Draw, la conexión realizada es la Delta-Delta con dos líneas energizadas y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$. En la *imagen 3.39*, se muestra el esquema general de la conexión, para verificar la ocurrencia del fenómeno.

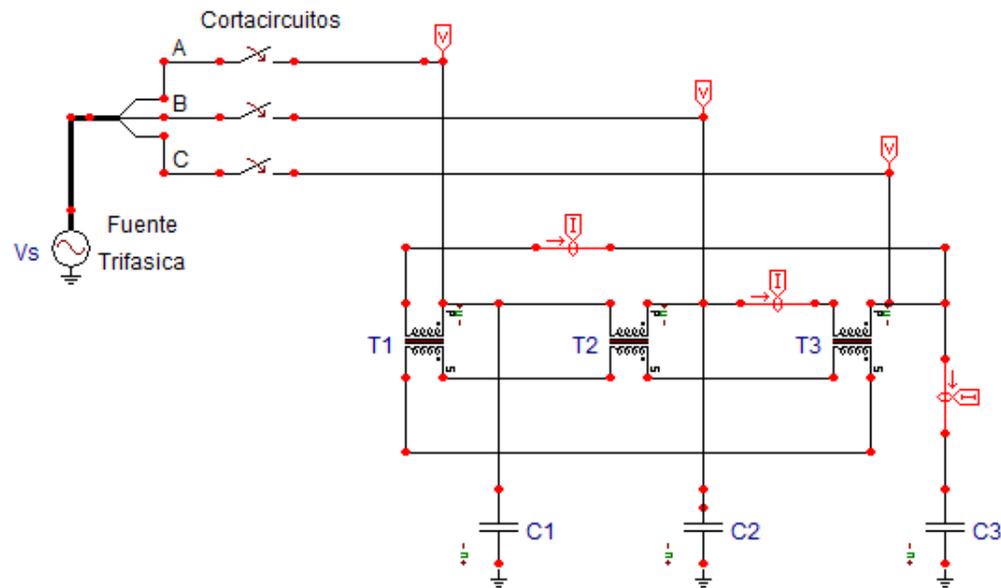


Imagen 3.39. Esquema de simulación ATPDraw conexión Delta - Delta, con dos fases energizadas y capacitancias $C = 2.0 \mu\text{F}$.

En la *imagen 3.40*, podemos ver a las señales de tensión de los transformadores T₁ (rojo) y T₃ (azul) deformadas, sin embargo, la señal de T₂ (verde) parece estar en una forma estable. Las sobretensiones no son significativas, para ser consideradas como resultado de un fenómeno ferroresonante.

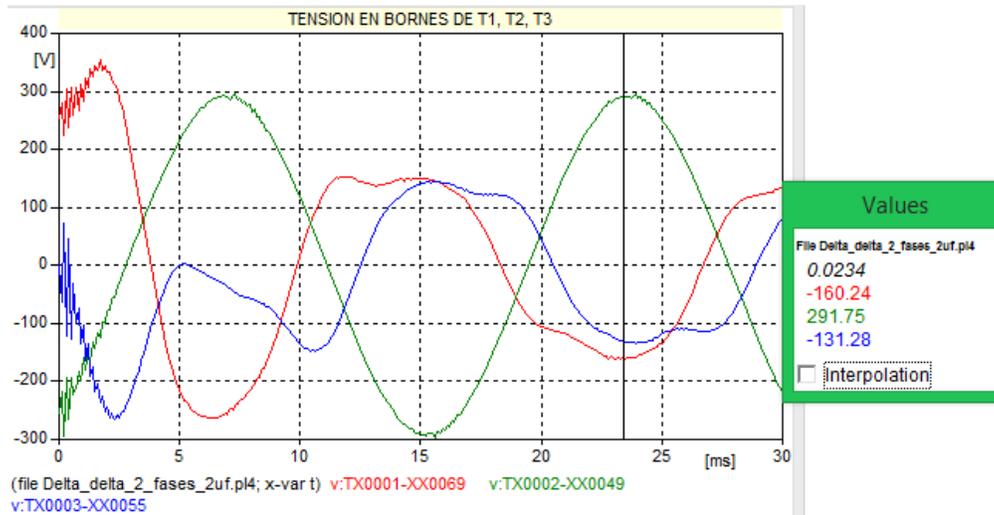


Imagen 3.40. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta-Delta, dos fases energizadas y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$.

Con respecto a lo observado en la imagen 3.41, las corrientes que circulan en el circuito no significan un riesgo para los transformadores, en vista de que no tiene lugar el fenómeno. Las deformaciones son evidentes, pero son atribuidas a la topología del circuito.

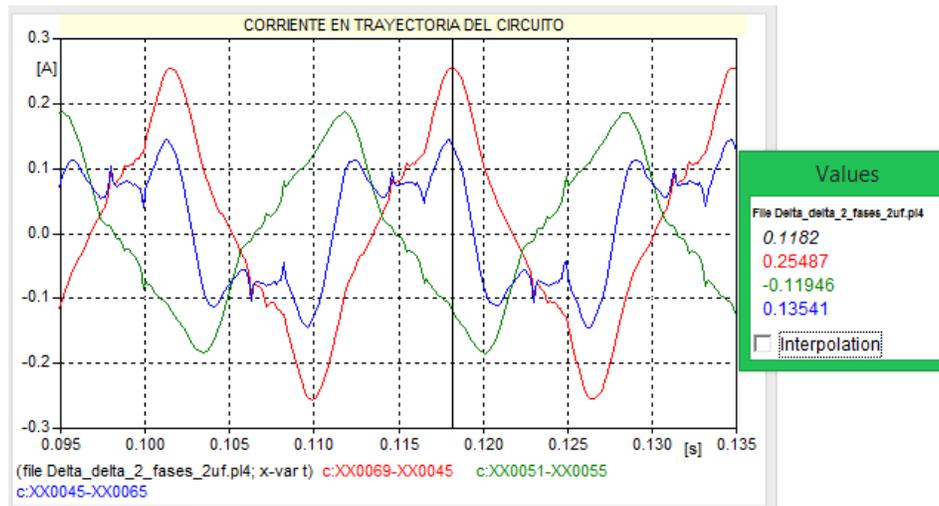


Imagen 3.41. Señales de corriente para conexión Delta-Delta, dos fases energizadas y capacitancias de $2.0 \mu\text{F}$.

En la imagen 3.42, se observan las formas de las capacitancias a tierra que forman parte del circuito LC. Se puede observar claramente que las tensiones, alrededor de 80 voltios, están por debajo de la fuente de alimentación ($V_s = 120V$).

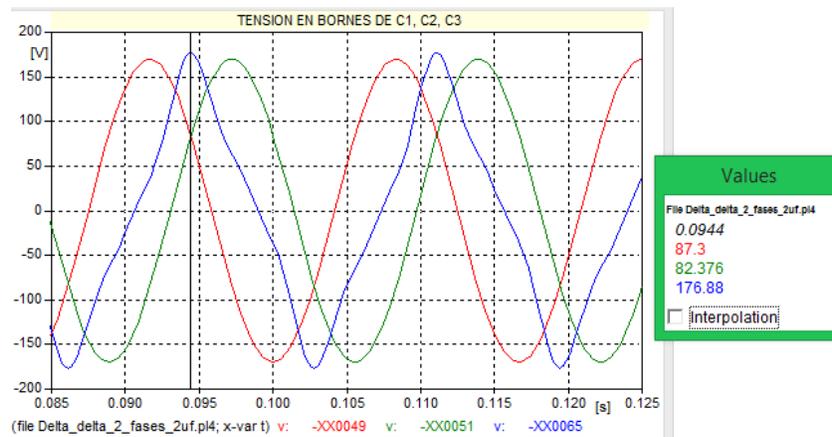


Imagen 3.42. Tensiones en capacitores, conexión delta - delta con dos fases energizadas y capacitancias de $2.0 \mu F$.

3.3.10 Simulación conexión Delta-Delta con dos fases energizadas $V_A = 120.0 \text{ Vrms}$, $V_B = 120.0 \text{ Vrms}$, y capacitancias de $3.0 \mu F$.

Como en los apartados anteriores, se hace un cambio de capacitancia a tierra de $2.0 \mu F$ a $3.0 \mu F$ con el objetivo de observar el efecto que esto tiene en el sistema. En la imagen 3.43, se observa que las formas de onda de los transformadores presentan deformación, y cierta tendencia ferroresonante.

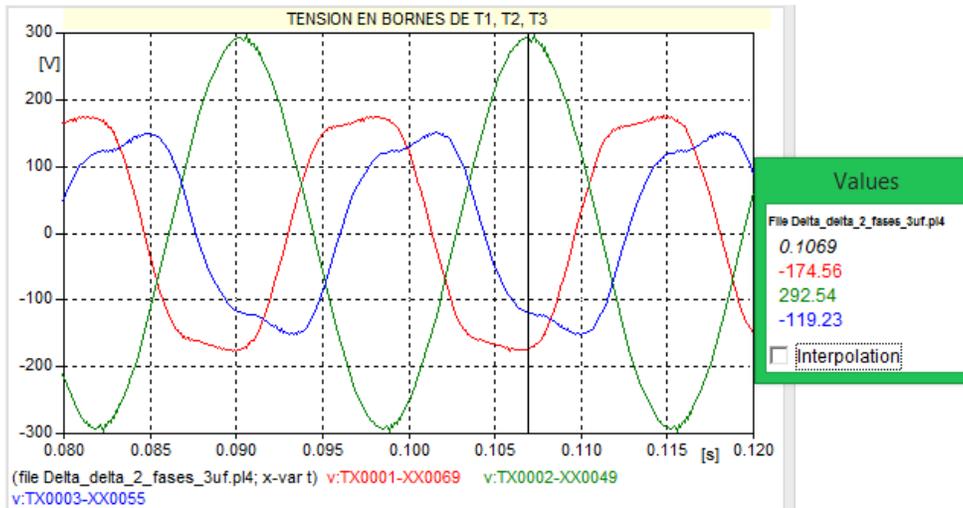


Imagen 3.43. Señales de tensión en las bobinas primarias, conexión Delta-Delta, dos fases energizadas y capacitancias de $3.0 \mu F$.

La imagen 3.44, presenta ciertas tendencias de saturación, especialmente en el transformador T1 (trazo rojo), también existe deformación en las formas de onda, pero esto puede ser provocado por la topología del circuito, este aspecto se verificará con las pruebas experimentales que se desarrollaran en capítulos posteriores.

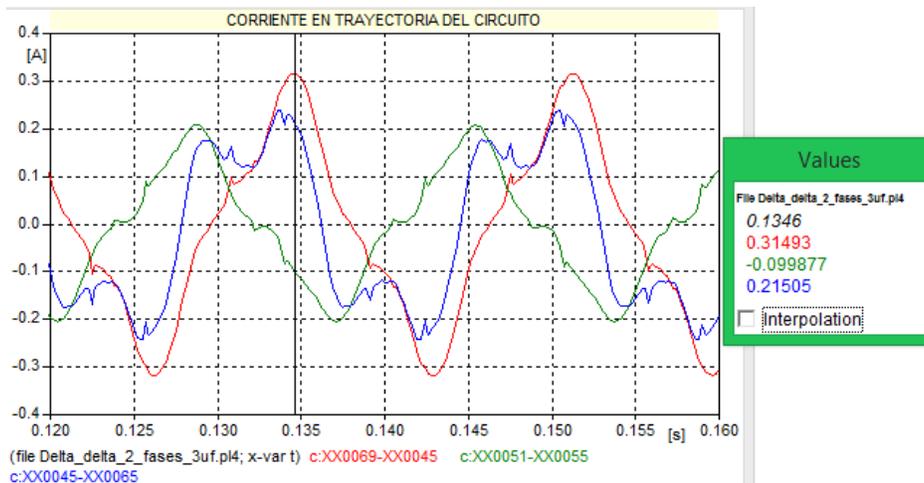


Imagen 3.44. Señales de corriente para conexión Delta – Delta, con dos fases energizadas y capacitancias de $3.0 \mu F$.

En la *imagen 3.45*, se observa un aspecto concluyente acerca de si el circuito entra o no en ferresonancia, y el resultado es negativo. Ya que las capacitancias a tierra no presentan sobretensiones. Los valores de tensión son bajos, entre 70 y 96 voltios, en el caso de T_1 y T_3 . Por otro lado, el transformador T_2 muestra una sobretensión que tendrá que ser estudiada con las pruebas de laboratorio, para poder verificar estos comportamientos y observar si son replicados. Con todos estos datos recopilados de las simulaciones será posible desarrollar el módulo de prueba que es parte primordial de los objetivos de este documento.

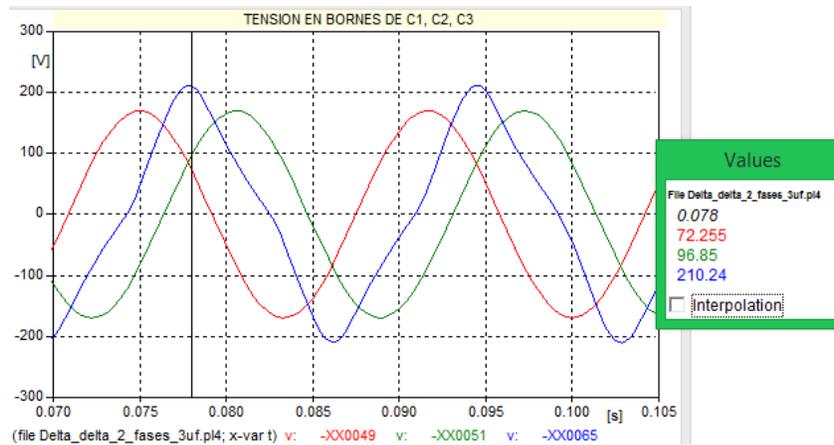


Imagen 3.45. Tensiones en capacitores de conexión Delta –Delta con dos fases energizadas y capacitancia de $3.0 \mu F$.

3.4 Estimación de la subestación real que se pretende emular con el módulo de pruebas para circuitos ferresonantes.

Como una manera de comparar y dimensionar el módulo de pruebas que se pretende construir como objetivo de este documento, se pretende realizar el cálculo de la subestación trifásica que sería emulada por el módulo de circuitos ferresonantes. Primeramente, se partirá de la base que los niveles de tensión que se manejarían en dicha subestación serían 13.2kV para el lado de alta tensión y 220V para el de baja tensión. El valor de tensión 13.2kV se eligió

porque, a partir de este valor es más posible que la ferresonancia se presente en un circuito con elementos no lineales. También se hará uso de cable #2 XLPE apantallado que nos servirá de referencia para obtener los niveles de potencia de la subestación que emularemos.

Haciendo uso de tablas de conductores (consultar las tablas en anexos) podemos saber que el cable #2 XLPE tiene un área de 33.2 mm^2 , con este valores podemos hacer uso de otra tabla de selección de conductores, tenemos que para cables XLPE de alrededor de 35 mm^2 y para entorno trifásico A.C tiene una capacidad de conducción de corriente de hasta 128 amperios. Con estos datos se determina la capacidad de la subestación como sigue:

$$I_n = \frac{S(kVA) \cdot 10^3}{V\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

Donde:

S = Potencia en kVA del transformador.

V = Tensión línea a línea del lado de baja.

In = Corriente nominal en amperios.

Usando la ecuación anterior y despejando para los kVA, tenemos:

$$S(kVA) = I_n * V\sqrt{3}$$

$$S(kVA) = 128 * 208\sqrt{3}$$

$$S(kVA) = 46,114.12 \text{ VA} = 46.114 \text{ kVA}$$

Con este valor obtenido se puede establecer que la subestación sería de 50 kVA, ya que ese valor es el valor mar cercano de transformador comercial trifásico que existe en el país.

3.5 Factor de escalamiento de la subestación contra el módulo de pruebas.

Para obtener una referencia, que dimensione los resultados que se obtendrán con las pruebas a realizar en el módulo de circuitos ferrosesonantes, con una subestación real, se utilizarán los datos obtenidos en el punto anterior. Los datos son los siguientes, transformador trifásico de 50 KVA 13.2 kVA / 220V. Los transformadores que se utilizarán en el módulo son: 3 transformadores monofásicos 240VA 120V/24V. Entonces para el factor de escalamiento tenemos:

Para los niveles de potencia:

$$f_{esc} = \frac{50 \text{ kVA}}{0.24 \text{ kVA}} = 208.33$$

Para los niveles de tensión primario y secundario:

Tensiones en el primario.

$$f_{esc} = \frac{13.2 \text{ kV}}{0.12 \text{ kV}} = 110$$

Tensiones en el secundario.

$$f_{esc} = \frac{220 \text{ V}}{24 \text{ V}} = 9.166667$$

Esto significa que los niveles de tensión que obtendremos en el módulo deberán de ser corregidos por este factor, para obtener el valor que en realidad quieren representar en una subestación real.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MÓDULO PARA CIRCUITOS

FERRORESONANTES TRIFÁSICOS

El diseño del módulo ferroresonante está basado en un modelo compacto y de fácil portabilidad, el cual permite al usuario trabajar de manera cómoda a la hora de realizar las pruebas de laboratorio. El proceso de construcción es bastante sencillo, ya que está constituido en su mayor parte por un gabinete metálico, estructurado con lámina de hierro, ensamblado con soldadura eléctrica y pernos de sujeción.

4.0 Lista de materiales para implementar el módulo de pruebas.

En la siguiente tabla se describe parte del material y componentes utilizados para construir el módulo de pruebas de ferroresonancia.

Descripción
Trasformadores monofásicos 240 VA 120V/24 V, 60 Hz.
Capacitores de 1.0 μ F 450 V AC 50/60 Hz.
Capacitores de 2.0 μ F 450 V AC 50/60 Hz.
Capacitores de 3.0 μ F 450 V AC 50/60 Hz.
Resistencias de 25 Ω \pm 5 % 25 W.
Interruptores de palanca 15A, 250 VAC.
Porta fusibles pequeños 10A 250 VAC.
Fusibles de 1 A 250V AC.
Transferencia manual trifásica de dos posiciones.

Interruptor de paro de emergencia de 3 contactos NC 240 VAC/3.0 A.
Conector hembra tipo Banana de 4 mm, 600 VAC 15 A
Cable de control TF1 105° 600 VAC 14 AWG
Estaño para soldadura blanda 60/40
Impresión de vinilo con símbolo de distribución de los elementos.
Lámina metálica chapa 3/16 pulgada.
Platina metálica de 3/16 x 3/4 pulgada.
Pintura automotriz monocapa color gris.
Pintura automotriz monocapa color amarillo
Base para pintura automotriz.
Bases antideslizantes de goma
Manijas metálicas
Rejillas de ventilación de aluminio
Tornillo galvanizado goloso 1/2"
Perno galvanizado de 1/2"

Tabla 4.1 Lista de materiales para construir módulo de pruebas.

4.1 Construcción de módulo de pruebas.

Para construir el gabinete, se procedió a cortar las piezas con un esmeril y disco de corte, también se cortaron piezas de platina cuyo funcionamiento es como refuerzo a las uniones de la lámina.

Una vez obtenidas las piezas con los tamaños adecuados se procedió a soldarlas y se perforaron los orificios para el botón de emergencia y para colocar la parte frontal con tornillos golosos, también se colocó la repisa.



Imagen 4.1. Gabinete del módulo sin pintura.

La siguiente fase de construcción fue aplicar base para pintura automotriz para luego aplicar una capa de pintura automotriz color amarillo para la tapa frontal del gabinete y color gris para el resto. Una vez secas las capas de pintura se colocaron las rejillas de ventilación y se elaboraron los orificios para instalas los conectores de banana sobre la tapadera frontal y al terminar se aplicó otra capa de pintura.



Imagen 4.2 Acabado de pintura de tapa frontal.

Para continuar el proceso se pegó la impresión de vinilo sobre la tapa frontal, posteriormente se ubicaron cada uno de los componentes dentro del gabinete, colocando los transformadores sobre la base del gabinete y los elementos de menor tamaño como los capacitores y resistencias sobre la repisa. Para continuar se colocaron los conectores de banana hembra y finalmente se hicieron las conexiones.



Imagen 4.3 Distribución interna de los componentes del módulo.

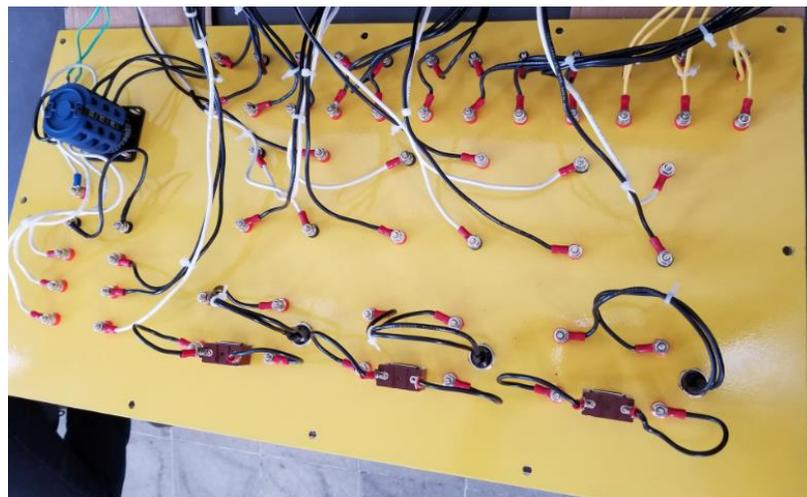


Imagen 4.4. Tapa frontal con las conexiones y conectores de banana hembra.

Asegurándose de que las conexiones fueron bien realizadas y que sigue el esquema de diseño planeado se procede a colocar la tapa frontal de modulo, dejándolo listo para realizar pruebas de funcionamiento.



Imagen 4.5 Módulo de pruebas terminado

En la imagen 4.6 se observa el módulo de pruebas con una conexión trifásica Estrella-Delta con los equipos de medición conectados.

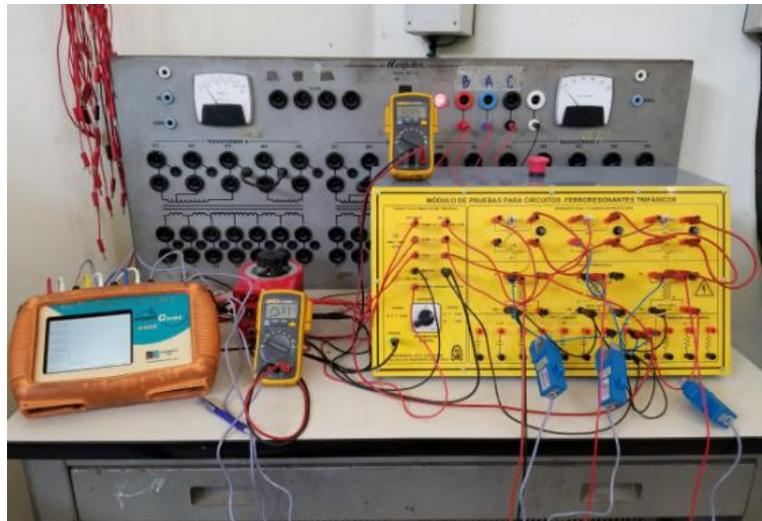


Imagen 4.6. Módulo de pruebas con conexión trifásica Estrella-Delta implementada.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL FENÓMENO DE LA FERRORESONANCIA EN CIRCUITOS TRIFÁSICOS.

En toda investigación es de máxima importancia validar los resultados que se obtuvieron en el estudio teórico del fenómeno de la ferresonancia y de esta forma obtener una comprensión más clara, en que el fenómeno ferresonante es factible de estar presente en las diferentes topologías de circuitos trifásicos, vistos anteriormente.

Para alcanzar este objetivo es necesario realizar pruebas prácticas y contrastar los resultados prácticos y teóricos. Las condiciones en las cuales se realizaron fue de manera controlada para evitar daños en los bobinados de los transformadores y además evitar cualquier otro tipo de accidente al momento de la realización de las pruebas.

5.0 Equipo y materiales utilizados

Para la realización de las pruebas de laboratorio con el fin de determinar las configuraciones trifásicas más susceptibles de sufrir ferresonancia, se usó el equipo siguiente:

- Módulo de pruebas de circuitos ferresonantes trifásicos.
- Fuente Variable de voltaje (monofásica) 0V – 140V.
- Fuente Variable de voltaje (trifásica) 0V – 203V.
- Multímetros digitales.
- Medidor Power Guide 4400 (Dranetz)

5.1 Pruebas realizadas y resultados obtenidos de los circuitos ferresonantes trifásicos.

En las pruebas se utilizó el módulo de pruebas ferresonante que consta de tres transformadores del tipo seco de baja tensión, con el cual se realizó el montaje de seis

circuitos trifásicos resonantes, cada uno con diferentes valores de capacitancia, para demostrar experimentalmente las topologías trifásicas más susceptibles de sufrir ferresonancia, cabe mencionar que las capacitancias utilizadas en los circuitos representan las capacitancias a tierra de un cable apantallado, ya sea por una acometida aérea o subterránea de una subestación eléctrica.

Para que se presente el fenómeno de la ferresonancia en un sistema eléctrico es necesario que exista las condiciones de un circuito LC serie, como se explicó en capítulos anteriores, el cual se presentaría en apertura de una o dos fases del sistema, este procedimiento será el que se replicara en el laboratorio. Cuando el fenómeno se manifieste en el ambiente controlado pueden surgir sobretensiones a través de las capacitancias y los bobinados de los transformadores que no pueden ser explicados con las leyes de análisis de circuitos lineales ya que, por las características del fenómeno, estas sobretensiones tienen un comportamiento de salto impredecible.

Las prácticas realizadas se hicieron siguiendo los criterios de seguridad necesaria y bajo condiciones de aparición del fenómeno de ferresonancia controladas, para evitar cualquier tipo de accidente eléctrico, y de esta manera proteger al equipo y al personal de operación. A continuación, se muestran los resultados de una de las pruebas realizadas en el laboratorio, para la cual el fenómeno ocurrió de manera más representativa.

5.1.1 Conexión Delta–Estrella con capacitancia de 3.0 μ F.

El circuito a implementar es el que se muestra en la *imagen 5.1*, en la cual el secundario estará conectado en estrella sin carga, y por tal motivo no se presenta en el esquema de la

imagen mencionada. Además, se utilizó un valor de capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$, que representaría la capacitancia a tierra del circuito. Con este circuito lo que se pretende simular es el cierre de un seccionador monopolar en la línea a energizar, por parte de un operario, y con esto emular el efecto de ferresonancia que puede surgir al efectuar la maniobra de cierre en una subestación real. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1

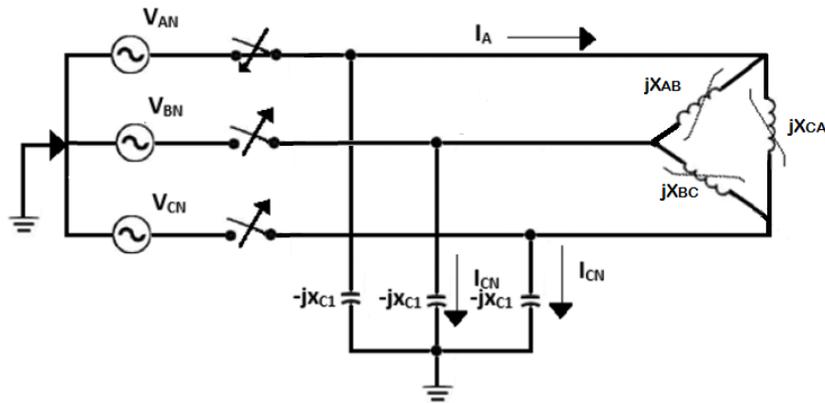


Imagen 5.1 Conexión primaria en Delta con una fase (V_{an}) energizada.

TABLA DE MEDICIONES CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA DOS LINEAS ABIERTAS C=3 uF									
VS	V1	V2	V3	I1	I2	I3	VC1	VC2	VC3
[V]	[V]	[V]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[V]	[V]
10.30	19.78	0.74	19.09	43.00	18.00	18.00	10.30	18.50	18.02
20.10	31.30	0.95	30.52	53.00	24.00	23.00	20.11	23.23	22.42
30.47	42.83	1.12	41.90	62.00	29.00	29.00	30.30	27.43	26.42
40.40	54.56	1.20	53.70	71.00	34.00	35.00	40.60	31.65	30.70
50.30	66.20	1.11	65.96	82.00	40.00	40.00	50.25	36.44	35.60
60.20	80.60	0.88	80.80	101.00	51.00	50.00	60.31	43.80	43.80
65.50	138.40	9.13	141.60	447.00	205.00	201.00	64.80	173.00	175.00
70.30	140.60	9.55	143.80	460.00	219.00	212.00	70.20	182.60	185.90
80.30	143.60	10.18	147.00	536.00	233.00	231.00	80.40	200.30	203.00
90.00	146.20	10.45	149.60	579.00	250.00	248.00	89.80	214.40	217.20
100.00	148.50	11.00	152.20	625.00	267.00	274.00	100.70	229.30	232.20
110.00	150.30	11.31	154.10	668.00	281.00	290.00	110.90	242.10	244.90
120.00	152.50	11.48	156.10	708.00	294.00	304.00	120.10	253.20	256.40
130.40	154.30	11.68	158.00	752.00	308.00	315.00	130.10	265.40	268.30

Tabla 5.1 Datos experimentales de circuito delta-estrella utilizando capacitancia de $3.0 \mu\text{F}$.

Los datos obtenidos en la tabla 5.1, permiten construir las gráficas mostradas en *las imágenes 5.2 y 5.3*, en las cuales se muestran el punto de quiebre en las cuales las sobretensiones en el capacitor C2 y el transformador se hacen presentes, con respecto a la tensión de alimentación. También se muestra en la *imagen 5.4* el aumento de la corriente en el primario cuando el fenómeno ferroresonante se hace presente.

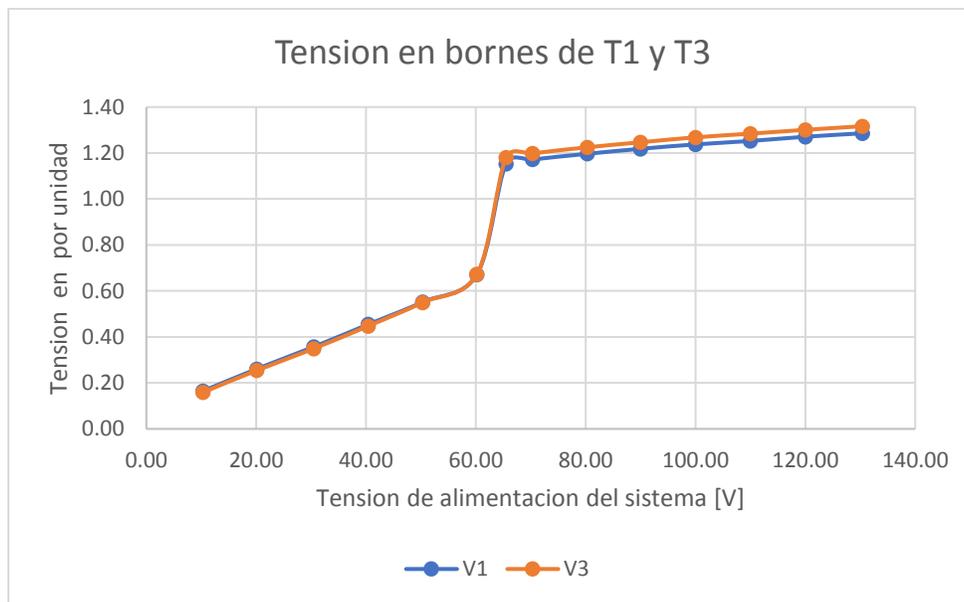


Imagen 5.2 Sobretensiones en los bornes primarios de los transformadores T1 y T3 (En por unidad)

al momento de entrar en ferroresonancia, utilizando una capacitancia de 3.0 μ F.

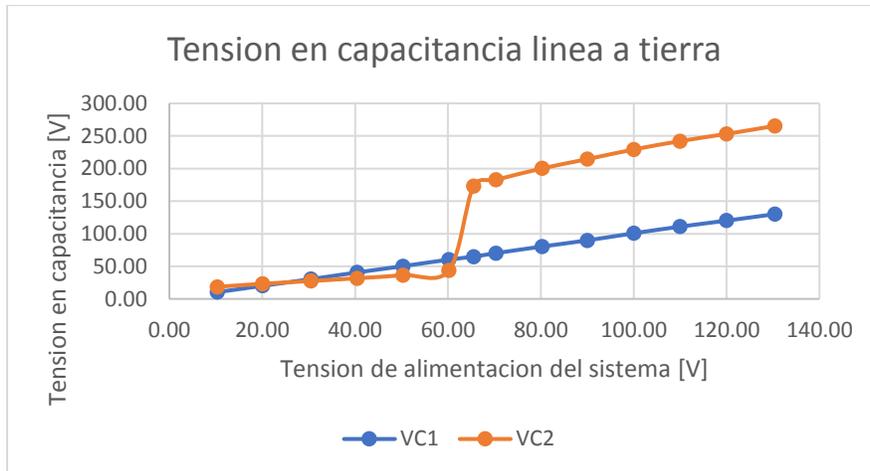


Imagen 5.3 Comparación de la sobretensión experimentada en el capacitor línea a tierra C2, con respecto al capacitor de la línea energizada C1.

En la imagen 5.4 podemos ver que la corriente I_1 en su punto máximo es alrededor de 752 mA y en I_2 es de 308 mA, lo que contradice que la corriente en vacío de los transformadores sería de alrededor de 30 mA por lo tanto, estos datos confirman la saturación que experimentaron los núcleos de los transformadores, debido a la ferresonancia en la que entro el circuito.

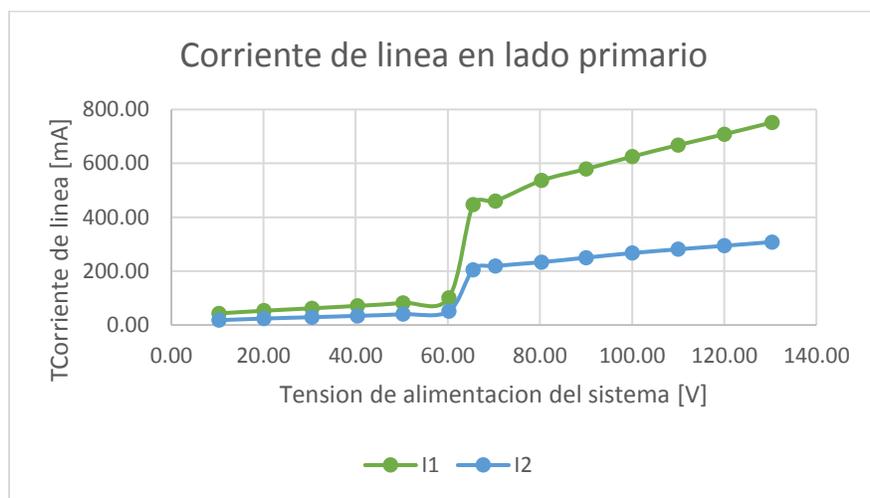


Imagen 5.4 Elevación súbita de la corriente de línea, al momento de entrar en ferresonancia el circuito delta – estrella con capacitancia de $3\mu F$.

En la *imagen 5.5*, se observa las formas de onda de tensión en el primario de los transformadores con una tensión de la fuente V_s a 60V tomada en el laboratorio con el medidor, en la cual se observa que no hay deformación, es decir que los transformadores aún no están en condición de saturación.



Imagen 5.5 Forma de onda del voltaje en el primario de los transformadores antes de la condición de saturación utilizando circuito delta – estrella con capacitancia de 3.0 μ F

En la *imagen 5.6*, se puede observar la forma de onda de la corriente en los primarios de los transformadores, se observa que la onda es prácticamente inexistente, debido a que los transformadores no están saturados.

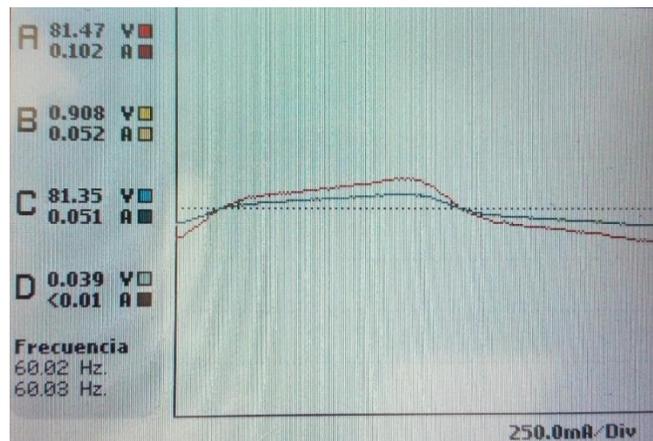


Imagen 5.6. Forma de onda de corriente en condición no saturada para circuito delta – estrella con capacitancia 3.0 μ F.

En la *imagen 5.7*, se observa la forma de onda de las tensiones de los primarios de los transformadores, se puede ver que la saturación de los núcleos del transformador uno (línea roja) y tres (línea amarilla) es evidente, por lo que la ferresonancia es palpable con una tensión de alimentación V_s de 90V.



Imagen 5.7 Forma de onda de tensión en el primario en condición de saturación para el circuito delta – estrella con $3.0\mu F$.

En la *imagen 5.8*, se observa la forma onda de la corriente de los transformadores, en la cual se observa la saturación plena del núcleo, ya que la gráfica es la imagen característica una onda de corriente de un transformador con el núcleo saturado.

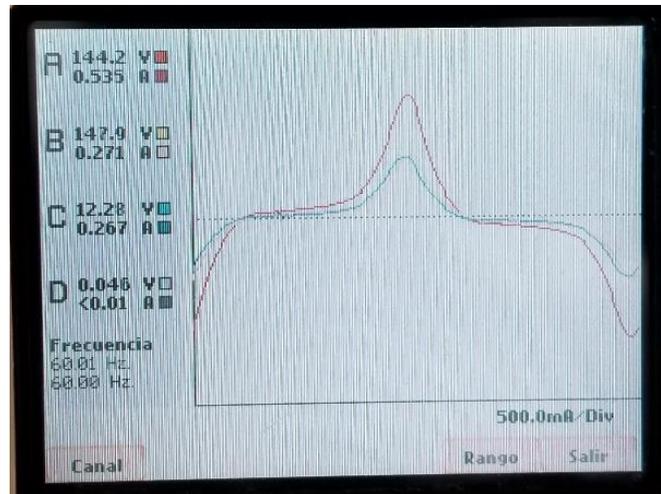


Imagen 5.8 Forma de onda de corriente en condición de saturación con V_s 90V para circuito delta – estrella con capacitancia $3\mu F$.

En la imagen 5.9, se presenta el espectro de frecuencias en las cuales el fenómeno ferroresonante está contenido, y al que fue sometido el circuito. Como se parecía en la imagen la mayoría de la energía está concentrada en la frecuencia fundamental del espectro.

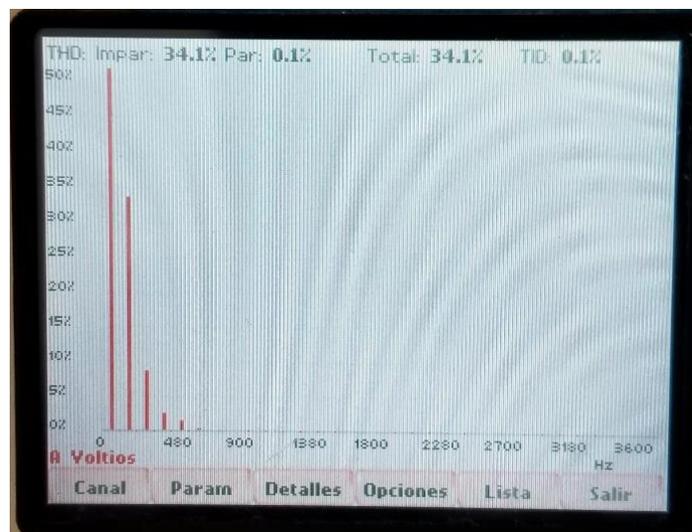


Imagen 5.9 Armónico de tensión para circuito delta – estrella con capacitancia de $3\mu F$.

Como una manera de comprobar el efecto que se tiene al agregar una carga al secundario del arreglo trifásico, se instaló un arreglo de tres resistencias en estrella de 25 ohmios.

Dicho arreglo de resistencias en teoría evitaría sobretensiones en los transformadores, y por tal razón evita la ferresonancia y la deformación de las ondas de tensión en los transformadores. En la *imagen 5.10*, se ilustra el efecto de agregar carga al secundario del arreglo trifásico.



Imagen 5.10 Forma de onda de voltaje en el primario conexión estrella – delta con capacitancia de $3.0\mu\text{F}$.

5.2 Determinación de la longitud de cable equivalente por medio de las capacitancias utilizadas.

Se presentan el cálculo de las longitudes de cables equivalente a las capacitancias utilizadas en el laboratorio, con la finalidad de comparar a que longitud de cable línea de transmisión equivalen las capacitancias utilizadas para los circuitos LC no lineales. Retomando que se utilizó un cable XLPE apantallado #2 AWG según la Tabla 1.1, dicho cable tiene una capacitancia por kilómetro de $0.407\ \mu\text{F}$. Realizando los cálculos para la capacitancia de $1.0\ \mu\text{F}$, se procede a calcular la reactancia capacitiva y luego con dicho valor se obtiene la longitud equivalente de cable. Como se muestra a continuación:

Haciendo uso de la ecuación: $X_C = \frac{1}{2\pi * f * C} = \frac{1}{2\pi * 60 * 1 * 10^{-6}} = 2,652.5823$

Después de utilizar la ecuación, ahora se utilizará una ecuación que involucra la longitud del cable, de la cual se despeja L para obtener la longitud equivalente.

$$L = \frac{1}{2\pi * f * C * X_C} = X_C = \frac{1}{2\pi * 60 * 0.407 * 10^{-6} * 2652.5823} = 2.46 \text{ km}$$

Siguiendo este procedimiento se calcularon los demás valores para las otras capacitancias utilizadas en el laboratorio y los resultados se muestran en la *tabla 5.2*.

Valor de capacitancia	Valor de Xc	Longitud de cable equivalente
1.0 µF	2,652.5823	2.46 km
2.0 µF	1,326.2911	4.914 km
3.0 µF	884.1941	7.3793 km

Tabla 5.2. Equivalente de valores de capacitancia en longitud de cable de potencia.

5.3 Ejemplo de escalamiento utilizando los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

En este apartado, se presenta un ejemplo del escalamiento a niveles de una subestación real, haciendo uso de los datos recopilados en la *tabla 5.1*, conexión delta – estrella con capacitancia de 3.0 µF, y de esta manera constatar los voltajes y corrientes a los que sería sometida una red de distribución en caso de que una falla por ferroresonancia ocurriese.

Para esto se hará del factor de escala propuestos en dicho capítulo. Los datos de dicha subestación trifásica son: Un transformador trifásico 50 KVA 13.2kV/208V Δ - Y.

En la *tabla 5.3*, se presentan en las tres columnas de la izquierda los datos recopilados en la prueba de laboratorio que corresponden a los voltajes en los bornes primarios de los transformadores delta – estrella. En las tres columnas siguientes están las mismas tensiones, pero con el factor de escalamiento aplicado abordado en el *capítulo III*. Como se puede observar para un valor de 154.30V en el transformador T₁, al comparar con el valor escalado, se observa que el voltaje es de 16.97 kV. De estos datos escalados se puede concluir que, en una subestación real el bobinado del transformador trifásico se podría ver comprometido, ya que estos niveles de tensión en la bobina podrían causar perforaciones en el aislamiento del bobinado, al verse debilitado por el recalentamiento.

Tensiones de laboratorio				Tensiones con escalamiento		
VS	V1	V2	V3	V1	V2	V3
[V]	[V]	[V]	[V]	[kV]	[kV]	[kV]
10.30	19.78	0.74	19.09	2.18	0.08	2.10
20.10	31.30	0.95	30.52	3.44	0.10	3.36
30.47	42.83	1.12	41.90	4.71	0.12	4.61
40.40	54.56	1.20	53.70	6.00	0.13	5.91
50.30	66.20	1.11	65.96	7.28	0.12	7.26
60.20	80.60	0.88	80.80	8.87	0.10	8.89
65.50	138.40	9.13	141.60	15.22	1.00	15.58
70.30	140.60	9.55	143.80	15.47	1.05	15.82
80.30	143.60	10.18	147.00	15.80	1.12	16.17
90.00	146.20	10.45	149.60	16.08	1.15	16.46
100.00	148.50	11.00	152.20	16.34	1.21	16.74
110.00	150.30	11.31	154.10	16.53	1.24	16.95
120.00	152.50	11.48	156.10	16.78	1.26	17.17
130.40	154.30	11.68	158.00	16.97	1.28	17.38

Tabla 5.3 Escalamiento de los voltajes primarios, obtenidos en el laboratorio con un factor de 110.

En la *tabla 5.4*, en las tres columnas izquierdas los datos recogidos en el laboratorio de la prueba con conexión delta – estrella con capacitancia de $3\mu\text{F}$. Se puede observar que los valores de tensión de las capacitancias a tierra V_{c2} y V_{c3} , son de 265.4 voltios y 268.3 voltios respectivamente. Y con los datos escalados del mismo punto, pero de las columnas en la derecha tenemos que dichos voltajes son $V_{c2} = 29.19 \text{ kV}$ y $V_{c3} = 29.51 \text{ kV}$. Estas sobretensiones son suficientes para que un pararrayos típico de 9-10 kV para un nivel 13.2kV, se accione y cierre el circuito para despejar la falla generada por las sobretensiones causadas por como efecto de la ferresonancia.

Tensiones de laboratorio			Tensiones con escalamiento		
VC1	VC2	VC3	VC1	VC2	VC3
[V]	[V]	[V]	[kV]	[kV]	[kV]
10.30	18.50	18.02	1.13	2.04	1.98
20.11	23.23	22.42	2.21	2.56	2.47
30.30	27.43	26.42	3.33	3.02	2.91
40.60	31.65	30.70	4.47	3.48	3.38
50.25	36.44	35.60	5.53	4.01	3.92
60.31	43.80	43.80	6.63	4.82	4.82
64.80	173.00	175.00	7.13	19.03	19.25
70.20	182.60	185.90	7.72	20.09	20.45
80.40	200.30	203.00	8.84	22.03	22.33
89.80	214.40	217.20	9.88	23.58	23.89
100.70	229.30	232.20	11.08	25.22	25.54
110.90	242.10	244.90	12.20	26.63	26.94
120.10	253.20	256.40	13.21	27.85	28.20
130.10	265.40	268.30	14.31	29.19	29.51

Tabla 5.4 Escalamiento de los voltajes de capacitancia a tierra, obtenidos con un factor de 110.

CAPÍTULO 6

RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

6.1 Recomendaciones

A continuación, se proponen algunas medidas para mitigar las sobre tensiones producidas por la ferresonancia en bancos de transformadores trifásicos. Para el diseño eficiente y confiable de subestaciones eléctricas trifásicas existen muchos factores a considerar, una de ellas es la prevención a la aparición de la ferresonancia. La aparición de la ferresonancia es susceptible tanto a la topología de la subestación como a los elementos que la conforman. Además, es importante destacar que la coordinación de aislamiento no considera las sobre tensiones producidas por la ferresonancia, debido a ello los para rayos no se deben considerar como protecciones a este fenómeno.

Considerando lo anterior se presentan algunas alternativas válidas para poder mitigar el fenómeno de ferresonancia:

1. Usar una carga resistiva permanente, conectando carga resistiva en el secundario del transformador para absorber la energía almacenada en las capacitancias y con ello prevenir las oscilaciones. Un valor de carga de 10% de la capacidad nominal del banco de transformadores, dependiendo del largo de los cables de alimentación en el primario.

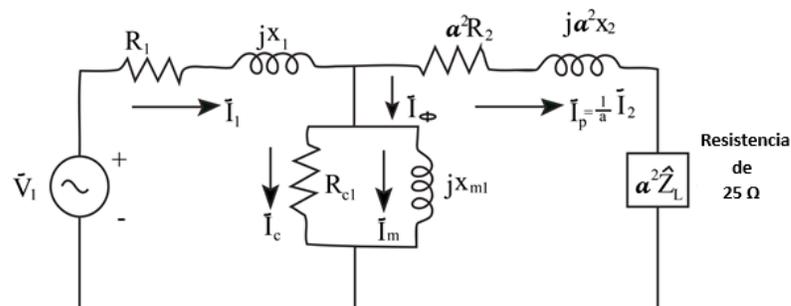


Imagen 6.1 modelo de transformador con carga en el secundario de 25 Ω .

En la *imagen 6.1*, podemos observar el modelo del transformador con carga en el secundario, notamos como se refleja la carga en el lado primario afectando las trayectorias de la corriente ocasionando la limitación de sobretensiones, esto se debe a que ahora, aunque X_m se elimine virtualmente con X_c la corriente ya no recae solo sobre R_{cl} , sino también sobre el reflejo de la resistencia de 25Ω . Lo anterior resulta beneficioso para la mitigación de la ferresonancia.

2. Prevenir la condición de fase individual abierta, mediante la restricción de las maniobras monofásicas o la protección por fusibles cuya fusión produce un corte unipolar, utilizando dispositivos de interrupción trifásica, desde el punto de vista eléctrico es muy práctico pero debido a factores económicos y de disponibilidad de espacio generalmente no es una solución accesible.

Por lo que es recomendable instalar los fusibles, interruptores automáticos, muy próximos al transformador, con el fin de bajar la capacitancia entre el interruptor automático y el transformador por debajo de su valor crítico.

La mayoría de casos la presencia del fenómeno de la ferresonancia es resultado de fusibles dañados en una o dos fases debido a falla, algún tipo de maniobra en alguna fase. Una medida lógica efectiva en contra del fenómeno de la ferresonancia podría ser usar equipo de accionamiento de tres fases como seccionadores tripolares, cabe mencionar que estos equipos de accionamiento trifásicos deben estar bien calibrados y armados ya que si no se da el cierre al mismo tiempo de igual modo podría aparecer el ferresonancia debido a que es un fenómeno que aparece en los primeros ciclos de la conexión.

3. Limitar las sobretensiones. Los pararrayos por el lado primario del transformador por lo general limitarían las tensiones de 1.7 a 2.0 pu. Existe cierto riesgo de que los pararrayos fallen si las sobretensiones de la ferresonancia permanecen por largo tiempo. De hecho, los pararrayos del lado secundario del transformador que tienen niveles más bajos de protección que los pararrayos del lado primario son frecuentemente dañados por causa de la ferresonancia.

4. Limitar la longitud de los cables, revisando los parámetros involucrados en los circuitos eléctricos, para analizar si se encuentran dentro de los rangos permisibles para evitar la posibilidad que el fenómeno de la ferresonancia aparezca. La longitud permitida del cable depende también del nivel de tensión. Sin embargo, las modernas tendencias en el diseño de transformador con bajas pérdidas y corrientes de excitación están haciendo que sea más difícil evitar la ferresonancia.

5. Operación de los transformadores conectados en delta, tales transformadores deberían protegerse porque las tensiones podrían ser extremadamente altas. Esta configuración dificulta la aparición del fenómeno sobre todo en el caso de tener una fase desconectada, pero no asegura que el fenómeno no se presente en su totalidad.

Por las características y condiciones necesarias para la aparición de ferresonancia, de una manera generalizada y sintetizada se tienen que considerar lo siguiente:

- a)** Evitar que los valores X_l (X_m) y X_c lleguen a valores cercanos: las reactancias de los transformadores y cables de alimentación al ser al ser valores cercanos y en el peor de los casos iguales, ya que esta característica es la principal causa de la aparición del fenómeno de ferresonancia.

- b)** Evitar que se formen trayectorias LC-no lineales. Ya que es a través de estas trayectorias que tenemos la aparición del fenómeno.

6.2 Conclusiones.

- Con el paso de los años los servicios de distribución han ido refinando gradualmente la conmutación monopolar y las pautas operativas para evitar daños durante las maniobras de cierre/apertura de los sistemas de distribución y de esta manera evitar problemas. Pero la ocurrencia de la ferresonancia no se debe dar por olvidada, ya que la misma solo necesita de una fase energiza en serie con la inductancia del transformador para que se forme la topología LC y el fenómeno ferresonante se manifieste.

Todas las topologías de los sistemas trifásicos son susceptibles de sufrir el fenómeno de la ferresonancia. Pero las más peligrosas en términos de sobretensiones son:

Transformadores con conexión delta primaria, con dos líneas abiertas.

Transformadores con conexión estrella primaria, con dos líneas abiertas.

- Las conexiones Delta y Estrella, con una línea abierta son menos propensas de sufrir el fenómeno, ya que para la ferresonancia en estas configuraciones es necesario que las condiciones iniciales de los bobinados de los transformadores que conforman el sistema se vean afectadas, ya sea por la existencia del voltaje de inducción mutua entre bobinas adyacentes. Pero este voltaje se presenta con mayor recurrencia en transformadores con núcleo completo, por ejemplo: transformadores trifásicos con núcleo de cinco, cuatro y tres piernas, respectivamente. Pero en sistemas trifásicos de distribución típicos, se hace uso de transformadores monofásicos para formar la subestación trifásica.

- Otro motivo por el cual la ocurrencia del fenómeno ferresonante con una línea abierta es menos común, se cimienta en el hecho de que las trayectorias necesarias para formar el equivalente LC son más complicadas de alcanzar, porque las inductancias magnéticas X_m de los transformadores con fase energizada dificultan establecer una trayectoria LC.

Pero con las condiciones óptimas la ferresonancia se puede presentar, y sería aún más destructivo que en el caso con una fase energizada, esto es debido a que la corriente de línea $I_{linea} = I_a + I_b = 2I_a$, en este caso se duplicaría, esto se debe a la simetría del circuito equivalente, y porque en teoría los transformadores serían idénticos y conectados al mismo nivel de tensión.
- El cálculo de la capacitancia crítica para un sistema trifásico es un proceso lento y engorroso, ya que se debe tener un valor de la relación de X_c/X_m para cada punto de la curva de magnetización de los transformadores, esto propició el uso de software de computadora que nos permitiría obtener dicho valor de una manera más rápida. Este valor permitió tener un punto partida para elegir el valor de capacitancias comerciales, que serían necesarias en el módulo de prueba de circuitos trifásicos ferresonantes, y con esto simular en el ATPDraw para obtener las capacitancias exactas.
- Las simulaciones realizadas por software (ATPDraw), presentaron inconvenientes que tuvieron que ser solventados, como el caso de la caracterización total de los tres transformadores, obtención de la curva de magnetización para cada transformador y las pruebas industriales en cada uno. Esto debido a que se intentó simular con una sola curva para los tres transformadores, pero esto arrojó resultados erróneos, e insatisfactorios. Las

simulaciones realizadas, con respecto a las pruebas de laboratorio arrojaron resultados similares, por lo que dichas simulaciones sirvieron de parámetro para establecer la validez de los datos recogidos en el laboratorio.

- Los bajos niveles de pérdidas con los que son fabricados actualmente los transformadores, contribuyen a la ocurrencia de ferresonancia en subestaciones actuales. Esto, en combinación a que la longitud crítica del cable de alimentación está relacionando de manera directa con la potencia del transformador y el porcentaje de corriente de excitación en vacío, hacen que las subestaciones actuales presenten un mayor riesgo de tener un evento ferresonante y producir sobretensiones en circuitos con longitudes de cables que fueron diseñadas como seguras para transformadores antiguos.
- La presencia de armónicos en un evento ferresonante es algo común, debido a la gran distorsión que genera la ferresonancia en las formas de onda de la tensión y corriente en la subestación donde ocurre la falla. En las pruebas de laboratorio realizadas con las distintas configuraciones de primario y secundario de los transformadores, la ferresonancia fundamental estuvo presente en todas las pruebas, y se caracteriza porque la componente fundamental contiene la mayor cantidad de energía del espectro armónico, eso se debe a que las pruebas se realizaron en un ambiente controlado, y no era la meta del estudio destruir el módulo de pruebas, sino tener una herramienta de pruebas para conocer el fenómeno de manera práctica.

- Las pruebas del laboratorio realizadas con una línea energizada, se observó ferresonancia como se esperaba con sobretensiones en los bornes de las bobinas primarias, estableciendo la saturación de los transformadores y el debilitamiento de la impedancia de magnetización del transformador, que permitía dichas sobretensiones. Además, se observaron sobretensiones en el rango de 2.41 veces el voltaje de alimentación en las capacitancias a tierra, específicamente en el caso de la conexión estrella-delta con una capacitancia de $1\mu\text{F}$ y dos líneas abiertas. Estas sobretensiones serían suficiente para que los dispositivos de protección (pararrayos, fusibles, etc.) se accionaran y despejase la falla en una subestación real.
- Se comprobó que no todos los valores de capacitancia hacen que el circuito entre en condición ferresonante, esto está argumentado en la relación X_c/X_m , ya que si esta relación es elevada no se produce resonancia, ya sea al aumentar el valor de la capacitancia o por la disminución de reactancia magnética del transformador.
- En las pruebas estrella y delta con dos fases energizadas, no ocurrió el fenómeno ferresonante, en ninguna de las dos conexiones, como proponía la teoría. Demostrado en que no existió saturación del núcleo, sobretensiones o deformación de ondas, para ningún valor de capacitancia utilizados. Esto se debe a la configuración equivalente de las reactancias magnéticas de los transformadores y al uso de transformadores monofásicos en el módulo, por lo que además no existía en voltaje de inducción mutua entre bobinas, ya que dicho voltaje es de hasta el 50% en la bobina adyacente para transformadores trifásicos con núcleo completo.

REFERENCIAS

- [1] Bhag S. Guru. “Maquinas Eléctricas y Transformadores”, Tercera Edición 2003.
- [2] Bayardo Raúl Villamarin Granda (2000). Programa computacional didáctico para el Cálculo de Parámetros en Líneas y redes de Distribución Aéreas y Subterráneas.
- [3] Miguel Parada, Amílcar Barrientos, Eliezer Pasasin. (2015). Estudio y Evaluación del Fenómeno de Ferroresonancia en Subestaciones Eléctricas de Distribución.
- [4] Guillermo Aponte M. “La ferroresonancia en transformadores de Distribución”.
- [5] Philippe Ferraci. “La Ferroresonancia”, Cuaderno Técnico N° 190 Schneider Electric.
- [6] ANSI/IEEE, IEEE Guide for Application of Transformers Connections in Three Phase Distribution Systems: Ferro-resonance. P22-23 ANSAI/IEEE Norma: C57.105-1978-R1999
- [7] Bruce A. Mork, Ph.D. “Understanding and Dealing with Ferroresonance”. Department of Electrical & Computer Engineering Michigan Technological University Houghton, MI 49931-1295.
- [8] Salvador Acevedo “Análisis de Ferroresonancia en Transformadores Eléctricos”, 1987. Cap. 3.
- [9] Carlos Quijite Sánchez. “Estudio del fenómeno de ferroresonancia en transformadores”. 2012.
- [10] Vembu Gourishankar, D.R., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., Conversión de Energía Electromecánica, México, 1975.
- [11] Stephen J. Chapman. “Maquinas Eléctricas”, Quinta Edición 2012.
- [12] Guia de Diseño de instalaciones eléctricas Schneider Electric 2da Edición 2008

ANEXOS

A1. Código fuente de programa de cálculo de método grafico para calcular la relación

Xc/Xm.

```
clear
clc
%datos = xlsread('datost1');
%plot(datos(:,1), datos(:,2))
%grid
%xlabel('Corriente')
%ylabel('Tension')
%n = 2;
%-----
arc = fopen('curva.txt','w');
disp('      VAN      VCN      XC1/XAB      VAB      XAB/Xm      XC1/Xm')
fprintf(arc, '      VAN      VCN      XC1/XBC      VBC      XBC/Xm      XC1/Xm
\n')
%-----
VAN = 120/sqrt(3);
m = 1;
n = -3:(7/52):3;
for l = -220:10:220
    res(1,1) = 1;
    fprintf(arc, '%4f, ', res(1,1));
    Xm = 120 / ((1e-3)*((1.9142e-14*120^7 -2.0825e-11*120^6 + 8.5537e-09*120^5
-1.7185e-06*120^4 + 0.00018687*120^3 -0.011336*120^2 + 0.47637*120 +
0.36428)));
    VCN = n(m) * VAN;
    res(1,2) = VCN;
    tensioncn(m) = VCN; %Para grafico semilogaritmico
    fprintf(arc, '%4f, ', res(1,2));
    %Xc1_XBC = Xc1/XBC
    Xc1_XBC = n(m) / (2*n(m) + 1);
    res(1,3) = Xc1_XBC;
    fprintf(arc, '%4f, ', res(1,3));
    %Parte imaginaria VBC
```

```

VBC = (((0.5 + n(m))^2 + 0.75)^(1/2)) * VAN;
res(1,4) = VBC;
fprintf(arc, '%4f, ', res(1,4));
%De la curva de excitacion
%Para la tension x = corriente
%y = 1.5e-8*x^7 - 3e-6*x^6 + 0.00023*x^5 - 0.0082*x^4 + 0.13*x^3 -
0.59*x^2 + 3.3*x - 1.1;
%Para la corriente x = tension
IBC = (1e-3)*(1.9142e-14*VBC^7 -2.0825e-11*VBC^6 + 8.5537e-09*VBC^5 -
1.7185e-06*VBC^4 + 0.00018687*VBC^3 -0.011336*VBC^2 + 0.47637*VBC + 0.36428);
%-----
XBC = VBC / IBC;
%-----
%XBC_Xm, de donde?
XBC_Xm = XBC / Xm;
res(1,5) = XBC_Xm;
fprintf(arc, '%4f, ', res(1,5));
%-----
K = XBC / (3*Xm);
%-----
XC1_Xm = (3*K*n(m)) / (2*n(m) + 1);
res(1,6) = XC1_Xm;
reactancia(m) = (XC1_Xm);
fprintf(arc, '%4f, ', res(1,6));
fprintf(arc, '\n');
disp(res)
m = m + 1;
end
fclose(arc)
figure(2)
semilogx(reactancia, tensioncn)
grid
ylabel('Tension VCN')
xlabel('Relacion XC1/Xm')

```

A2. SOTFWARE PARA SIMULACION DE SISTEMAS DE POTENCIA ATP-EMTP.

Para validar los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, se utilizó el simulador ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transient Program).

El ATP es un software universal para realizar simulaciones digitales de fenómenos electromagnéticos transitorios. Con este programa digital, se pueden modelar redes complejas y sistemas de control de cualquier estructura, tiene amplias capacidades de modelado y otras características importantes, además del cálculo de transitorios.

En resumen, los estudios que utilizan ATP, tienen objetivos que se pueden clasificar en 2 categorías fundamentales:

1. En los diseños que incluyen el dimensionamiento de los equipos, coordinación de aislamiento, nivel de tensión, diseño de los elementos de protección y control, etc.
2. En la solución de problemas de operación, estos suelen ser fallas en las líneas, análisis de sobretensiones, análisis de transitorios.

Los casos típicos de estudio, en los cuales se utiliza ATP se enumeran a continuación:

- **Transitorio de maniobra**
 - a) Determinísticos
 - b) Probabilísticos
 - c) Maniobras de reactores
 - d) Maniobra de capacitores
 - e) Maniobra de interruptores
 - f) Re-cierres rápidos
 - g) Tensión transitoria de restablecimiento
 - h) Transitorios de maniobras en cables.
- **Impulsos atmosféricos.**
 - a) Contorneo inverso
 - b) Impulsos inducidos

c) Ingresos de impulsos atmosféricos a subestaciones

- **Coordinación de aislamiento.**

- a) Líneas aéreas

- b) Subestaciones

- c) Subestaciones blindadas en SF6 (GIS)

- d) Descargadores

- **Solicitaciones torsionales de ejes**

- a) Resonancia sub-sincrónica

- b) Rechazo de carga.

- **Sistema de alta tensión en corriente continua (HVDC)**

- a) Control

- b) Transitorios eléctricos

- c) Armónicas

Compensadores estáticos

- a) Control

- b) Sobretensiones

- c) Armónicos

- **Ferroresonancia**

- **Análisis armónico**

- **Arranque de motores**

- **Sistemas de control**

- **Análisis de sistemas desbalanceados**

El software ATP-EMTP, resuelve sistemas eléctricos monofásicos y trifásicos para lo cual las especificaciones de equipos y definición de parámetros eléctricos son fundamentales.

El ATP tiene el objetivo de calcular el valor de las diferentes variables del sistema en un determinado tiempo. Para lograr este objetivo el ATP trabaja con modelos que simulan el

comportamiento de los diferentes elementos constitutivos de un sistema eléctrico tales como: resistencias, inductancias, capacitancias, generadores, líneas de transmisión, interruptores, etc. Los cuales son de muy fácil parametrización y el cual permite modificar sus características si fuera necesario. En el software ATP para realizar cualquier estudio intervienen varias aplicaciones, entre las cuales tenemos:

Las diferentes versiones del compilador ATP:

- Editor de texto.
- Editor gráfico de circuitos eléctricos (ATPDraw).
- Herramientas para la visualización gráfica de los resultados (PLOTXY).
- Entre otros.

A2.1 Estudio con ATPDraw de sobretensiones por maniobra de interruptores.

Sobretensiones por maniobra de Interruptores.

A diferencia de los transitorios por descargas atmosféricas, los transitorios por maniobra se originan y se pueden controlar en la misma red. Desde el punto de vista del transitorio, las frecuencias que aparecen se encuentran en el rango de 5 – 20 kHz y se pueden presentar problemas de efectos no lineales, lo cual dificulta la aplicación de los métodos de simulación tanto digital como analógica.

Para el estudio de los transitorios, usando técnicas de simulación, se trata en principio de hacer una representación de las componentes del sistema: Líneas de transmisión, transformadores de potencia, bancos de capacitores e interruptores o bien de los dispositivos de protección que son los pararrayos. El problema de la representación o modelado de estos componentes se divide en dos puntos: para elementos de red (líneas, transformadores) y para dispositivos de control y protección (interruptores, pararrayos).

Línea Eléctrica en Vacío

Una línea en vacío constituye un circuito preponderantemente capacitivo. La corriente capacitiva de la línea que se va a interrumpir es de poca intensidad y está adelantada 90° con respecto a la tensión, de manera que cuando la corriente pasa por cero el voltaje tiene su valor máximo.

En la energización y recierre de una línea, pueden parecer voltajes severos, la magnitud de estas sobretensiones dependen de muchos factores entre los cuales se pueden mencionar: longitud de la línea, impedancia, compensación, carga remanente, etc.

En una línea, la carga remanente antes de su recierre tiene un efecto significativo en las sobretensiones producidos, este valor depende del equipo conectado a la línea esto determina el mecanismo de disminución de las sobretensiones. Es de mucha importancia mencionar que los transformadores afectan a la energización y recierre por la interacción de sus características magnéticas no lineal con la capacitancia de la línea e inductancia del sistema.

En la *imagen A2.1*, se muestra el circuito simulado, pero utilizando un interruptor para verificar el de las conmutaciones de un interruptor, modelando de esta forma un transitorio dentro de la operación de un sistema eléctrico, para el cual se utilizan tres interruptores con diferentes valores de tiempo de conmutación, para poder de esta forma obtener un resultado más cercano a la operación mecánica real de un interruptor monofásico.

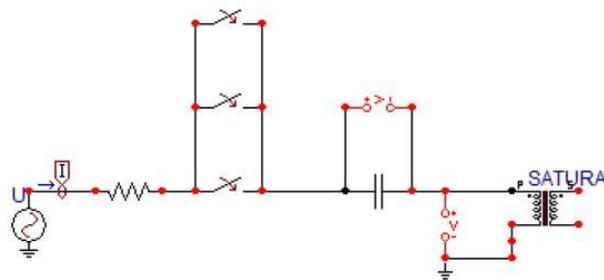


Imagen A2.1. Esquema, para simular los circuitos resonantes monofásicos utilizando tres interruptores para simular un transitorio.

En las siguientes figuras, se detallan los resultados obtenidos en la simulación del circuito.

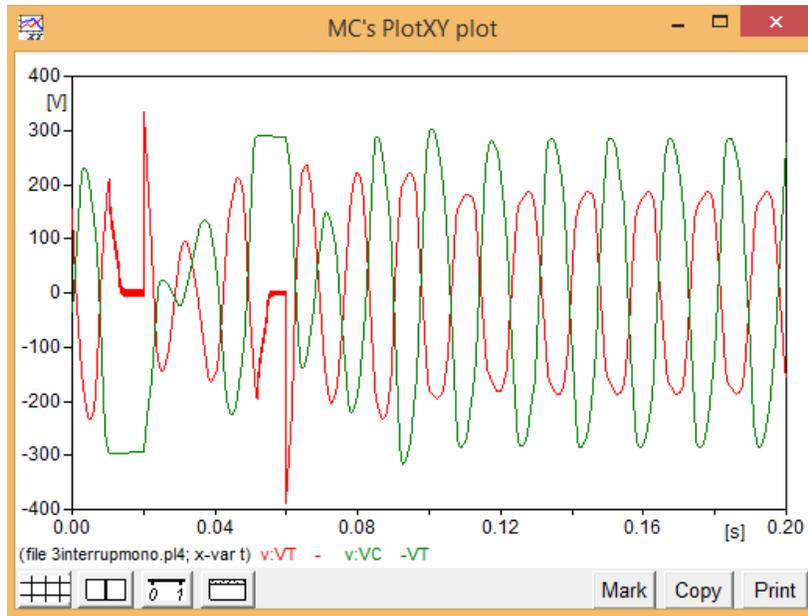


Imagen A2.2. Resultado obtenido en ATPDraw, de la operación de un interruptor monofásico en un sistema eléctrico.

En la imagen A2.2, se presentan dos formas de onda la verde, es el comportamiento del voltaje en el capacitor y la roja la del voltaje en el transformador, se puede verificar la inestabilidad y los picos de voltaje que aparecen en el instante de hacer el cierre del interruptor, estos pueden ser dañinos para el sistema eléctrico si son muy elevados las sobretensiones.

A2.2 Simulación de transformador trifásico saturable en vacío utilizando ATPDraw.

El comportamiento de un transformador trifásico saturable en vacío, se simula utilizando ATPDRAW, es de mucha importancia este análisis debido a que la operación de transformadores en vacío es una de las causas más comunes para que un transformador entre en ferresonancia, en la imagen A2.3, se muestra el modelo a utilizar para realizar este análisis.

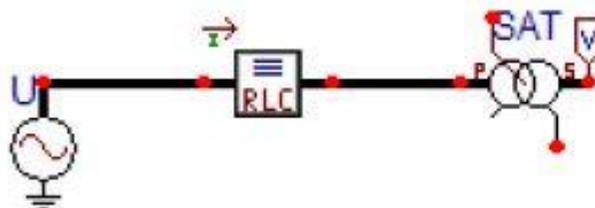


Imagen A2.3. Esquema dibujado en ATPDraw, para simular un transformador trifásico saturable en vacío.

En las imágenes que se muestran a continuación, se detallan algunas ventanas de como cargar los parámetros del modelo del transformador saturable, las cuales son necesarias introducir para obtener un resultado más apegado a la operación real de un transformador. En la *imagen A2.4*, se muestra la ventana en la cual se introducen los parámetros básicos del transformador saturable, este modelo es de gran utilidad ya que nos brinda una muy buena aproximación a la operación real del transformador.

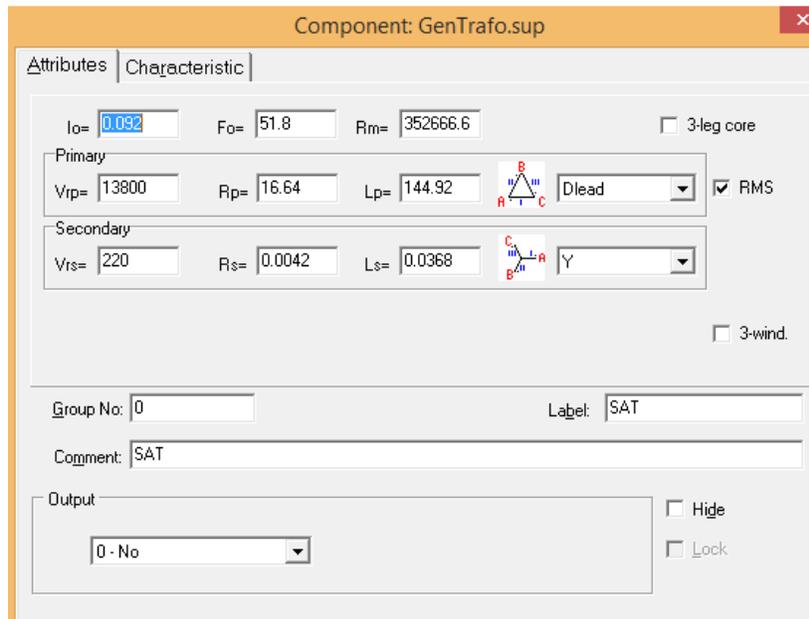


Imagen A2.4. Ventana para introducir los respectivos parámetros del transformador saturable en ATPDraw.

En la *imagen A2.5*, se muestra la ventana en la cual se introducen los datos de la curva de magnetización del transformador y de esta forma obtener una operación cercana a la real, logrando de esta manera obtener resultados satisfactorios con respecto a los datos obtenidos en la práctica.

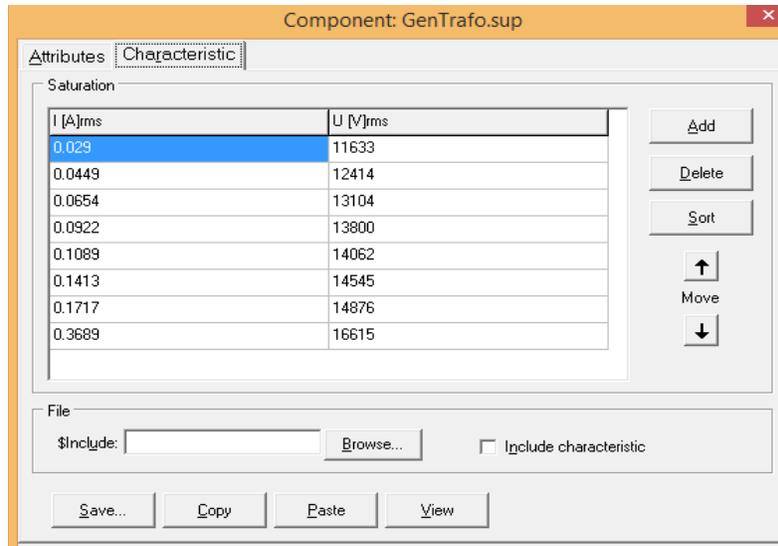


Imagen A2.5. Ventana para introducir los datos de carga de la curva de magnetización del transformador saturable en ATPDraw.

En la imagen A2.6, se muestran los resultados del voltaje, al simular el transformador trifásico saturable en la región de saturación.

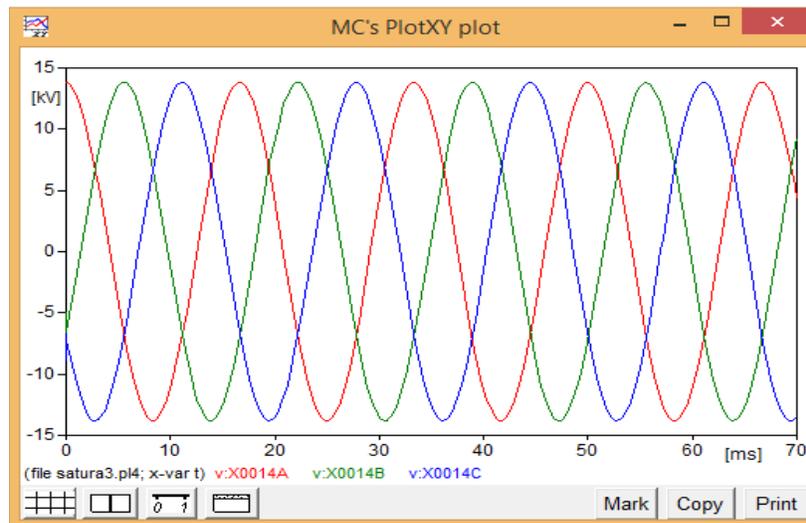


Imagen A2.6. Forma de onda de los voltajes trifásicos observados en la simulación del transformador saturable en ATPDraw.

En la imagen A2.7, se presenta la forma de onda de cada una de las corrientes obtenidas por cada fase del transformador, en la cual se puede notar que es una gráfica típica de saturación de un transformador.

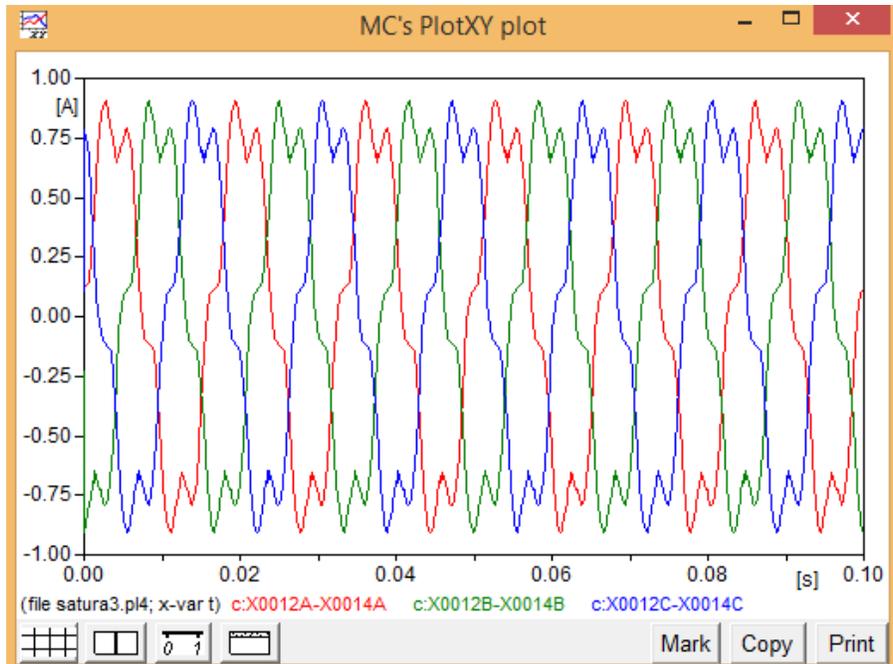


Imagen A2.7. Forma de onda de las corrientes trifásicas observadas en la simulación del transformador saturable en ATPDraw