



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS
EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A
TRAVÉS DEL SOFTWARE ATP DRAW”

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico
en Sistemas Eléctricos de Potencia

Autores:

Chicaiza Ortega Mario Orlado

Regalado Chamorro Fabián Alexander

Tutor:

MSc. Ing. Pesantez Palacios Gabriel Napoleón

LATACUNGA – ECUADOR

Marzo - 2021



DECLARACION DE AUTORIA

Yo **Mario Orlando Chicaiza Ortega** y **Fabián Alexander Regalado Chamorro** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A TRAVÉS DEL SOFTWARE ATP DRAW.”, siendo el **MSc. Ing. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios** tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Chicaiza Ortega Mario Orlando
C.I.: 185029510-4

Regalado Chamorro Fabián Alexander
C.I.: 172381141-8

MSc. Ing. Gabriel Napoleon Pesantez Palacios
C.I.: 030189388-9



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

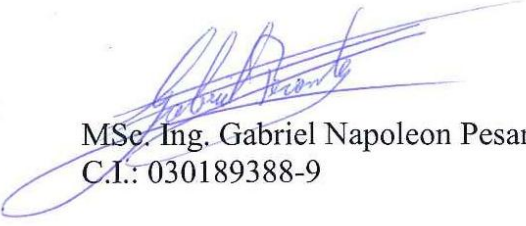
En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A TRAVÉS DEL SOFTWARE ATP DRAW”, de **Chicaiza Ortega Mario Orlando** y **Regalado Chamorro Fabián Alexander**, de la carrera de **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico- técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de **Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Marzo, 2021

El Tutor

Firma



MSc. Ing. Gabriel Napoleon Pesantez Palacios
C.I.: 030189388-9



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS**; por cuanto, los postulantes: **Mario Orlando Chicaiza Ortega** y **Fabián Alexander Regalado Chamorro** con el título de Proyecto de titulación: **"ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A TRAVÉS DEL SOFTWARE ATP DRAW."** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo, 2021

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)

Nombre: MSc. William Guaman
CC: 060357895-6

Lector 2

Nombre: MSc. Carlos Quinatoa
CC: 0503287864

Lector 3

Nombre: PhD. Iliana Gonzales
CC: 175707065-9

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, nuestros agradecimientos van dirigidas a Dios por iluminarnos y guiarnos en el camino a seguir en nuestra vida diaria, también un agradecimiento muy especial a nuestros padres que son nuestro impulso y conciencia que nos ayuda a seguir cada día superándonos y no desviarnos del camino, además son un ejemplo de perseverancia y constancia que con las pocas oportunidades que han tenido han sabido superarse. En segundo lugar, un agradecimiento especial a nuestra familia, a nuestros amigos, y a aquellas personas que de alguna u otra manera nos han ayudado a cumplir nuestra meta propuesta.

DEDICATORIA

Dedicamos este presente trabajo a aquellas personas que son nuestro motor en la vida, que con sus ejemplos de vida, consejos y apoyo incondicional nos incitaron a seguir el camino de la superación y no rendirnos ante ningún obstáculo, a aquellas personas que se esforzaban cada día para brindarnos lo necesario para que nosotros podamos seguir en nuestro camino académico sin importarles lo difícil que sea conseguir los recursos necesarios, a esas personas solo se los puede describir con una sola palabra PADRES.

ÍNDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. RESUMEN DEL PROYECTO.....	2
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
4.1. Beneficiarios Directos.	3
4.2. Beneficiarios Indirectos.....	3
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
5.1. Descripción del problema.....	3
5.2. Planteamiento del problema	4
6. OBJETIVOS	4
6.1. Objetivo general	4
6.2. Objetivos específicos.....	4
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	5
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	6
8.1. ANTECEDENTES	6
8.2. MARCO TEÓRICO	7
8.2.1. Definición de Radiación Solar	7
8.2.2. Introducción a las Tormentas Solares	7
8.2.3. Modelado del Transformador	9
8.2.3.1 Transformador ideal	9

8.2.3.2 Curva de saturación del transformador	10
8.2.3.3 Modelo circuital del transformador.....	11
8.2.3.4 Clasificación de los transformadores	13
8.2.3.5 Tipo de conexión de los transformadores	13
a. Conexión estrella-estrella.....	14
b. Conexión delta-estrella.....	14
c. Conexión estrella- delta.....	15
8.2.4. Corrientes Geomagnéticas Inducidas (GIC's)	16
8.2.4.1 Formación de las corrientes de inducción geomagnética.....	16
8.2.4.2 Cantidad de corriente inducida por unidad de área terrestre.....	17
8.2.4.3 Frecuencia y Amplitud.....	18
8.2.5. Efectos de las GIC's en el Sistema Eléctrico.....	18
8.2.5.1 Efectos en los generadores.	18
8.2.5.2 Efectos en las protecciones.	19
8.2.5.3 Efectos en las comunicaciones.....	19
8.2.5.4 Corriente geomagnética inducida a través del transformador.....	20
a. Calculo de la GIC que circula por un transformador.....	20
b. Efectos en los transformadores	22
8.2.6. Métodos de Prevención y Mitigación de las GIC	24
8.2.6.1 Dispositivos de bloqueo pasivo.....	24
8.2.6.2 Sistema de bloqueo del neutro	24
8.2.7. Cálculo del Total de Distorsión Armónica (THD)	25
8.2.8. Calculo de la Potencia Reactiva (Q)	26

9. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS.....	26
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
10.1. Métodos de la investigación.	26
10.1.1. Método documental.	26
10.1.2. Método deductivo-inductivo.....	27
10.2. Técnicas de investigación.....	27
10.2.1. Adquisición de datos.....	27
10.2.2. Modelación.	27
10.2.3. Simulación.	27
10.3. Metodología de Desarrollo.	27
10.3.1. Modelado del transformador para análisis de GIC.	27
10.3.2. Modelo saturable del transformador.	29
10.3.3. Parámetros utilizados en el modelo del transformador simplificado.....	30
10.4. Saturación del núcleo.....	31
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	31
11.1 Conexión Δ -Y	31
11.1.2 Evaluación del THD.	32
11.2. Conexión Y- Δ	37
11.2.1 Evaluación del THD.	38
11.3. Conexión Y-Y	42
11.3.1 Evaluación del THD.	43
11.4. CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA.....	48

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
13. BIBLIOGRAFÍA	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 8.1. Tormenta solar impactando la magnetosfera terrestre	8
Figura 8.2. Electrojet ecuatorial sobre el mapa del mundo	9
Figura 8.3. Esquema básico de un transformador ideal	10
Figura 8.4. Curva de saturación de un material ferromagnético	11
Figura 8.5. Curva de histéresis	11
Figura 8.6. Circuito equivalente del transformador real.....	12
Figura 8.7. Conexión del transformador estrella-estrella	14
Figura 8.8. Conexión del transformador delta-estrella	15
Figura 8.9. Conexión del transformador estrella-delta.....	15
Figura 8.10. Recorrido de las CIG en un Sistema de potencia.....	16
Figura 8.11. Modelo simplificado del transformador	20
Figura 8.12. Comportamiento del flujo y de la corriente de excitación puramente alterna y excitación alterna + directa.....	23
Figura 8.13. Transformador dañado por Sobre calentamiento en la tormenta solar de marzo de 1989	23
Figura 8.14. Esquema del sistema de bloqueo del neutro	25
Figura 10.1. Modelo del transformador real.....	27
Figura 10.2. Modelo del transformador simplificado.....	28
Figura 10.3. Modelo del transformador para nuestro estudio	28
Figura 10.4. Modelo de transformador trifásico con rama de magnetización saturable	29
Figura 10.5. Corriente de Excitación y Magnetización en condiciones normales	29
Figura 10.6. Propuesta del Modelo del Transformador para análisis de las GIC	30

Figura 11.1. Modelo para análisis GIC conexión Δ -Y	31
Figura 11.2. Equilibrio de saturación conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	32
Figura 11.3. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	32
Figura 11.4. Valoración del THD en la rama de magnetización conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	33
Figura 11.5. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	34
Figura 11.6. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	35
Figura 11.7. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	36
Figura 11.8. Modelo para análisis GIC conexión Y- Δ	37
Figura 11.9. Equilibrio de saturación conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA	37
Figura 11.10. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	38
Figura 11.11. Valoración del THD en la rama de magnetización conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	39
Figura 11.12. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA	40
Figura 11.13. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA	41
Figura 11.14. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA	41
Figura 11.15. Modelo para análisis GIC conexión Y-Y.....	42

Figura 11.16. Equilibrio de saturación conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	43
Figura 11.17. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	43
Figura 11.18. Valoración del THD en la rama de magnetización conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	44
Figura 11.19. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.....	45
Figura 11.20. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	46
Figura 11.21. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.1. Clasificación de los transformadores.....	13
Tabla 10.1. Valores utilizados en el modelo simplificado del transformador	30
Tabla 11.1. Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Δ -Y	33
Tabla 11.2. Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Δ -Y	34
Tabla 11.3. Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia conexión Δ -Y	35
Tabla 11.4. Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Δ -Y	36
Tabla 11.5. Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Y- Δ	38
Tabla 11.6. Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Y- Δ	39
Tabla 11.7. Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia conexión Y- Δ	40
Tabla 11.8. Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Y- Δ	41
Tabla 11.9. Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Y-Y	44
Tabla 11.10. Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Y-Y	45
Tabla 11.11. Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia conexión Y-Y	46
Tabla 11.12. Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del	

transformador de potencia conexión Y-Y	47
Tabla 11.13. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Δ -Y	48
Tabla 11.14. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Y- Δ	48
Tabla 11.15. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Y-Y	48

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A TRAVÉS DEL SOFTWARE ATPDRAW”

Autores: Mario Orlando Chicaiza Ortega

Fabián Alexander Regalado Chamorro

RESUMEN

En el presente trabajo se detalló el comportamiento de la rama de magnetización del transformador de potencia ante la presencia de corrientes geomagnéticas inducidas (GIC), con el fin de analizar los efectos causados por la inserción de corriente al neutro del transformador, esto se elaboró a través del software ATP Draw seleccionando el modelo del transformador simplificado que parte del transformador real, como resultados se obtuvieron los parámetros eléctricos de voltajes de entrada y salida del transformador, corrientes de entrada y salida del transformador y finalmente corriente y potencia reactiva en la rama de magnetización del transformador. Con este análisis los datos obtenidos incluido graficas se asemejarán a los datos de un transformador real, permitiendo un ahorro considerable en relación de usarse los equipos e instrumentación de manera física de un transformador real.

Palabras claves: Transformador, Simulación, GIC, Saturación.

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**TOPIC: "ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE GEOMAGNETIC CURRENTS
INDUCED IN THE POWER TRANSFORMERS, THROUGH SIMULATION,
THROUGH THE ATPDRAW SOFTWARE"**

Authors: Mario Orlando Chicaiza Ortega

Fabián Alexander Regalado Chamorro

ABSTRACT

In the present work the behavior of the power transformer magnetization in the presence of induced geomagnetic currents (GIC) was detailed, in order to analyze the effects caused by the insertion of current to the neutral of the transformer, it was elaborated through the ATP Draw software selecting the simplified transformer model that starts off from the real transformer, as results, the electrical parameters of the input and output transformer`s voltages those were obtained input and output currents transformer and finally current and reactive power in the magnetizing branch of the transformer. With this analysis, the data obtained including graphs will resemble the data of a real transformer, allowing considerable savings in relation to using the equipment and instrumentation in a physical way of a real transformer.

Keywords: Transformer, Simulation, GIC, Saturation.



AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen del proyecto de investigación al idioma Inglés presentado por los señores, egresados de la Carrera de **INGENIERÍA ELÉCTRICA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, **CHICAIZA ORTEGA MARIO ORLANDO** y **REGALADO CHAMORRO FABIÁN ALEXANDER**, cuyo título versa: **“ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIÓN, A TRAVÉS DEL SOFTWARE ATPDRAW”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, marzo del 2021

Atentamente,

Lic. Edison Marcelo Pacheco Pruna Mg.

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS

C.C. 050261735-0

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto

“Análisis del impacto de las corrientes geomagnéticas inducidas en los transformadores de potencia, mediante simulación, a través del software ATP Draw”

Fecha de Inicio: 25 de Mayo del 2020.

Fecha de Finalización: 12 de Marzo del 2021.

Lugar de ejecución: Cotopaxi, Latacunga, San Felipe, Eloy Alfaro, Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad de auspicio: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicio: Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Proyecto de investigación vinculado: Estudio de Campos electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia: Caso Ecuador.

Equipo de trabajo:

- MSc. Ing. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios
- Chicaiza Ortega Mario Orlando
- Regalado Chamorro Fabián Alexander

Área de Conocimiento

07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublínea de la investigación de la carrera de ingeniería eléctrica:

Explotación y diseño de Sistemas Eléctricos de Potencia.

2. RESUMEN DEL PROYECTO

Mediante la utilización del software de simulación ATP Drawn se puede realizar los diferentes modelamientos virtuales de los sistemas eléctricos de potencia, estos a su vez permiten la obtención de datos numéricos y curvas de operación de cada equipo del sistema. Dentro de los equipos y elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia uno de los principales es el transformador, este equipo permite la interconexión entre dos redes distintas mediante el aumento o disminución de la tensión.

El transformador puede estar expuesto a diferentes eventos en el sistema eléctrico por lo cual los resultados de la simulación mostrarán el comportamiento del transformador ante estos, uno de los eventos que puede alterar el funcionamiento normal de un transformador son las GIC que son representadas como corrientes continuas y que ingresan al transformador por medio de la conexión a tierra de los mismos.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Las corrientes geomagnéticas inducidas al igual que varios fenómenos espaciales han sido caso de estudio por presentar consecuencias adversas en los sistemas de comunicación y en los sistemas eléctricos de potencia, dando a entender que los sistemas antes mencionados serían los más susceptibles a la influencia en estos eventos ya que están conformados con materiales conductores. Un estudio detallado sobre este fenómeno es muy importante para la planificación de estrategias contra los efectos negativos que ocasiona en el funcionamiento de un SEP.

Para este caso nos concentraremos en los Sistemas Eléctricos de Potencia los mismos que están conformados por varios elementos entre los cuales el transformador ha sido el más afectado ante este fenómeno. Debido a esto el presente estudio ayudará a conocer el comportamiento de este elemento bajo condiciones GIC.

Para una mejor comprensión del comportamiento del transformador cuando es afectado por las corrientes geomagnéticas inducidas, se propone realizar la simulación de la máquina eléctrica en cuestión, cuyo modelo se introducirá en el software ATP Draw, una herramienta con la que los estudiantes de ingeniería se encuentran familiarizados.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

4.1. Beneficiarios Directos.

A través del desarrollo de esta investigación los beneficiarios en su mayoría serán los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica que con uso de esta investigación podrán proponer nuevos proyectos investigativos que relacionen el geomagnetismo y puedan dar mejores soluciones con el paso del tiempo y los avances tecnológicos.

4.2. Beneficiarios Indirectos.

Se lograría un beneficio en las empresas eléctricas de transmisión ya que con el uso de esta investigación podrían establecer protocolos de funcionamiento bajo condiciones GIC.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

5.1. Descripción del problema

La influencia de las corrientes geomagnéticas inducidas (GIC) conlleva un gran estudio que trata de resolver diversos fallos que se registran en redes eléctricas, de los mismos una gran cantidad no tienen respuesta convencional, sin embargo, se puede tener como una alternativa una falla ocasionada por las GIC, el trabajo muestra acontecimientos por la presencia de estas mismas.

El equipo más afectado de un sistema eléctrico bajo condiciones GIC es el transformador de potencia, siendo la rama de magnetización la parte más afectada, presentando problemas de distorsión de las variables eléctricas, además incrementa el consumo de potencia reactiva, ocasionando problemas en los sistemas de protección y aumento en la temperatura del transformador.

La presente investigación fue orientada por los efectos ocasionados por las tormentas geomagnéticas (electrojet) sobre las redes eléctricas en especial en nuestro país, por ese motivo se busca comprender el modelamiento y realizar una simulación para observar los

posibles efectos dentro de un transformador de potencia y el comportamiento de su rama de magnetización bajo condiciones GIC, a través del software ATP Draw.

5.2. Planteamiento del problema

El estudio de la maquina eléctrica se ve limitado debido a los costos elevados que existen tanto en herramientas de medición como el del mismo transformador.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Realizar un análisis del impacto de las corrientes geomagnéticas inducidas en los transformadores de potencia, usando herramientas de simulación, para determinar el punto de operación de este elemento bajo condiciones GIC.

6.2. Objetivos específicos

- a) Realizar el estudio del arte sobre la propagación de las GIC en los Sistemas Eléctricos de Potencia.
- b) Seleccionar un modelo de transformador apropiado para representar los efectos en la rama de magnetización ante alguna afectación.
- c) Analizar los resultados del comportamiento del transformador de potencia bajo el fenómeno de las GIC.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Objetivos	Actividades	Resultados de la actividad	Medios de verificación
Realizar el estudio del arte sobre la propagación de las GIC en los Sistemas Eléctricos de Potencia.	Investigación bibliográfica (formas de propagación de las GIC en un SEP, consecuencias).	Conexiones del transformador de potencia utilizadas para análisis de las GIC.	Sección 8.2.3.4. de este informe
		Amplitud y frecuencia de trabajo de las GIC (valores citados).	Sección 8.2.4.3. de este informe
Desarrollar un modelo saturable del transformador para apreciar los efectos en la rama de magnetización.	Investigación bibliográfica (configuraciones del transformador en condiciones GIC).	Obtención del modelo del transformador.	Sección 10.3.1. de este informe
		Modelo del transformador con su rama de magnetización, carga inductiva resistiva y bajo condiciones GIC.	Sección 10.3.2. de este informe
Analizar el comportamiento del transformador de potencia bajo el fenómeno de las GIC.	Incorporación de la GIC en el transformador.	Se obtuvo corrientes de excitación y magnetización en vacío.	Figura 10.4. de este informe
		Se obtuvo corrientes de excitación y magnetización a diferentes magnitudes de las GIC y diferentes conexiones del transformador.	Sección 11 de este informe

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. ANTECEDENTES

Las tormentas geomagnéticas pueden afectar los satélites de comunicación, interrumpir la comunicación por radio al cambiar el estado de la ionosfera, inducir corrientes eléctricas de baja frecuencia en conductores largos como líneas de alta tensión e interrumpir las redes eléctricas. Durante una tormenta magnética, las corrientes magnetosféricas se desvían a través de la ionosfera de la Tierra, causando grandes perturbaciones en el campo geomagnético observado en el suelo [1].

Se han observado fallas en los transformadores en los sistemas de energía en latitudes medias y bajas. Las observaciones magnéticas terrestres han contribuido enormemente a la monitorización de los niveles de actividad geomagnética y al estudio del impacto de las tormentas geomagnéticas en la tierra [1].

Las partículas de baja energía precipitan en las altas latitudes y causan auroras, mientras que los protones de alta energía se desplazan hacia el oeste y los electrones hacia el este, formando una "corriente de anillo" centrada cerca del ecuador alrededor de la Tierra, lo que provoca una reducción en el campo geomagnético (tiempo de tormenta campo de perturbación) [2].

El electrojet ecuatorial (EEJ) es una corriente eléctrica que fluye en la región de altura de aproximadamente 90 a 120 km (en la región ionosférica), cubriendo un rango latitudinal de $\pm 3^\circ$ alrededor del ecuador de inmersión. Está impulsado por el campo eléctrico del dínamo de la región E y representa un aspecto importante de la fenomenología del sistema ecuatorial de ionosfera-termosfera [3].

En la práctica los transformadores con conexiones en estrella y neutros aterrizados a tierra que están unidos por largas líneas de transmisión, son más susceptibles a presentar problemas de funcionamiento debido a las corrientes inducidas que fluyen a través de la línea de transmisión y los neutros que están conectados a tierra para cerrar el circuito [4].

Existen avances en el modelado del transformador, pero para el estudio del fenómeno de GIC no han sido aplicados todavía. Una de las claves para este estudio es modelar correctamente la característica de saturación del núcleo y partiendo de ahí observar los demás efectos en las señales eléctricas del transformador. El modelo del transformador saturable ha sido muy

utilizado en la investigación del fenómeno GIC [5].

8.2. MARCO TEÓRICO

8.2.1. Definición de Radiación Solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. La energía procedente del sol es radiación electromagnética proporcionada por las reacciones del hidrogeno en el núcleo del sol por fusión nuclear y emitida por la superficie solar [6].

El sol emite energía en forma de radiación de onda corta y esta al llegar a la tierra tienen que pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento en la capa de ozono y el vapor de agua y por partículas en suspensión, un porcentaje de esta radiación sobrepasan estas capas y alcanzan la superficie terrestre oceánica y continental [6].

La cantidad de radiación solar que llega a nuestro planeta depende de factores como la distancia entre la tierra y el sol, la dirección o el ángulo en que estas radiaciones entran a la atmosfera y los movimientos que normalmente tiene la tierra de rotación y traslación.

8.2.2. Introducción a las Tormentas Solares

Los indicios solares ocurren cuando la energía magnética se encuentra acumulada en la atmósfera solar cerca de las manchas solares y repentinamente es liberada como un estallido semejante a diez millones de erupciones volcánicas, al ocurrir este fenómeno son liberadas al espacio un sinnúmero de partículas eléctricamente cargadas. Los indicios más fuertes ocurren sólo algunas veces al año, mientras que los indicios más leves son relativamente comunes; tanto que pueden ocurrir hasta una docena de veces al día [7].

El otro fenómeno solar de importancia es la Expulsión de Masa Coronal (CME), el equivalente de un huracán en la Tierra. La corona es la región gaseosa sobre la superficie solar que se extiende millones de millas hacia el espacio [7].

La tormenta solar conocida también como tormenta geomagnética, es un fenómeno que altera temporal de la magnetosfera terrestre, provocada por iones provenientes del sol. Los iones pueden llegar en forma de viento solar o eyección de masa coronal como se observa en la

Figura 8.1. [7].

La actividad solar varía en ciclos de 11 años, tal y como descubrió Heinrich Schwabe en el siglo XIX. Cuando dicha actividad es muy alta, se forman manchas solares, que son las culpables de la eyección de masa coronal, mientras que los vientos solares, se dan cuando la actividad solar es más débil [8].

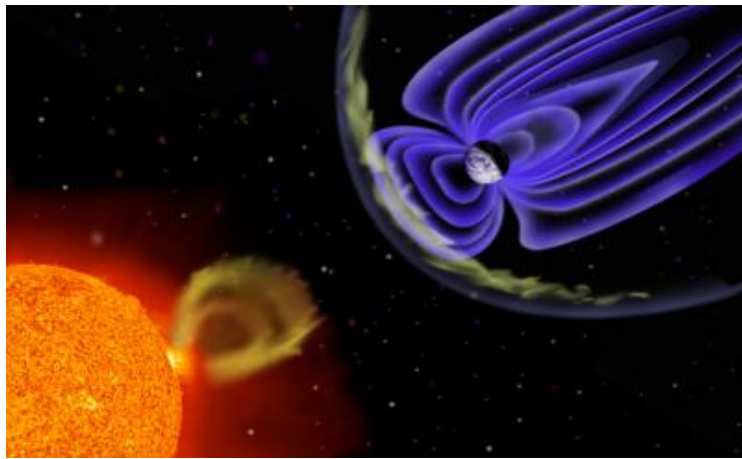


Figura 8.1. Tormenta solar impactando la magnetosfera terrestre [7].

Según los datos estadísticos La zona en la es más posible que se produzca una afectación es la zona aural, donde las tormentas solares se dejan ver en forma de auroras boreales, y este fenómeno se da entre las latitudes de 55° y 70° , aunque la variación de estos factores, hace factible la posibilidad de una gran afectación a las redes eléctricas las cuales se ubican lejanas a estas latitudes.

Sin embargo, la electrojet ecuatorial representa un intenso flujo de corriente eléctrica a lo largo del ecuador magnético en la ionosfera en el lado del día, tal como se ve en la Figura 8.2. La principal razón para la alta intensidad de corriente es la geometría del campo geomagnético, se produce dentro de una estrecha banda de unos 500 km de ancho donde las líneas de campo magnético son paralelas a la superficie de la Tierra y la conductividad es significativamente mayor [9].

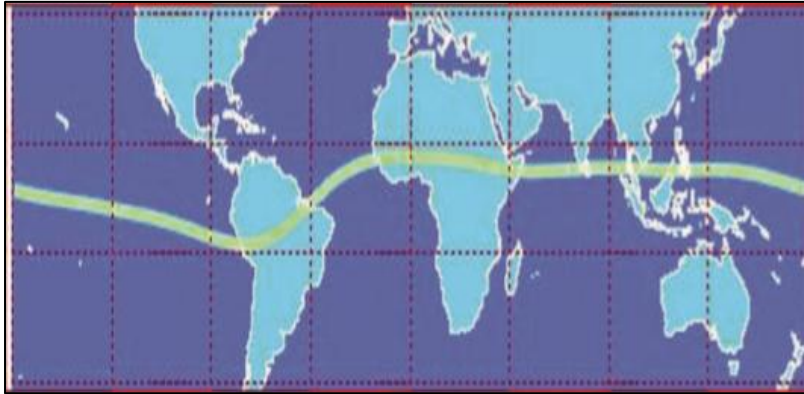


Figura 8.2. Electrojet ecuatorial sobre el mapa del mundo [9].

8.2.3. Modelado del Transformador

Las discrepancias técnicas entre un modelo de transformador cercano real y un modelo ideal deben incluirse en mayor o menor medida en la mayoría de los rendimientos de transformadores. Dependiendo del estudio que se planea a realizar, será el detalle técnico que llevará el modelo.

Es correcto pensar que entre más detallado sea un modelo se obtienen mejores resultados, sin embargo, no siempre es recomendable utilizar modelos muy complejos para todos los estudios, dado a que la representación matemática de cada elemento sería compleja y esto conllevaría a la necesidad de una gran capacidad computacional y tiempos prolongados de cálculo y simulación. Por esta razón el uso de un modelo simplificado da buenos resultados para algunas variedades de estudios [3].

8.2.3.1 Transformador ideal

Los transformadores ideales son formas idealizadas de los transformadores reales, estos transformadores aparecen en los modelos circuitales, o circuitos equivalentes, de los transformadores reales y de otras máquinas eléctricas como se observa en la Figura 8.3. Las diferencias entre los transformadores ideales y los reales, no son muy grandes, y en algunos casos particulares, a estos últimos se los puede considerar como ideales [10].

Los transformadores ideales pueden ser monofásicas, trifásicas, multicircuito o especiales, pero todos tienen en común las siguientes propiedades:

- No existe pérdida de ningún tipo dado que entre los devanados primario y secundario existe un acople magnético perfecto.
- La permeabilidad relativa del núcleo se la considera infinita.

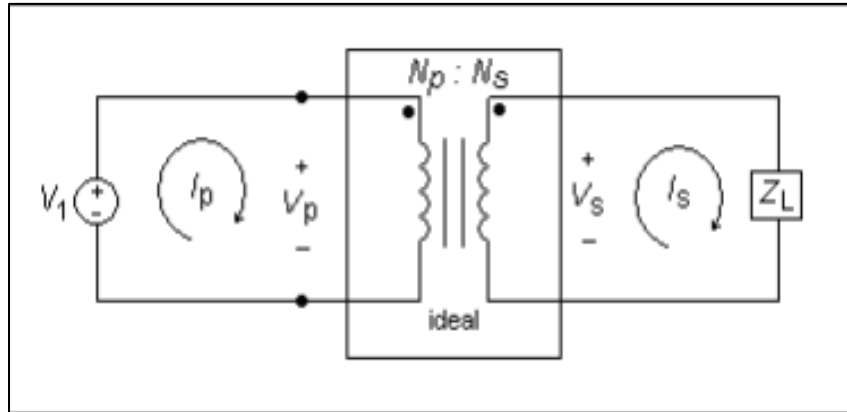


Figura 8.3. Esquema básico de un transformador ideal [10].

Para encontrar las relaciones entre las magnitudes del voltaje en el primario (V_p) y del voltaje en el secundario (V_s), así como la relación entre la corriente primaria (I_p) y la corriente secundaria (I_s), usaremos las ecuaciones 8.1 y 8.2.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (8.1)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (8.2)$$

N_p y N_s representan el número de vueltas de las espiras primarias y secundarias.

8.2.3.2 Curva de saturación del transformador

En la comprensión del funcionamiento del transformador lo esencial es tener en cuenta la restricción que presenta el núcleo debido a que este limita el desempeño del flujo magnético, actor principal en la transformación de energía. Los núcleos constituidos por materiales ferromagnéticos presentan limitaciones de; estos no pueden soportar densidades de flujo magnético infinitas ya que se tienden a saturar a un nivel determinado por la dimensión del núcleo y el tipo de material. Se presenta un comportamiento no lineal al presentarse un incremento en el voltaje de excitación lo cual distorsiona el flujo magnético [11].

La Figura 8.4, describe la curva de saturación de un material ferromagnético (núcleo del transformador) en esta se puede distinguir tres zonas. La primera, es una zona reversible en la cual si se elimina el campo magnético H la densidad de flujo B también desaparece, la segunda zona irreversible y una última zona de saturación donde la permeabilidad relativa del material es uno y B ya no incrementa más. Si se varia H , modificando la corriente que circula

por la bobina del transformador se obtiene la curva de histéresis que se puede observar la Figura 8.5.

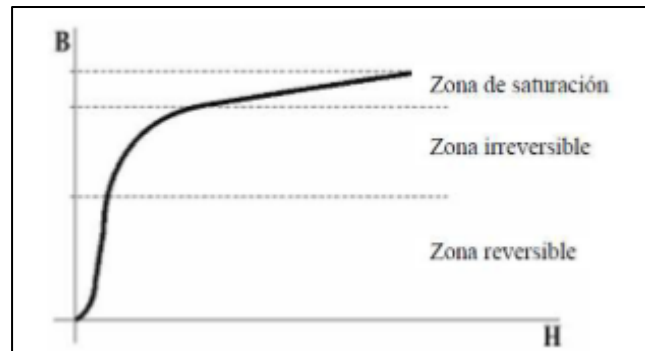


Figura 8.4. Curva de saturación de un material ferromagnético [11].

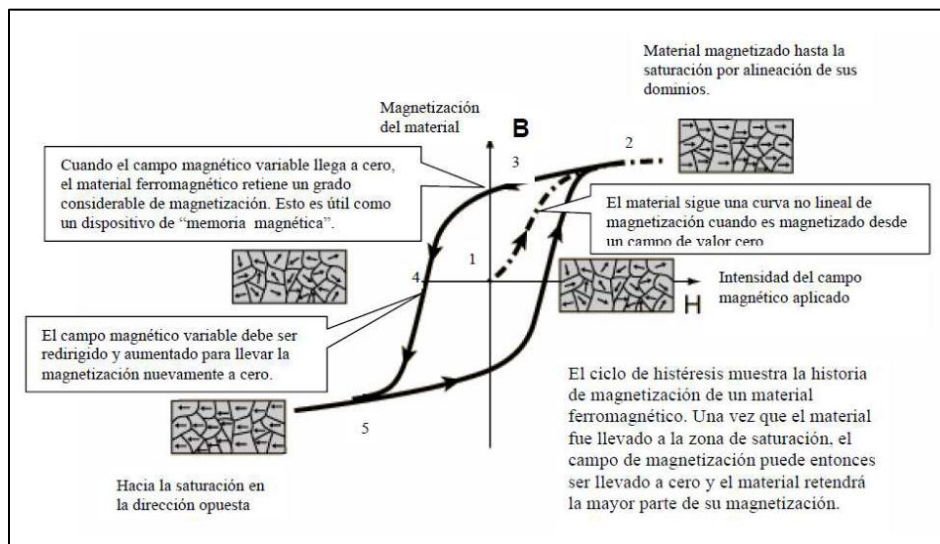


Figura 8.5. Curva de histéresis [11].

8.2.3.3 Modelo circuital del transformador

Se puede partir de un modelo de transformador real para llegar al circuito equivalente permitiendo tener las características esenciales de un transformador real.

Para iniciar la elaboración de un circuito equivalente, se debe considerar el funcionamiento de los devanados. El efecto más sencillo de modelar son las pérdidas en el cobre; dado a que son pérdidas resistivas que se presentan en los devanados primario y secundario, se modelan disponiendo de un resistor R_1 en el circuito primario y un resistor R_2 en el circuito secundario del transformador [12].

Otra de las pérdidas es de flujo disperso que tienen efectos en los devanados del

transformador. Este flujo es proporcional a la corriente primaria que es responsable de una caída de tensión la cual se representa a través de una reactancia inductiva X_{L1} llamada reactancia de dispersión primaria, que se coloca en serie con R_1 y se conecta al lado primario de un transformador ideal. Del mismo modo se añade la reactancia de dispersión secundaria X_{L2} en serie con la resistencia del devanado secundario R_2 , y ambas son conectadas al lado secundario del transformador ideal.

La corriente de excitación en vacío del devanado primario I_0 , está integrada por dos componentes, la componente magnética I_m , responsable de producir el flujo mutuo ϕ_m , y la componente de pérdidas del núcleo I_c que representa la potencia activa extraída de la fuente para abastecer las pérdidas por corrientes parásitas e histéresis [12].

La componente del núcleo (I_c) está en fase con la tensión inducida y adelanta a la componente de magnetización (I_m) por 90° . Con el lado secundario en vacío, el transformador se comporta como un circuito altamente inductivo debido a su núcleo magnético, lo que provoca la corriente en vacío I_0 va en retraso a la tensión aplicada 90° , o sea que I_m es usualmente mucho mayor que I_c .

En el circuito equivalente, la componente magnética es representada por una reactancia X_m , y la componente de pérdidas del núcleo se simboliza con una resistencia R_c . En situaciones cuando se tiene carga conectada al lado secundario, la corriente de excitación suele ser muy pequeña comparada con la corriente de carga y en ocasiones suele despreciarse.

Uniendo todas las representaciones de los efectos descritos, se obtiene el circuito equivalente que se muestra en la Figura 8.6.

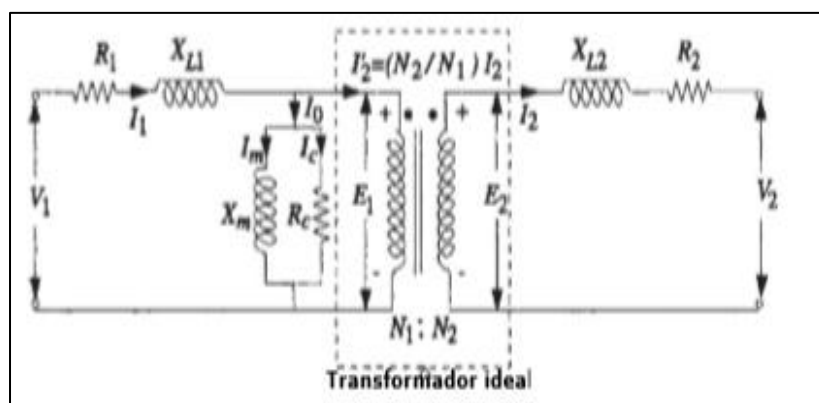


Figura 8.6. Circuito equivalente del transformador real [13].

8.2.3.4 Clasificación de los transformadores

Los transformadores se suelen clasificar según su utilización, el elemento a transformar, su forma de construcción, etc. Como se observa en la Tabla 8.1. En el presente trabajo se centrará en los transformadores de potencia que son los que presentan mayores problemas de funcionamiento ante la presencia de las GIC.

Este grupo se conforma por los transformadores usados en las centrales de generación de energía eléctrica para elevar el voltaje a los niveles requeridos para transportarse a través de las líneas de transmisión o para disminuir el voltaje en las subestaciones de Subtransmisión y distribución.

Tabla 8.1. Clasificación de los transformadores.

Según su funcionalidad	Transformadores de potencia
	Transformadores de comunicaciones
	Transformadores de medida
Según sistema de alimentación	Monofásico
	Trifásico
Según la tensión secundaria	Elevadores
	Reductores
Según aislamiento	Seco (aire o gas)
	Aceite dieléctrico
	Encapsulados
Según refrigeración	Aceite natural/Aire natural (ON/AN)
	Aceite forzado/ Aire forzado (OF/AF)
	Aceite, Agua forzados (FOW)
	Aceite natural/ Aire forzado (ON/FA)

8.2.3.5 Tipo de conexión de los transformadores

En esta clasificación solo se tomará en cuenta las conexiones en las que se puede aplicar el caso de estudio.

a. Conexión estrella-estrella

Esta conexión se muestra en la Figura 8.7. En esta conexión, el voltaje de línea secundario es igual al voltaje de línea primario multiplicado por el inverso de la relación de transformación. Esta configuración solo se usa cuando el neutro del lado primario puede combinarse correctamente al neutro de la fuente. Si los neutros no están unidos, la tensión entre línea y neutro resulta distorsionada [14].

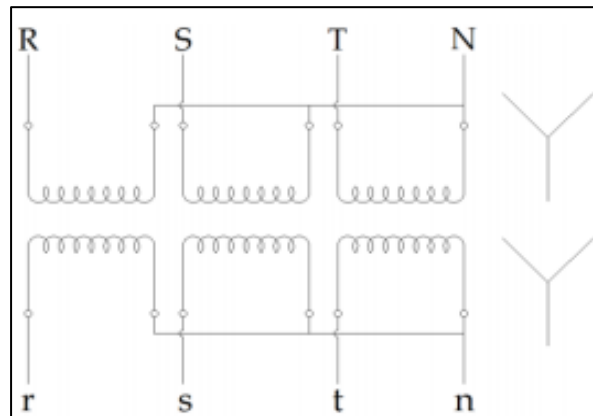


Figura 8.7. Conexión del transformador estrella-estrella [14].

b. Conexión delta-estrella

La conexión delta-estrella Y se utiliza para elevar la tensión, debido a que en la misma relación de transformación interviene el factor 3 que multiplica la tensión del secundario [15].

$$r_t = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{s1}}{\frac{U_{s2}}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}U_{s1}}{U_{s2}} = \frac{\sqrt{3}N1}{N2} \quad (8.3)$$

Esta conexión se observa en la Figura 8.8., la cual es utilizada mucho en los transformadores elevadores en las redes de A.T. Como se observa la alta tensión está en el lado de la estrella, lo cual permite poner a tierra el punto neutro, con lo que queda limitado del potencial sobre cualquiera de las fases a la tensión simple del sistema.

Además, esta configuración es muy utilizada en transformadores de distribución colocando la conexión estrella Y en el lado de baja tensión, permitiendo alimentar cargas monofásicas y trifásicas entre fase y neutro.

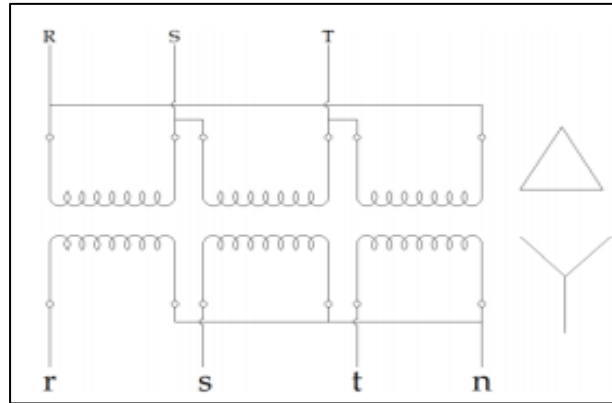


Figura 8.8. Conexión del transformador delta-estrella [14].

c. Conexión estrella- delta

La conexión estrella Y- delta se presencia en la Figura 8.9., y es usada comúnmente para disminuir el nivel de tensión, ya que, interviene el valor 3 para reducir la tensión del secundario. Debido a este factor reductor añadido, esta conexión se usa en subestaciones de alta tensión reductoras, subestaciones de reparto y de distribución [15].

$$r_{tm} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\frac{U_{S1}}{\sqrt{3}}}{U_{S2}} = \frac{N1}{\sqrt{3}N2} \quad (8.4)$$

En esta conexión no presenta problemas de armónicos de tensión. Es una cierta ventaja la conexión delta ya que redistribuye posibles desequilibrios y despeja problemas de armónicos. La conexión estrella Y- delta presenta como resultado un desfase de 30° entre los voltajes primarios y secundarios, ocasionando posibles inconvenientes al tratar de conectar en paralelo grupos de transformadores.

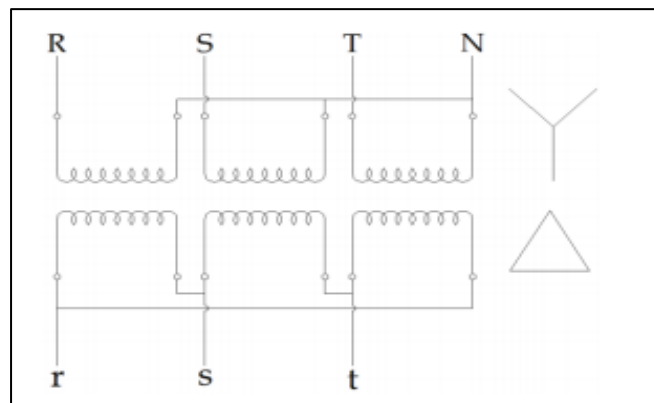


Figura 8.9. Conexión del transformador estrella-delta [14].

8.2.4. Corrientes Geomagnéticas Inducidas (GIC's)

Una corriente de inducción geomagnética (GIC) es un fenómeno causado por la interacción entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra, donde el viento solar penetra en forma violenta la magnetósfera de la Tierra y puede formar un alta corriente electrojet en la ionósfera [16]

Esta corriente recorrerá el camino de menor resistencia, y en áreas de alta resistividad del suelo la corriente fluirá a través de las líneas de transmisión, tuberías de gas o cualquier otro medio conductor disponible que presente la menor resistencia al paso de la corriente, esto se precia en la Figura 8.10.

Estas GIC's que fluyen a través de las estructuras hechas por la humanidad pueden causar grandes daños sobre todo en el sistema eléctrico, y esta problemática se evidencia más en las regiones con latitudes mayores y con resistividades del suelo altas.

Las GIC's no solamente son problema para los sistemas eléctricos de potencia, sino también en los sistemas como los de radio de alta frecuencia, sistemas de posicionamiento global (GPS), rieles de ferrocarril, sistemas de comunicación por medio de cable o inalámbrico, tuberías, estudios geológicos, etc.

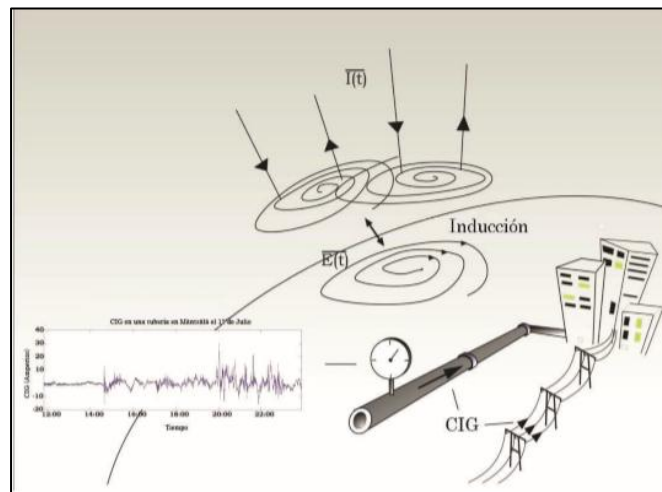


Figura 8.10. Recorrido de las CIG en un Sistema de potencia [16].

8.2.4.1 Formación de las corrientes de inducción geomagnética

Las características que presenta el campo eléctrico de la Tierra dependen de las fluctuaciones de las electrojet y la conductividad del suelo terrestre, por lo que puede decirse que la magnitud del campo geoelectrico se incrementa con el aumento de la corriente electrojet en el

tiempo y la disminución de la conductividad del suelo [16].

El campo geoelectrico lleva corrientes por las estructuras conductoras como las tuberías metálicas, líneas de transmisión de energía eléctrica y cables de comunicación por debajo y por encima de la superficie terrestre.

Dentro de estos factores los más sobresalientes son los siguientes:

- La actividad solar que influye en la intensidad y la probabilidad de una tormenta solar.
- El patrón y la magnitud de la intensidad del campo magnético y la orientación de las eyecciones de masa coronal solar, las cuales tienen gran relevancia en la forma como impacta la energía en la magnetósfera.
- La época del año y la hora del día a la que una eyección de masa de la corona afecta una determinada región con la respectiva orientación de la magnetosfera respecto al sol.
- La carga del sistema de potencia y la sensibilidad del mismo hacia las GIC.
- Varias eyecciones de masa coronal pueden golpear la Tierra en intervalos de tiempo pequeños haciendo que los efectos de una tormenta se superpongan sobre la otra.

Para evaluar la susceptibilidad de un sistema de ser afectado por tormentas solares se debe tomar en cuenta factores que no dependan del tiempo, dentro de los cuales se consideran los siguientes:

- La latitud geomagnética
- La conductividad del suelo
- La topología del sistema de potencia y sus propiedades eléctricas
- Las características geográficas.

8.2.4.2 Cantidad de corriente inducida por unidad de área terrestre

En el cálculo de GIC es necesario conocer las propiedades físicas del suelo para poder obtener el campo geoelectrico inducido. Este paso constituye la parte geofísica y uno de los puntos críticos de la resolución del problema. En realidad, es muy difícil conocer al detalle las propiedades eléctricas del terreno, incluso a nivel de superficie. El método más usado para esto es el sondeo magneto telúrico, una señal electromagnética (EM) de baja frecuencia es enviada hacia el subsuelo y se analizan las reflexiones cuando la señal pasa de un medio a otro de conductividad distinta [17].

De acuerdo a las ecuaciones de Maxwell para la propagación de ondas electromagnéticas, la profundidad de penetración de una onda EM se relaciona con la conductividad del medio σ y la frecuencia ω mediante:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (8.5)$$

8.2.4.3 Frecuencia y Amplitud

Las GIC's son corrientes relacionadas con el flujo de corriente en la ionosfera que interactúa con los sistemas de energía. Estas corrientes están asociadas con la actividad de tormentas solares y producen corrientes en la red eléctrica que fluyen a través de las líneas de transmisión. Estas corrientes tienen una frecuencia muy baja de 0.01–0.001 Hz por lo cual son consideradas como corrientes casi continuas y con magnitudes promedio de 10–15 A y picos de hasta 100 A durante 1–2 min [18].

En la práctica los transformadores con conexiones en estrella y neutros con conexión a tierra que están unidos por largas líneas de transmisión, pueden llegar a ser más susceptibles a problemas de GIC debido a las corrientes inducidas que fluyen a través de la línea de transmisión y los neutros que están conectados a tierra para cerrar el circuito.

8.2.5. Efectos de las GIC's en el Sistema Eléctrico

La experiencia ha probado que las GIC's pueden ocasionar efectos perjudiciales en el sistema eléctrico y los aparatos ahí interconectados. A continuación, se expone un breve resumen de los efectos generados por las GIC en los elementos del sistema eléctrico.

8.2.5.1 Efectos en los generadores.

los generadores al disponer de la configuración delta-estrella Y, mantienen un cierto nivel de protección contra las corrientes geomagnéticas, que tiene el transformador elevador conectado a la salida del generador. A pesar que los generadores no se encuentran directamente expuestos a la GIC, hay efectos indirectos debido a un desequilibrio de voltaje anormal y la distorsión armónica, que puede llegar a afectar de manera importante al generador [19].

Las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa pueden en el generador, provocando un calentamiento excesivo de los anillos del rotor y estimulación de vibraciones mecánicas. Estas corrientes recalientan el rotor y aumentan linealmente con la cantidad de GIC que ingresa al neutro del transformador elevador conectado al generador. Se debe

considerar que los relés de secuencia convencionales para generadores pueden diseñarse para responder solo a la frecuencia fundamental y así asegurar una protección adecuada.

8.2.5.2 Efectos en las protecciones.

El aumento en el uso de relés digitales que utilizan la corriente máxima como señal de actuación protectora los ha hecho susceptibles a perturbaciones geomagnéticas. Durante una tormenta magnética, los armónicos aumentan debido a la saturación en el medio ciclo de los transformadores de potencia, lo que provoca la activación de los relés para corrientes hasta en un 50% en los valores eficaz programado y provoca falsos disparos de las protecciones de los equipos de red.

El daño a los sistemas de protección debido a los efectos de la corriente geomagnética puede ocurrir de diferentes maneras. Una posibilidad es que los relés de los compensadores estáticos y los bancos de condensadores puedan confundir las corrientes producidas por el GIC como una falla de una corriente de sobrecarga.

Es mayormente común que se dispare en falso y con frecuencia de esta manera. Otra posibilidad es que el sistema de protección funcione más lento de lo normal o deje de funcionar, debido a la presencia del flujo remanente en el transformador de corriente causado por las GIC's. El flujo remanente acorta el tiempo de saturación del TC y esto puede ocasionar que el relevador lleve más tiempo en detectar la falla [19].

Una forma de reducir los disparos falsos podría ser el valor de la corriente pico que activa los armónicos altos debidos que ocurren en condiciones GIC, sin embargo, se debe siempre tener en cuenta que esta solución podría disminuir la protección en condiciones

El riesgo de disparos en falso debido a los efectos de las corrientes geomagnéticas puede en la mayoría de los casos reducirse, por lo que el enfoque de los estudios está dirigido a evaluar principalmente el riesgo de daño a los grandes elementos del sistema.

8.2.5.3 Efectos en las comunicaciones

Actualmente todos los sistemas eléctricos utilizan diversos sistemas de comunicación, tal como puede ser la línea telefónica fija, por medio de radio, satélite y fibra óptica. Todos, exceptuando los sistemas de fibra óptica pueden verse afectados por las corrientes geomagnéticas o los efectos de los disturbios geomagnéticos [19].

Las emisiones solares provocan la ionización de la parte superior de la atmósfera terrestre y provocan perturbaciones en el campo terrestre. Este viento solar puede afectar negativamente a los satélites de comunicación que se encuentran fuera del campo magnético de la Tierra. Los efectos ionosféricos provocan cambios en las características de propagación de las ondas de radio, mientras que los efectos magnéticos de las perturbaciones en las instalaciones de telefonía fija.

Finalmente, armónicos generados por corrientes geomagnéticas en líneas de transmisión cruzadas de transformadores y pueden causar interferencia en líneas telefónicas fijas adyacentes a líneas debido al efecto de inducción.

8.2.5.4 Corriente geomagnética inducida a través del transformador

Cuando una corriente de inducción geomagnética fluye a través de un transformador, provoca que el núcleo llegue a saturarse, lo que a su vez hace que la onda de corriente se distorsione haciendo de este modo que aumente el consumo de potencia reactiva e introduzca altos niveles de armónicos en el sistema de potencia y un sobrecalentamiento del transformador [16].

Los altos niveles de armónicos pueden hacer que los relés detecten falsas condiciones de falla y a los interruptores que están asociados con ellos, al nivel de esto puede causar una pérdida de producción debido a local o Las fallas generales además del sobrecalentamiento del transformador pueden causar daños permanentes cuando las piezas de repuesto o las unidades tienen tiempos de respuesta muy ajustados.

a. Calculo de la GIC que circula por un transformador

Para calcular la cantidad de corriente directa o GIC en un transformador se puede utilizar el modelo simplificado de la misma, que se puede observar en la Figura 8.11.

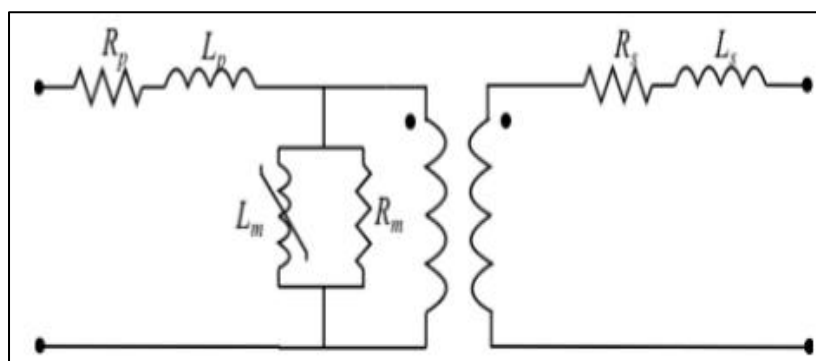


Figura 8.11. Modelo simplificado del transformador [20].

Un transformador al ser excitado por una fuente de CD no es capaz de magnetizar su núcleo de acuerdo con la ley de inducción de Faraday, sin embargo, al ser alimentado con una fuente de voltaje CA el transformador se magnetiza y como resultado se induce un voltaje en el lado secundario del transformador [20]. Este voltaje inducido se la puede determinar de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$e_{ind_{ca}} = v_{ca} - R_p i_{exc} - L_p \frac{di_{exc}}{dt} \quad (8.6)$$

Dónde: i_{exc} representa la corriente de excitación, la cual es la suma de la corriente de magnetización (corriente que pasa por la inductancia no lineal, L_m) y la corriente que fluye por la resistencia del núcleo (R_m), v_{ca} es el voltaje de excitación de CA, R_p y L_p son la resistencia y la inductancia del transformador referida al lado primario.

Mientras que al transformador se lo considere bajo una fuente de excitación CD y CA, el transformador se magnetizará induciéndose un voltaje y por ende un flujo de campo magnético a través del núcleo, completamente distinto al flujo producido por una fuente CA. Esto es muy similar a lo que ocurre con un transformador de potencia bajo condiciones GIC, entonces la ecuación se la describe de la siguiente manera:

$$e_{ind_{tot}} = v_{cd} + v_{ca} - R_p i_{exc} - L_p \frac{di_{exc}}{dt} \quad (8.7)$$

De esta ecuación se puede ver que el voltaje inducido depende de la respuesta de ambas fuentes CA y CD, por lo tanto el flujo magnetico a través del nucleo del transformador sera tambien la suma de ambas respuestas:

$$\phi = \phi_{cd} + \phi_{ca} \quad (8.8)$$

En el momento que se comienza a incrementar el flujo magnético a través del núcleo del transformador, este tiende a trabajar en la región de saturación, la cual dependerá de las características propias del material ferromagnetico. En la siguiente ecuacion, las respuestas de CA y CD se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\phi_{ca} = \frac{1}{N} \int e_{ind_{ca}} d(t) \quad (8.9)$$

$$\phi_{cd} = \frac{AN\mu I_{cd}}{l} \quad (8.10)$$

Donde: A representa el área del núcleo del transformador, N es el número de vueltas del transformador, μ es la permeabilidad del material ferromagnético, l representa la longitud de la selección del núcleo y finalmente I_{cd} es la corriente de DC o GIC que fluye a través del núcleo.

b. Efectos en los transformadores

Bajo condiciones normales un transformador de potencia se puede considerar un dispositivo altamente eficiente para modificar el voltaje de un nivel a otro. Además, mientras exista presencia de GIC, el circuito magnético del transformador es inducido por una corriente cuasi-directa que presenta pérdidas en el desempeño de la máquina [21].

Para entender más claramente las repercusiones de las GIC's en los transformadores es necesario explicar que le sucede al transformador internamente ante la presencia de una corriente directa.

Cuando un transformador es sometido a una corriente directa, la cual fluye a través de sus devanados y espiras, ocasiona que se tenga un flujo de corriente directa unidireccional en el núcleo. La magnitud de este flujo va a depender principalmente del número de espiras que tiene la bobina, multiplicado por la corriente directa que fluye y dividido todo lo anterior entre la reluctancia que tiene la trayectoria de este flujo de corriente directa, tal como se expone en la siguiente ecuación.

$$\Phi_{dc} = \frac{Ni_{dc}}{R} \quad (8.11)$$

El flujo de corriente directa ocasiona un cambio en la dirección del flujo de corriente alterna, ya que en el primer medio ciclo, se suma al flujo de AC y en el segundo medio ciclo se resta. En la gráfica de la Figura 8.12, se muestra el comportamiento de la forma de onda de la corriente de excitación. Es notorio como los picos de la corriente de excitación se maximizan, en ocasiones hasta 10 veces más el valor de la corriente de excitación normal, alcanzando también los límites de la curva de saturación.

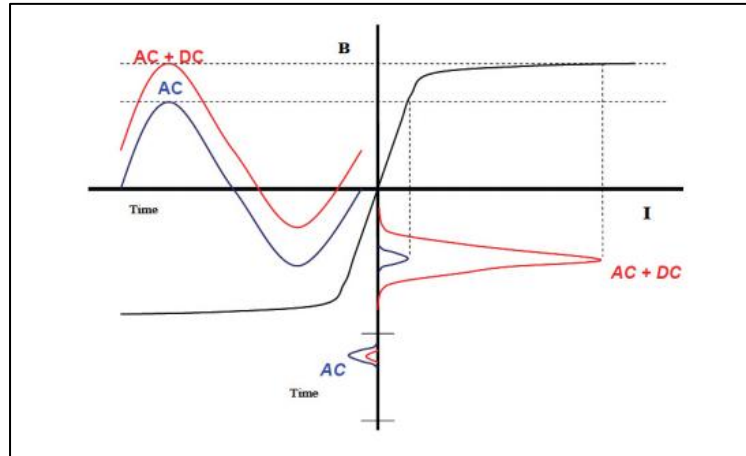


Figura 8.12. Comportamiento del flujo y de la corriente de excitación puramente alterna y excitación alterna + directa [21].

El desplazamiento del flujo irá incrementando hasta que la componente de DC de la corriente de excitación sea igual a la magnitud de la GIC entrando por el neutro del transformador.

Al saturarse el núcleo del transformador, el exceso del flujo que no puede circular por el núcleo comenzará a escaparse y esto a su vez incrementa los niveles de los flujos de dispersión. Estas pérdidas de flujo disperso pueden incidir en material conductor del transformador ocasionando calentamiento debido al incremento de las corrientes parásitas.

La presencia de estos sobrecalentamientos reduce considerablemente el tiempo de vida del equipo además de desgastar los aislamientos llevando en ocasiones al transformador a presentar fallas como las ocurridas en la tormenta de marzo de 1989. La Figura 8.13, enseña una fotografía de uno de los transformadores dañados en aquel evento.



Figura 8.13. Transformador dañado por Sobrecalentamiento en la tormenta solar de marzo de 1989 [21].

8.2.6. Métodos de Prevención y Mitigación de las GIC

Las corrientes geomagnéticas inducidas ingresan al sistema eléctrico por medio de los puntos de conexión a tierra, principalmente los neutros aterrizados de los transformadores. Por lo tanto, desde que los efectos perjudiciales de las GIC fueron descubiertos, la investigación y desarrollo de estrategias de mitigación han venido realizándose, algunas de las técnicas utilizadas se describen a continuación.

8.2.6.1 Dispositivos de bloqueo pasivo

Una manera de disminuir la amplitud de las corrientes directas (GIC) son con la utilización de una impedancia (resistencia o capacitor) entre el neutro del transformador y la tierra.

En si los dispositivos pasivos contribuyen a la mitigación de los efectos de las GIC bloqueando el flujo de estas corrientes a través del SEP o de los transformadores. Los capacitores pueden ser conectados en el neutro del transformador o conectarse en serie con las líneas de transmisión de gran longitud. Los capacitores en serie se suelen instalar para aumentar la capacidad de transferencia de potencia en las líneas de transmisión y el bloque de las GIC es un beneficio adicional, cabe señalar que los capacitores en si diseñados y utilizados específicamente para bloqueo de GIC son menos costosas que los utilizados para aumentar la capacidad de transferencia, debido a que estos poseen valores de reactancia menores [22].

8.2.6.2 Sistema de bloqueo del neutro

En este sistema se ha desarrollado un sistema electrónico, que detecta la entrada de una corriente cuasi continua por el neutro del transformador, e inmediatamente actúa para contrarrestar esos amperios. Este sistema fue probado en el año 2012 en el laboratorio KEMA y en las instalaciones de los laboratorios nacionales de Idaho [23].

Los beneficios que aporta este tipo de solución a las redes eléctricas son los siguientes:

- Se reduce ampliamente la posibilidad de caída de la red eléctrica
- Protege a los transformadores más antiguos de la red, y evita que la temperatura del refrigerante, suba por encima de los límites recomendados
- La inversión que supone instalar este sistema puede ser recuperada en uno o dos años, ya que se evitan las pérdidas que suponen otros métodos basados en la predicción.

- Este método evita que el ser humano tenga que decidir si activar el protocolo de emergencia, por lo tanto, se evitan potenciales errores de cálculo.
- Efectivo en un gran rango de magnitudes de corrientes geomagnéticas.

Este sistema permite que en lugar de que el neutro esté conectado permanentemente a tierra a través de una impedancia, lo que se consigue con este sistema es que el neutro se conecte a tierra a través de la impedancia en el momento que una corriente geomagnética inducida aparezca en el transformador, y en el estado normal de funcionamiento esté conectado directamente a tierra. Esto se puede apreciar en la Figura 8.14., el sistema tiene la parte de conexión neutro-tierra y la parte del circuito de sensores que detectan las corrientes inducidas [23].

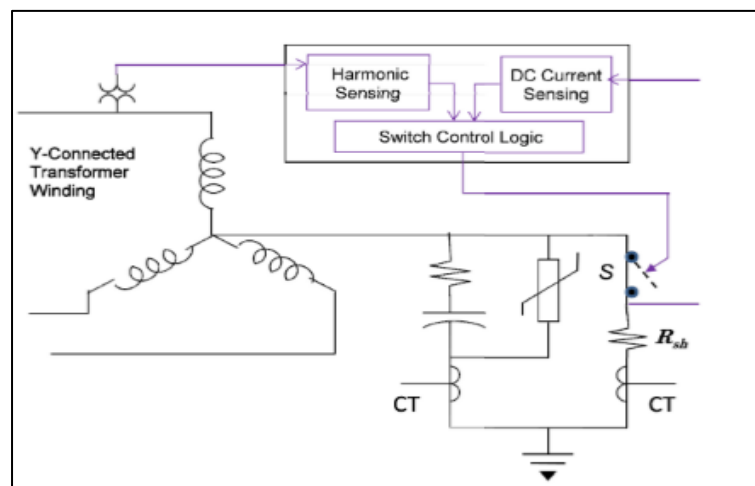


Figura 8.14. Esquema del sistema de bloqueo del neutro [23].

El estado de reposo de este sistema es con el interruptor “S” cerrado, de manera que la conexión del neutro es directa a tierra (la resistencia es la inherente a la propia conexión). En el momento que se detectan corrientes cuasi continuas o una determinada tasa de armónicos (%THD) el circuito de protección entra en acción y se abre el interruptor S, de manera que se abre un camino a tierra a través del condensador (que tiene una alta impedancia para frecuencias bajas) y evita que las corrientes cuasi DC se cuelen en el interior del transformador [23].

8.2.7. Cálculo del Total de Distorsión Armónica (THD)

En el momento que el núcleo del transformador se satura debido al flujo de las GIC, la corriente de excitación se distorsiona notablemente provocando un aumento en las magnitudes de las componentes armónicas, las cuales se incrementan a razón del valor de las GIC. Entre mayor es el valor de las GIC, mayor será la distorsión armónica total (THD) de la corriente de

excitación del transformador la cual se la puede calcular utilizando la siguiente ecuación [24]

$$THD = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (8.12)$$

Dónde:

I_1 : Es la magnitud de la componente fundamental

I_n : Representa la magnitud del n -ésimo armónico.

8.2.8. Calculo de la Potencia Reactiva (Q)

Otro efecto que provocan las GIC en transformadores de potencia es el incremento en el consumo de potencia reactiva, el cual incrementa de forma lineal con el flujo de GIC por el núcleo del transformador, el consumo de potencia reactiva a su vez dependerá del diseño del núcleo del transformador [24]. Y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q(MVAr) = k * GIC + Q_0 \quad (8.13)$$

Dónde:

k : es el factor que depende del diseño del núcleo del transformador

GIC : es la corriente que fluye por el núcleo del transformador

Q_0 : es la potencia reactiva en condiciones normales

9. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS.

Los datos obtenidos durante la simulación de este modelo saturable para el estudio del comportamiento del transformador serán semejantes a los datos obtenidos en un transformador real.

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.

Para establecer los efectos ocasionados en el núcleo del transformador por efectos GIC y así determinar el funcionamiento y posibles fallas, se detallan a continuación las siguientes metodologías y técnicas, usadas para el efecto del tema de investigación planteado.

10.1. Métodos de la investigación.

10.1.1. Método documental.

Método con el cual se recopila la información, contenida en temas de geomagnetismo en los Sistemas Eléctricos de Potencia, como también procedimientos para el análisis de las GIC, cuya finalidad permite establecer conceptos y criterios sobre la influencia de corrientes geomagnéticas en los transformadores de potencia.

10.1.2. Método deductivo-inductivo.

Método que permite obtener las características para el modelo del transformador, propiedades de la curva de saturación y el efecto de las GIC dentro del núcleo del transformador.

10.2. Técnicas de investigación.

10.2.1. Adquisición de datos.

Técnica utilizada para la obtención de los parámetros dentro de la rama de magnetización e inserción de las GIC.

10.2.2. Modelación.

Técnica con la cual se modela el transformador para análisis de los efectos en la rama de magnetización bajo condiciones GIC en un tiempo determinado, haciendo uso de una fuente DC.

10.2.3. Simulación.

Esta técnica es utilizada para simular la inserción de las GIC a través de la puesta a tierra de la conexión en estrella Y en el modelo del transformador utilizado, mediante el uso del software ATP Draw.

10.3. Metodología de Desarrollo.

10.3.1. Modelado del transformador para análisis de GIC.

Este trabajo de investigación busca representar los efectos GIC en los transformadores de potencia, con lo cual se analiza la influencia en las variables eléctricas de este equipo, debido que las corrientes geomagnéticas inducidas son un fenómeno transitorio de baja frecuencia, se decidió usar el software ATP Draw para analizar estos efectos electromagnéticos en la rama de magnetización del transformador.

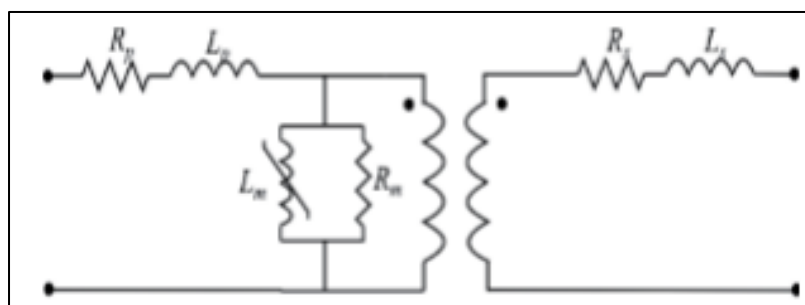


Figura 10.1. Modelo del transformador real [20].

En esta investigación se utiliza el modelo del transformador real con rama en paralelo que está conformado por un banco de transformadores monofásicos con conexión trifásica en la cual se desprecia la resistencia e inductancia de los devanados tanto primario y secundario, adicional también descartamos el uso de la reluctancia del núcleo del transformador debido a que para análisis de las GIC estas ingresan como una corriente extra haciendo que la corriente y el flujo en la rama de magnetización aumenten, de esta manera nos enfocamos en el efecto que causa las GIC en la rama de magnetización.

Una vez realizado la depreciación de las resistencias e inductancias de los devanados del transformador se obtuvo un equivalente que se presenta en la Figura 10.2, que se asemeja a un transformador ideal pero con sus características L_m y R_m que representan la inductancia y reluctancia del núcleo del transformador.

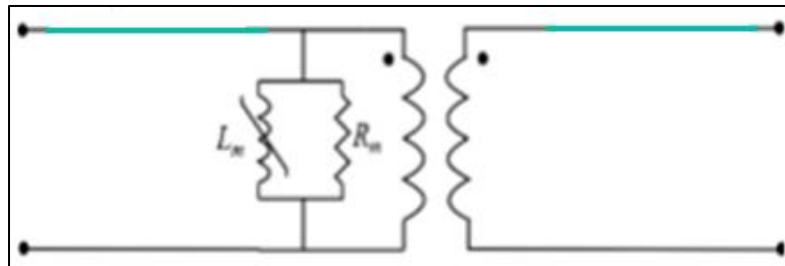


Figura 10.2. Modelo del transformador simplificado.

Para obtener resultados precisos de la rama de magnetización sería necesario utilizar las dos variables del núcleo tanto la L_m y R_m , pero si tomamos en cuenta solo la inductancia del núcleo que es la principal para nuestro estudio los resultados no varían considerablemente, esto se debe a que la reluctancia del núcleo no presentan gran oposición al flujo magnético. Por lo cual se puede considerar para nuestro estudio el siguiente modelo del transformador Figura 10.3.

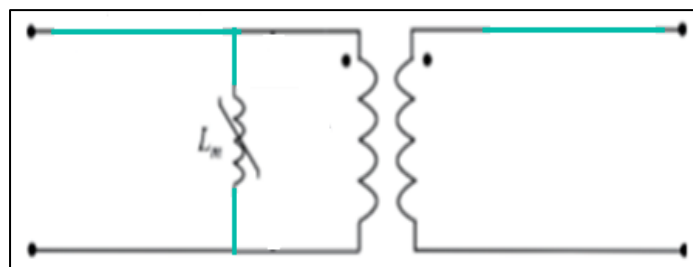


Figura 10.3. Modelo del transformador para nuestro estudio.

Al ser consideradas las GIC como corrientes directas para esta simulación pueden modelarse como una fuente CD. El transformador de potencia se puede modelar con las características que sean necesarias para los distintos casos de estudio. En esta investigación se lo uso a partir

de un transformador con la rama de magnetización anexada de forma externa que representa el núcleo magnético del transformador permitiendo en este observar la saturación de la máquina

10.3.2. Modelo saturable del transformador.

El modelo implementado para observar el funcionamiento del transformador ante el fenómeno de las GIC, es un modelo circuital clásico del transformador. El circuito está representado por un transformador de 240 MVA, 230/500 Kv con conexión Delta-Estrella como se observa en la Figura 10.4

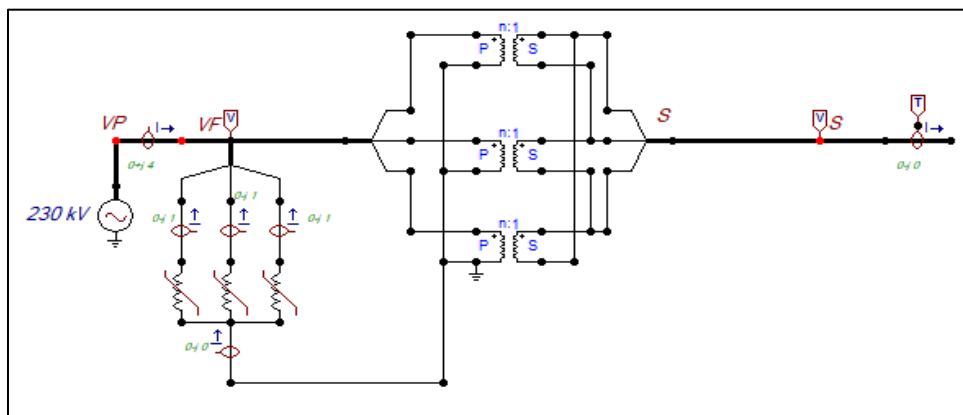


Figura 10.4. Modelo de transformador trifásico con rama de magnetización saturable.

Con este modelo se busca el efecto de saturación, por lo cual se tiene que extraer las corrientes de magnetización para poder observar los efectos en el núcleo del transformador. Este modelo se evaluó en condiciones de vacío para determinar el comportamiento de la corriente de excitación mostrando en la siguiente Figura las señales de corriente en el modelo implementado.

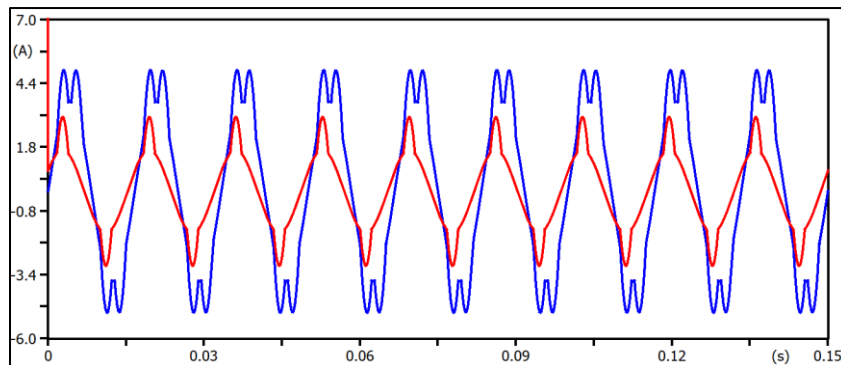


Figura 10.5. Corriente de Excitación y Magnetización en condiciones normales.

Para explicación del efecto ocasionado por las corrientes geomagnéticas en el transformador

se plantea el modelo presentado en la Figura 10.6, donde se adiciona el modelo de las GIC.

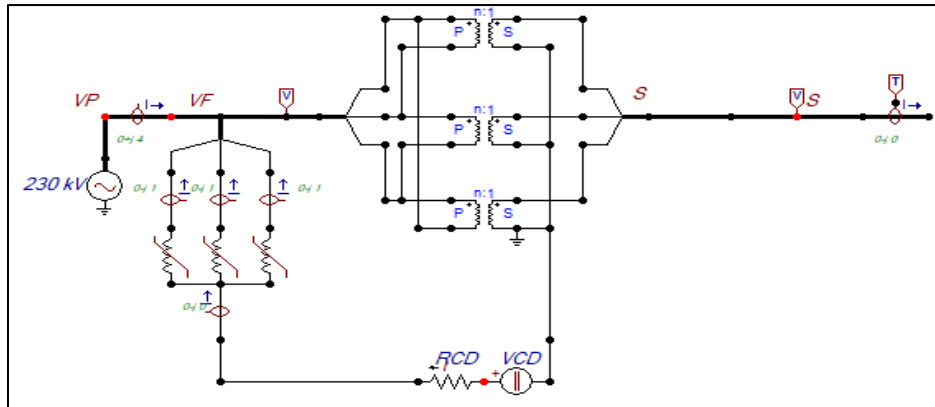


Figura 10.6. Propuesta del Modelo del Transformador para análisis de las GIC.

Partes que está conformado el modelo simplificado del transformador:

- Transformador ideal
- Fuente DC y resistencia para obtención de GIC
- Inductancias de magnetización
- Carga

El modelo del transformador saturable ha sido realizado partiendo del circuito equivalente, incorporando una fuente de voltaje DC junto a una resistencia para análisis de circuito directo. La fuente y las inductancias se conectan al neutro de la configuración en estrella, una inductancia por fase es utilizada para colocar una curva de saturación, con el objetivo de representar al núcleo del transformador a través de la rama de magnetización del mismo. La rama de magnetización se encuentra conectada externamente y así lograr observar los efectos de saturación debido a la inducción de corriente geomagnética.

10.3.3. Parámetros utilizados en el modelo del transformador simplificado.

Tabla 10.1. Valores utilizados en el modelo simplificado del transformador.

CONEXIÓN Δ -Y	CONEXIÓN Y- Δ	CONEXIÓN Y-Y
RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN		
0,796743	0,27	0,46
CORRIENTE EN ESTADO ESTACIONARIO [A]		
1,31	1,31	1,31
FLUJO EN ESTADO ESTABLE [Wb-turn]		
44	44	44
CARACTERÍSTICAS CORRIENTE/FLUJO		
1-990	1-570	1-570
7-1000	7-580	7-580

10.4. Saturación del núcleo.

Al agregarse excitación por una fuente CD, el punto de saturación del transformador se ve afectado, pues la señal de corriente es distorsionada haciendo que la máquina alcance su equilibrio de saturación después de cierto tiempo.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

11.1 Conexión Δ -Y

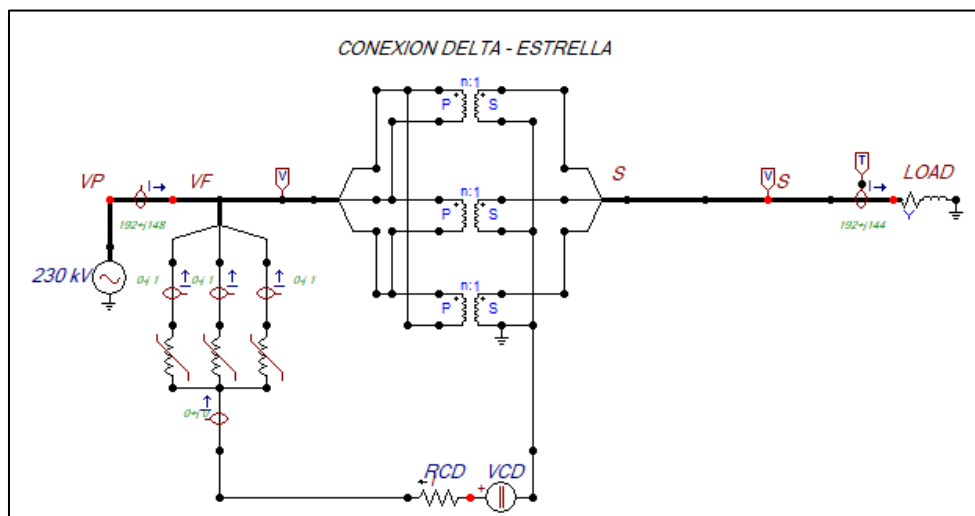


Figura 11.1. Modelo para análisis GIC conexión Δ -Y.

El modelo expresado a continuación presenta un transformador trifásico de 240 MVA de capacidad, siendo un transformador elevador de 230 a 500 Kv, con conexión Δ en el lado primario y conexión estrella Y en el secundario, adicional se acopla una carga de 240 MVA con un factor de potencia de 0.8 p.u.

Las pruebas realizadas en este modelo fue la aplicación de GIC en un rango de magnitud de 10 a 200 amperios inducidos a la conexión del neutro del transformador a través de la puesta a tierra de la conexión estrella Y del lado secundario del transformador.

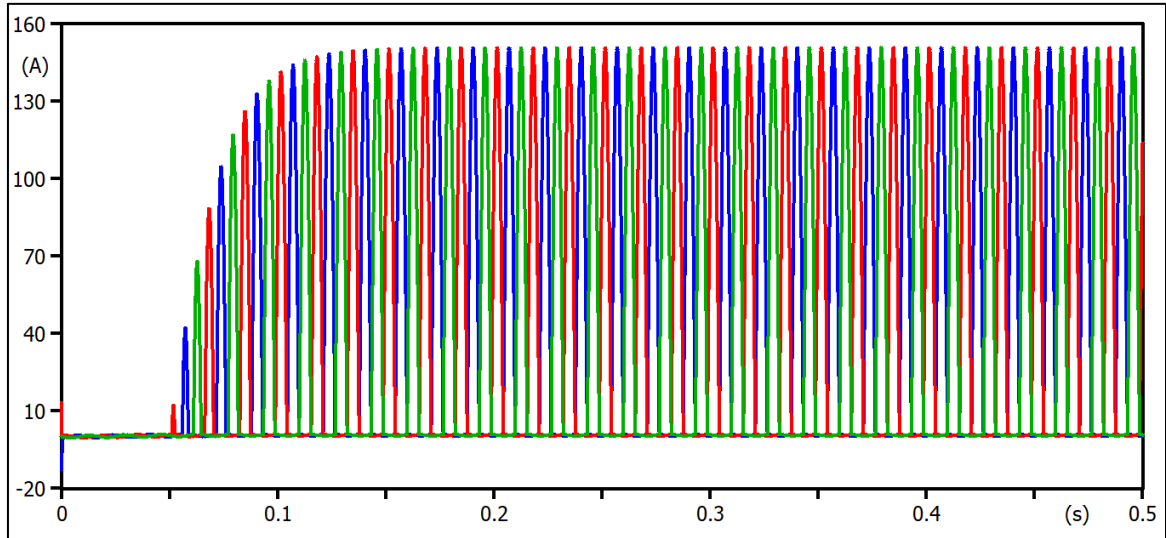


Figura 11.2. Equilibrio de saturación conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

En este caso el tiempo en que llega al equilibrio de saturación es en 0.13[s], este fenómeno sucede dentro de la rama de magnetización del transformador de potencia.

11.1.2 Evaluación del THD.

En este análisis para lograr observar los efectos en el núcleo del transformador se ha realizado las siguientes tablas en diferentes casos de estudio mostrando así los efectos en el THD cuando se encuentra con carga, sin carga y a baja carga adicional se lo realizo con diferentes rangos de GIC de 10 [A] a 200 [A] como se muestra a continuación.

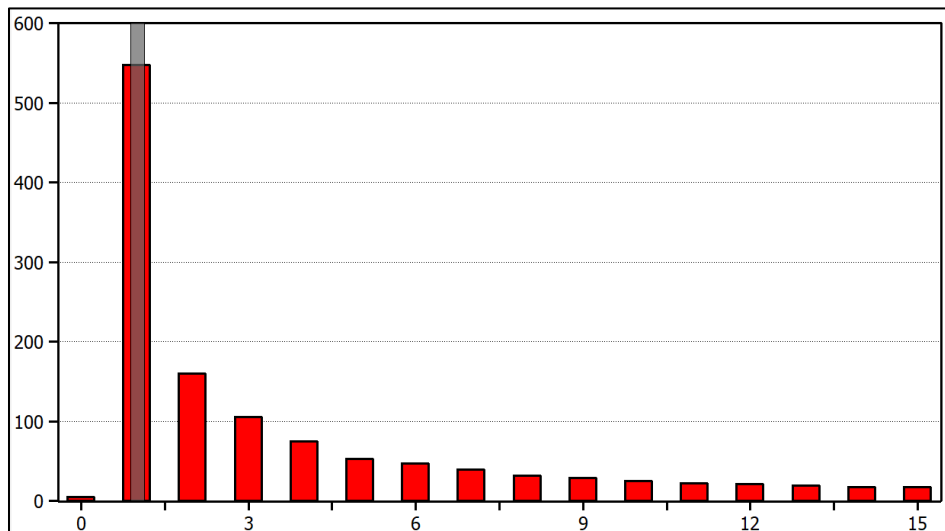


Figura 11.3. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador
Conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.1 Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Δ -Y.

% de THD en Corrientes de entrada			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,5	40,1	40,07
10	33,41	40,09	40,07
20	144,1	38,72	39,58
30	130,5	39	39,47
40	120,5	39,54	39,43
50	112,8	40,2	39,42
60	106,6	40,9	39,44
70	101,5	41,59	39,47
80	97,21	42,25	39,52
90	93,42	42,85	39,57
100	90,01	43,38	39,62
150	76,3	44,91	39,85
200	65,76	44,91	39,98

Como se puede observar los valores de porcentaje de THD son directamente proporcional al valor de las GIC mientras estas aumenten el THD también, adicional se observó la influencia que tiene la existencia de carga y a su vez el nivel que esta posee ya sea cuando el sistema se encuentra sin carga el THD es mayor en algunos niveles de GIC mientras que ante la existencia de carga a 50 MVA el THD permanece próximo al 45% a diferencia de a 240 MVA el cual reduce un 5%

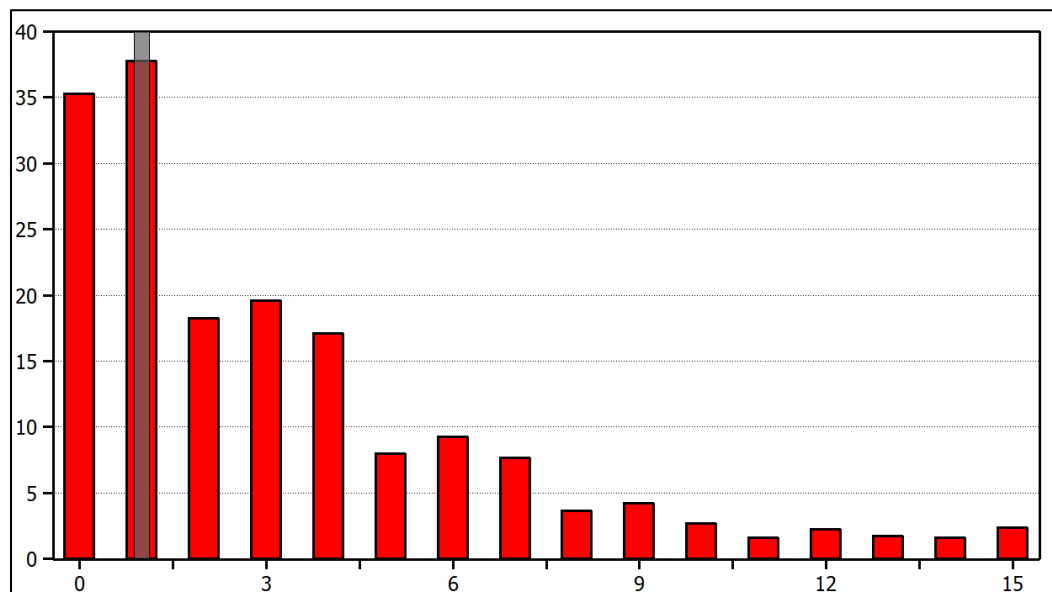


Figura 11.4. Valoración del THD en la rama de magnetización

Conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.2 Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Δ -Y.

% de THD en Corrientes de magnetización			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,04	34,04	34,04
10	32,96	32,96	32,96
20	144,1	144,1	144,1
30	130,5	130,5	130,5
40	120,5	120,5	120,5
50	112,8	112,8	112,8
60	106,6	106,6	106,6
70	101,5	101,5	101,5
80	97,21	97,21	97,21
90	93,42	93,42	93,42
100	90,01	90,01	90,01
150	76,3	76,3	76,3
200	65,76	65,76	65,76

Se puede apreciar que la corriente en la rama de magnetización la diferencia es distinta a la corriente de entrada del transformador de potencia, teniendo una influencia nula el nivel de la carga que esté conectada al sistema sin embargo el nivel de THD tiene una elevación abrupta desde los 20 [A] de GIC, ya que después de este límite el porcentaje de distorsión comienza a disminuir, igual de manera constante pero no menor al 65%.

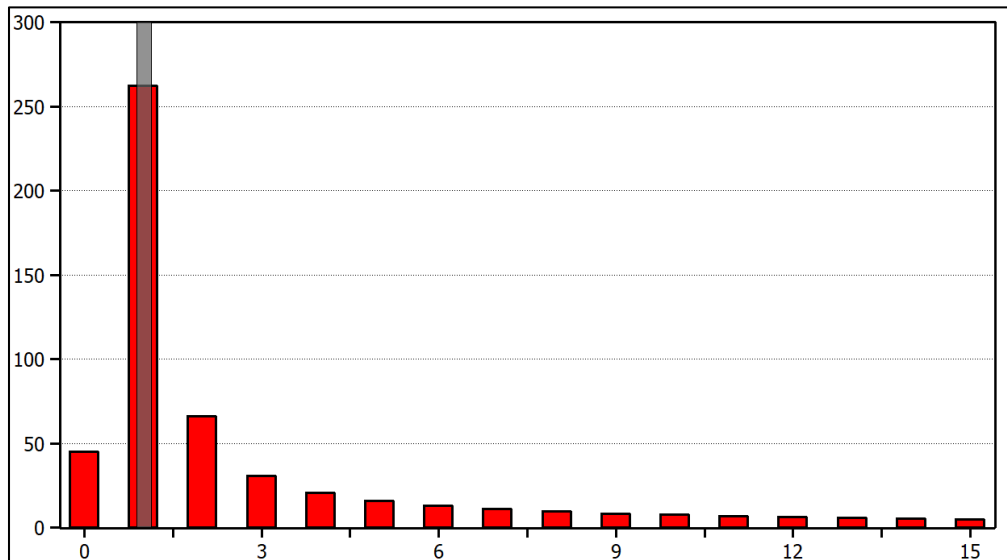


Figura 11.5. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador
Conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.3 Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia conexión Δ -Y

% de THD en Corrientes de salida			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	18,83	29,67	29,67
10	18,83	29,67	29,67
20	18,83	29,67	29,67
30	18,83	29,67	29,67
40	18,83	29,67	29,67
50	18,83	29,67	29,67
60	18,83	29,67	29,67
70	18,83	29,67	29,67
80	18,83	29,67	29,67
90	18,83	29,67	29,67
100	18,83	29,67	29,67
150	18,83	29,67	29,67
200	18,83	29,67	29,67

En comparación el THD en las corrientes de salida del transformador de potencia son bajas las cuales se ven influenciadas únicamente si se encuentra con o sin carga, mas no influye el nivel de carga que se encuentre conectada al sistema ni el nivel de GIC que se somete al transformador.

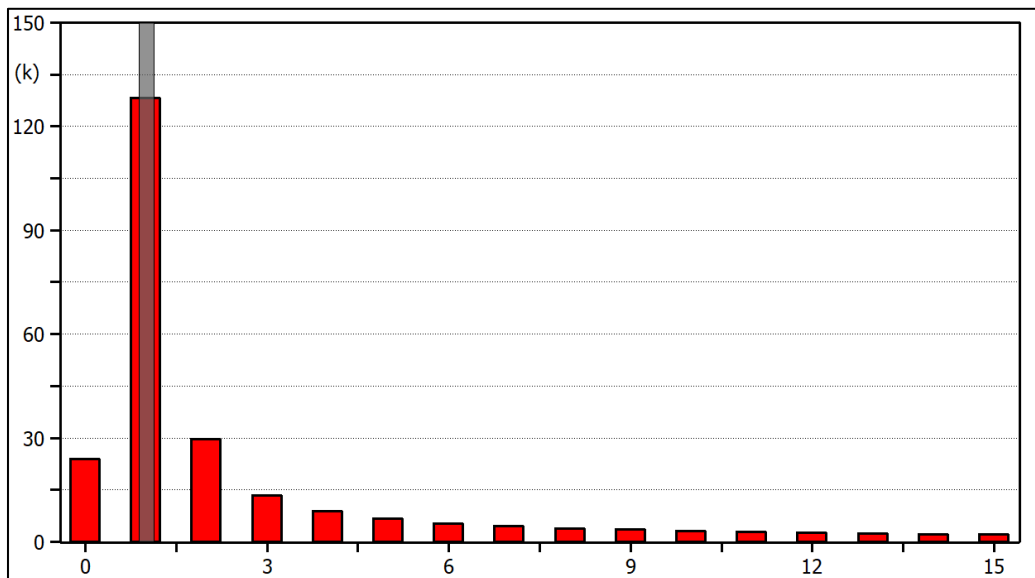


Figura 11.6. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador
Conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

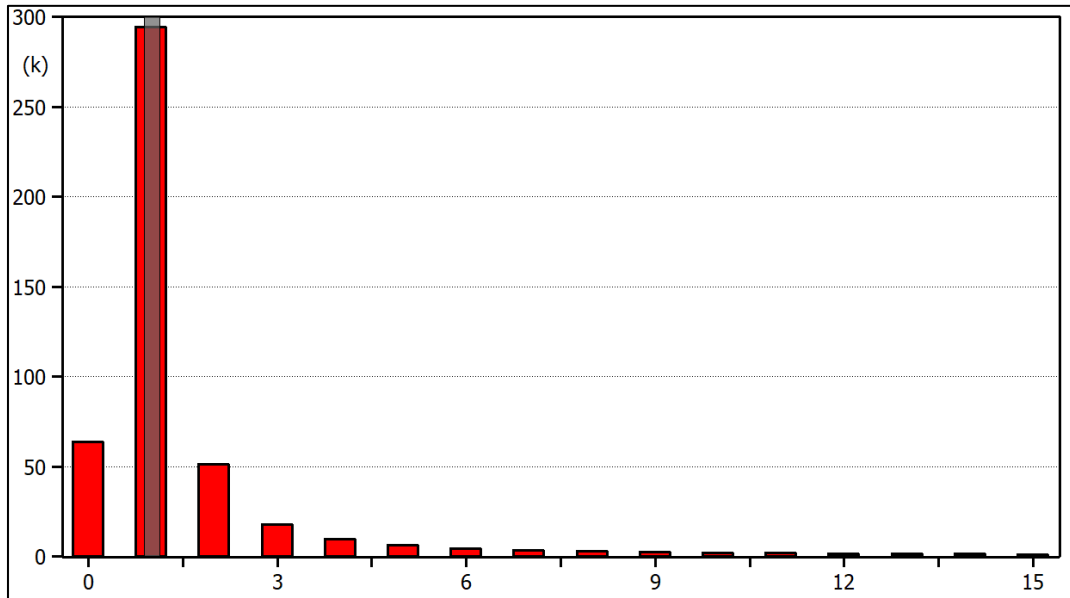


Figura 11.7. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador
Conexión Δ -Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.4 Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Δ -Y

% de THD en Voltajes de entrada y salida		
GIC (A)	Entrada	Salida
0	26,98	18,83
10	26,98	18,83
20	26,98	18,83
30	26,98	18,83
40	26,98	18,83
50	26,98	18,83
60	26,98	18,83
70	26,98	18,83
80	26,98	18,83
90	26,98	18,83
100	26,98	18,83
150	26,98	18,83
200	26,98	18,83

Como siguiente comparación se obtuvo valores de THD de los voltajes de entrada y salida del transformador de potencia dando como resultado que se mantiene constante con o sin carga y a distintos niveles de GIC dando a entender que la influencia de las GIC es nula en los voltajes del transformador.

11.2. Conexión Y-Δ

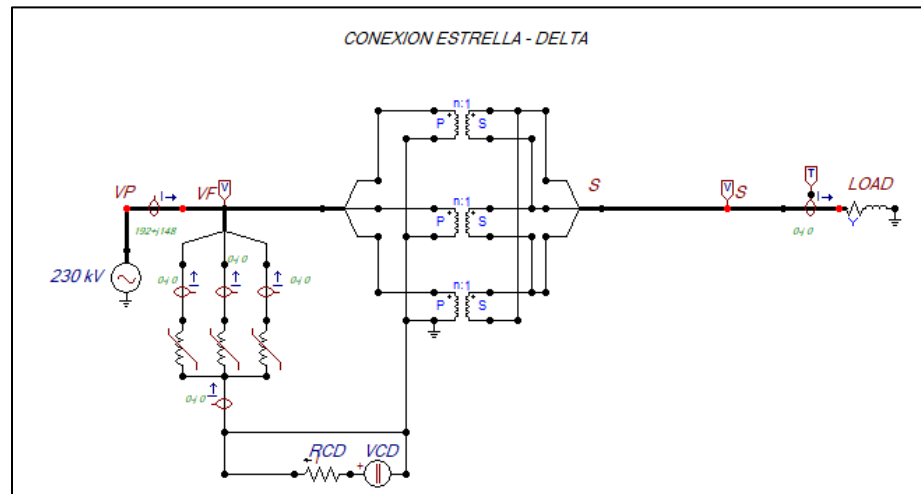


Figura 11.8. Modelo para análisis GIC conexión Y-Δ.

El modelo expresado a continuación presenta un transformador trifásico de 240 MVA de capacidad, siendo un transformador elevador de 230 a 500 Kv, con conexión estrella Y en el lado primario y conexión Δ en el secundario, adicional se acopla una carga de 240 MVA con un factor de potencia de 0.8 p.u.

Las pruebas realizadas en este modelo fue la aplicación de GIC en un rango de magnitud de 10 a 200 amperios inducidos a la conexión del neutro del transformador a través de la puesta a tierra de la conexión estrella Y del lado primario del transformador.

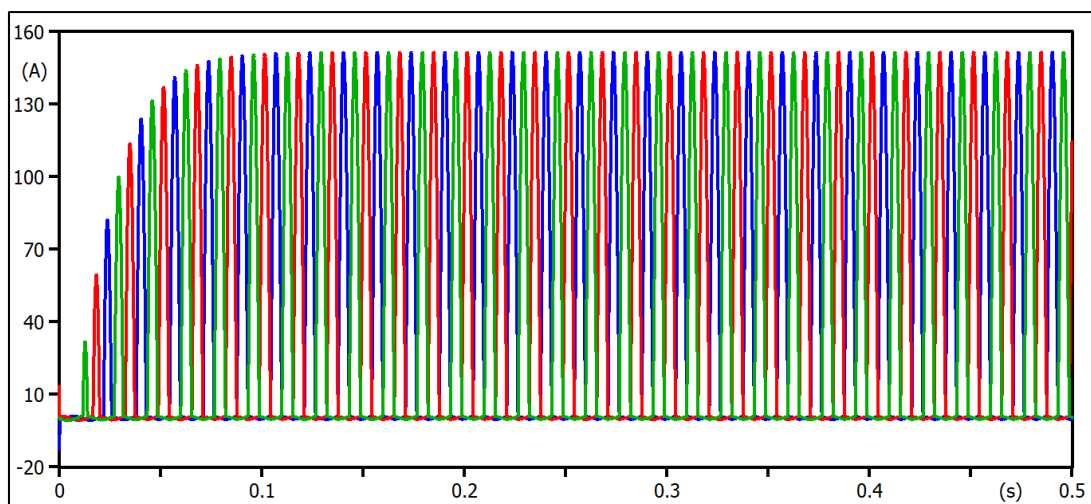


Figura 11.9. Equilibrio de saturación conexión Y-Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

En este caso el tiempo en que llega al equilibrio de saturación es en 0.08[s], este fenómeno sucede dentro de la rama de magnetización del transformador de potencia.

11.2.1 Evaluación del THD.

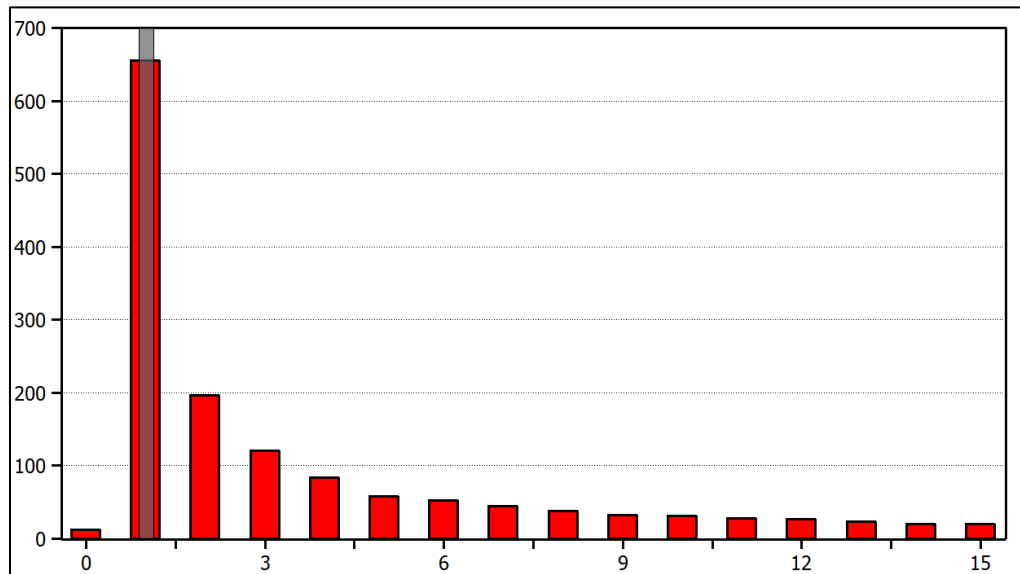


Figura 11.10. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador
Conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.5 Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Y- Δ .

% de THD en Corrientes de entrada			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,46	37,9	39,68
10	151,9	36,89	39,41
20	138,9	36,72	39,24
30	127,3	36,98	39,14
40	118,2	37,47	39,08
50	111	38,08	39,06
60	105,3	38,74	39,06
70	100,4	39,4	39,07
80	96,29	40,05	39,09
90	92,63	40,67	39,12
100	89,33	41,23	39,15
150	75,92	43,13	39,3
200	65,51	43,68	39,4

Como se puede observar los valores de porcentaje de THD son directamente proporcional al valor de las GIC mientras estas aumenten el THD también, adicional se observó la influencia que tiene la existencia de carga y a su vez el nivel que esta posee ya sea cuando el sistema se encuentra sin carga el THD es mayor en algunos niveles de GIC mientras que ante la existencia de carga a 50 MVA el THD permanece próximo al 44% a diferencia de a 240 MVA el cual reduce un 4%

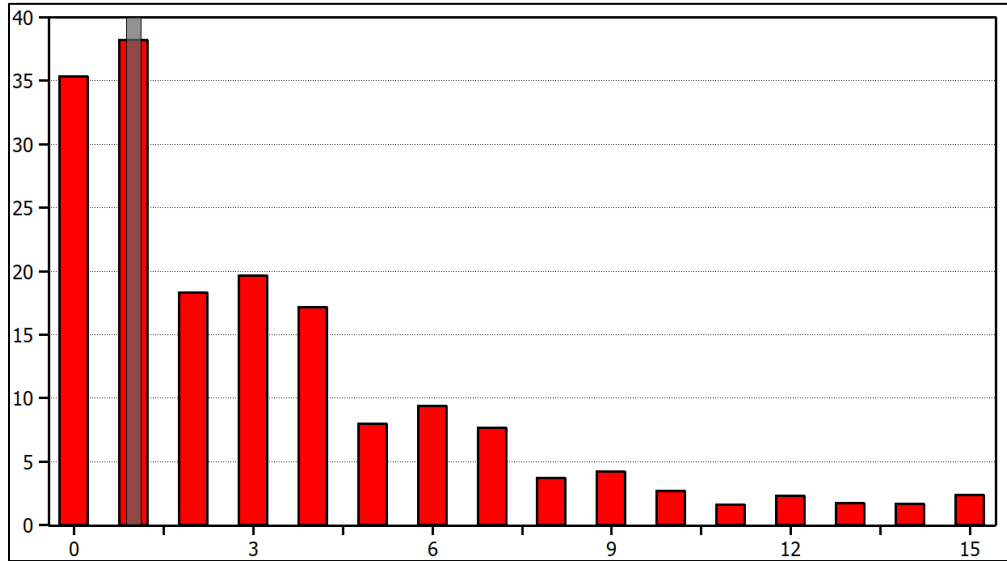


Figura 11.11. Valoración del THD en la rama de magnetización
Conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.6 Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Y- Δ .

% de THD en Corrientes de magnetización			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,04	34,04	34,04
10	151,6	151,6	151,6
20	138,8	138,8	138,8
30	127,2	127,2	127,2
40	118,1	118,1	118,1
50	111	111	111
60	105,2	105,2	105,2
70	100,4	100,4	100,4
80	96,27	96,27	96,27
90	92,61	92,61	92,61
100	89,31	89,31	89,31
150	75,9	75,9	75,9
200	65,5	65,5	65,5

Se puede apreciar que la corriente en la rama de magnetización la diferencia es distinta a la corriente de entrada del transformador de potencia, teniendo una influencia nula el nivel de la carga que esté conectada al sistema sin embargo el nivel de THD tiene una elevación abrupta hasta los 20 [A] de GIC, ya que después de este límite el porcentaje de distorsión comienza a disminuir, igual de manera constante pero no menor al 65%.

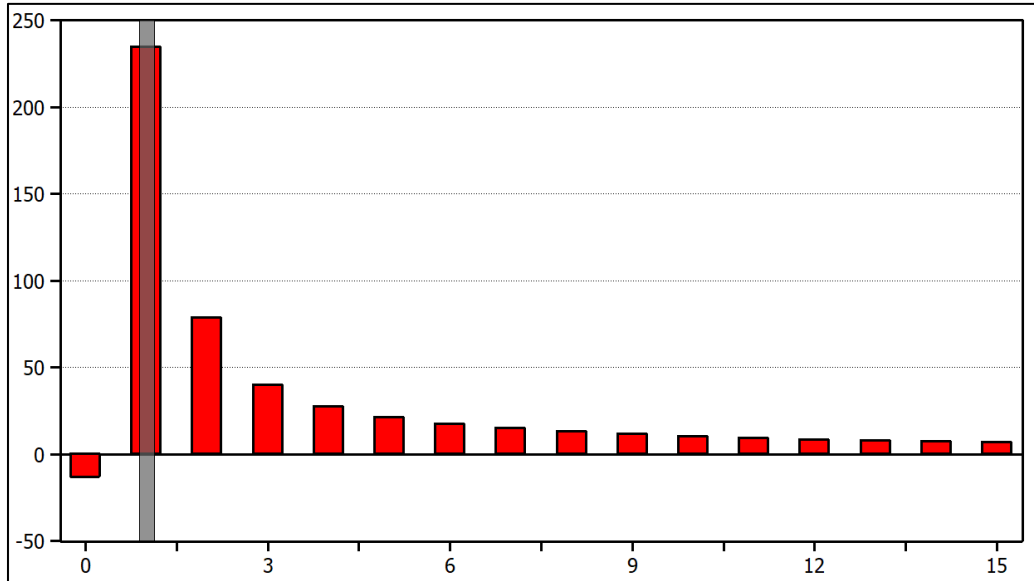


Figura 11.12. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador
Conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.7 Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia
conexión Y- Δ .

% de THD en Corrientes de salida			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	38,2	40,96	40,96
10	38,2	40,96	40,96
20	38,2	40,96	40,96
30	38,2	40,96	40,96
40	38,2	40,96	40,96
50	38,2	40,96	40,96
60	38,2	40,96	40,96
70	38,2	40,96	40,96
80	38,2	40,96	40,96
90	38,2	40,96	40,96
100	38,2	40,96	40,96
150	38,2	40,96	40,96
200	38,2	40,96	40,96

En comparación el THD en las corrientes de salida del transformador de potencia son bajas las cuales se ven influenciadas únicamente si se encuentra con o sin carga, mas no influye el nivel de carga que se encuentre conectada al sistema ni el nivel de GIC que se somete al transformador.

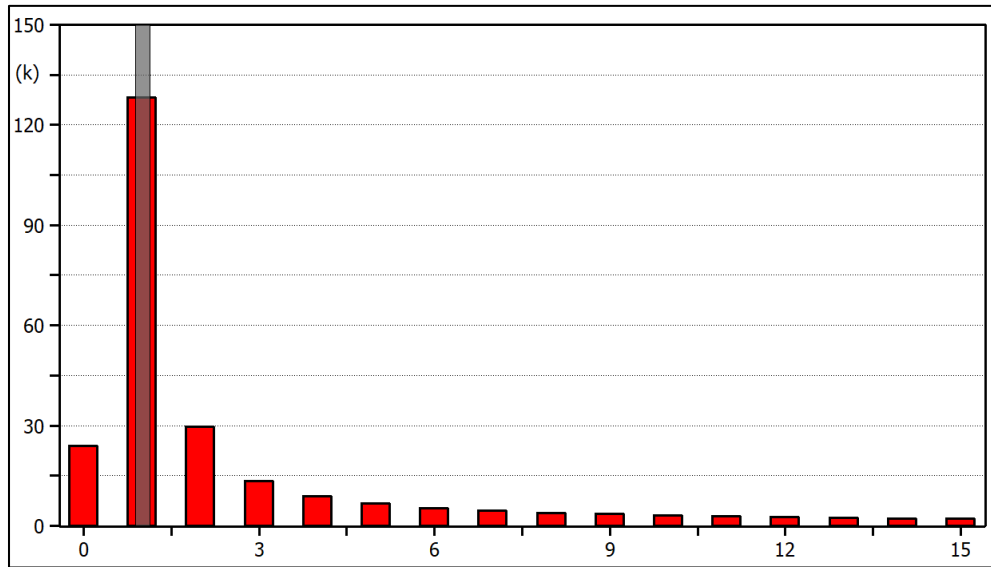


Figura 11.13. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador
Conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

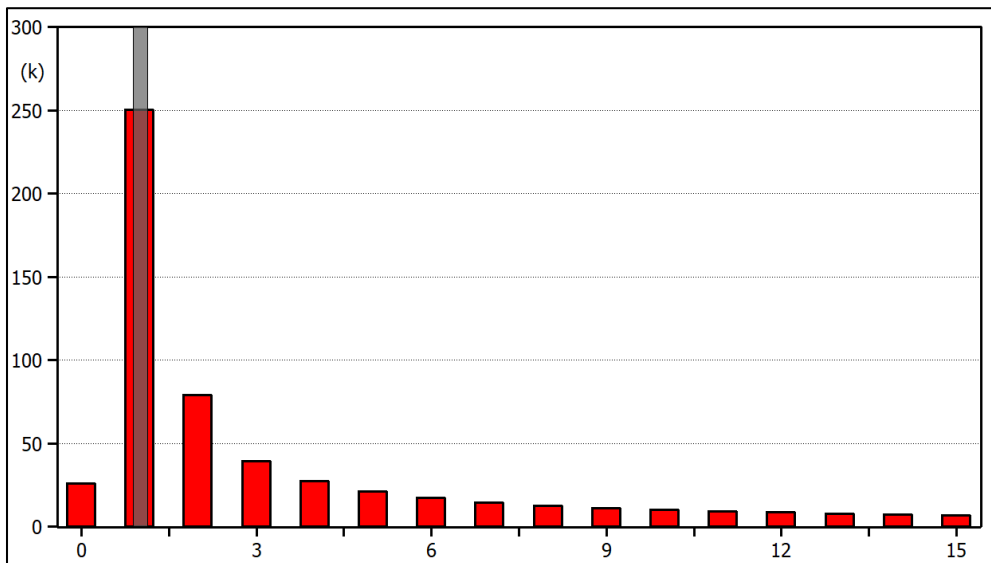


Figura 11.14. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador
Conexión Y- Δ con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.8 Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Y- Δ .

% de THD en Voltajes de entrada y salida		
GIC (A)	Entrada	Salida
0	26,98	38,2
10	26,98	38,2
20	26,98	38,2
30	26,98	38,2
40	26,98	38,2

Continuación Tabla 11.8 Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Y-Δ.

% de THD en Voltajes de entrada y salida		
GIC (A)	Entrada	Salida
50	26,98	38,2
60	26,98	38,2
70	26,98	38,2
80	26,98	38,2
90	26,98	38,2
100	26,98	38,2
150	26,98	38,2
200	26,98	38,2

Como siguiente comparación se obtuvo valores de THD de los voltajes de entrada y salida del transformador de potencia dando como resultado que se mantiene constante con o sin carga y a distintos niveles de GIC dando a entender que la influencia de las GIC es nula en los voltajes del transformador.

11.3. Conexión Y-Y

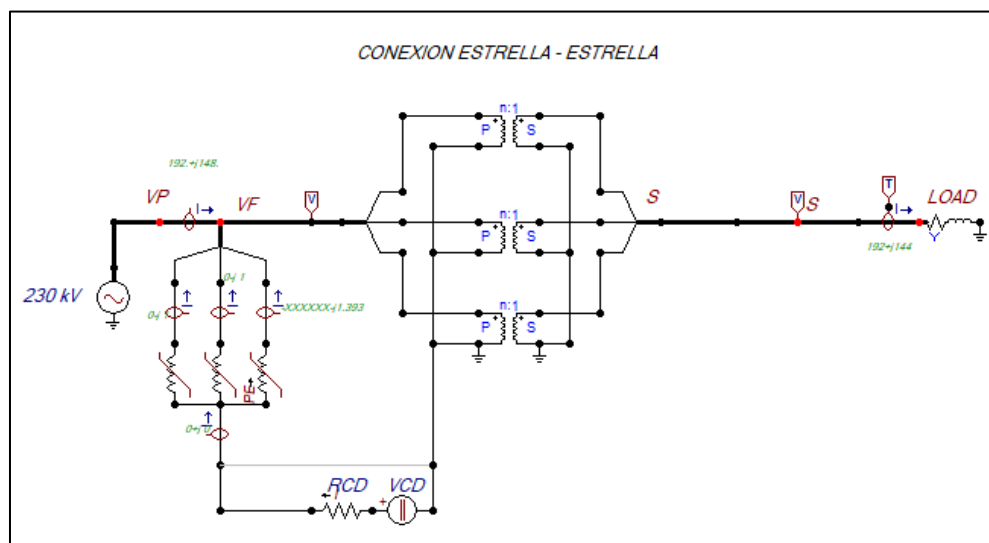


Figura 11.15. Modelo para análisis GIC conexión Y-Y

El modelo expresado a continuación presenta un transformador trifásico de 240 MVA de capacidad, siendo un transformador elevador de 230 a 500 Kv, con conexión estrella Y en el lado primario y conexión estrella Y en el secundario, adicional se acopla una carga de 240 MVA con un factor de potencia de 0.8 p.u.

Las pruebas realizadas en este modelo fue la aplicación de GIC en un rango de magnitud de 10 a 200 amperios inducidos a la conexión del neutro del transformador a través de la puesta a tierra de la conexión estrella Y del lado primario del transformador.

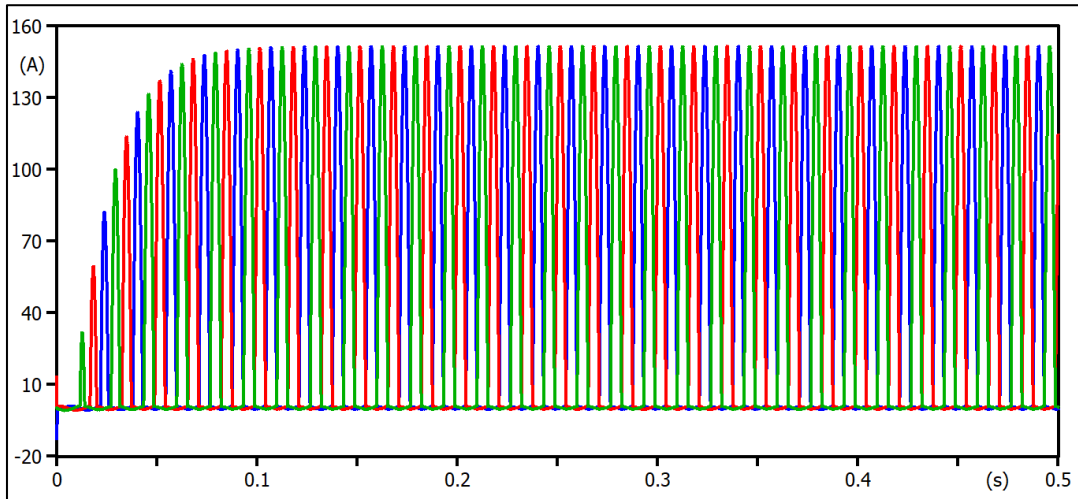


Figura 11.16. Equilibrio de saturación conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

En este caso el tiempo en que llega al equilibrio de saturación es en 0.08 [s], este fenómeno sucede dentro de la rama de magnetización del transformador de potencia.

11.3.1 Evaluación del THD.

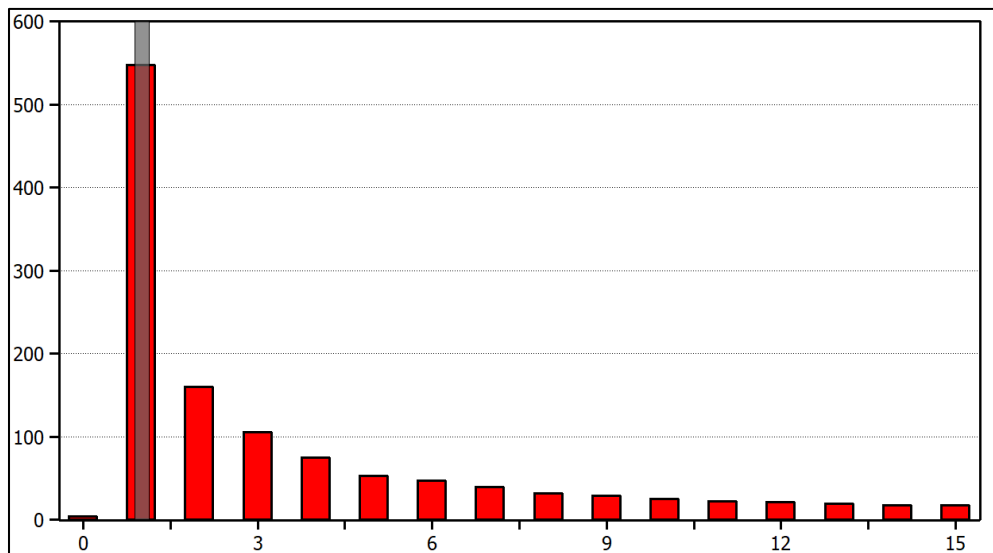


Figura 11.17. Valoración del THD en la corriente de entrada al transformador
Conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.9 Resultados de comparación del THD en corrientes de entrada del transformador de potencia conexión Y-Y.

% de THD en Corrientes de entrada			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,31	40,12	40,08
10	151,5	38,94	39,76
20	138,8	38,75	39,57
30	127,2	39,06	39,47
40	118,1	39,6	39,43
50	111	40,26	39,42
60	105,2	40,96	39,44
70	100,4	41,64	39,48
80	96,27	42,29	39,52
90	92,61	42,88	39,57
100	89,31	43,4	39,63
150	75,9	44,9	39,86
200	65,51	44,88	39,99

Como se puede observar los valores de porcentaje de THD son directamente proporcional al valor de las GIC mientras estas aumenten el THD también, adicional se observó la influencia que tiene la existencia de carga y a su vez el nivel que esta posee ya sea cuando el sistema se encuentra sin carga el THD es mayor en algunos niveles de GIC mientras que ante la existencia de carga a 50 MVA el THD permanece próximo al 45% a diferencia de a 240 MVA el cual reduce un 5%

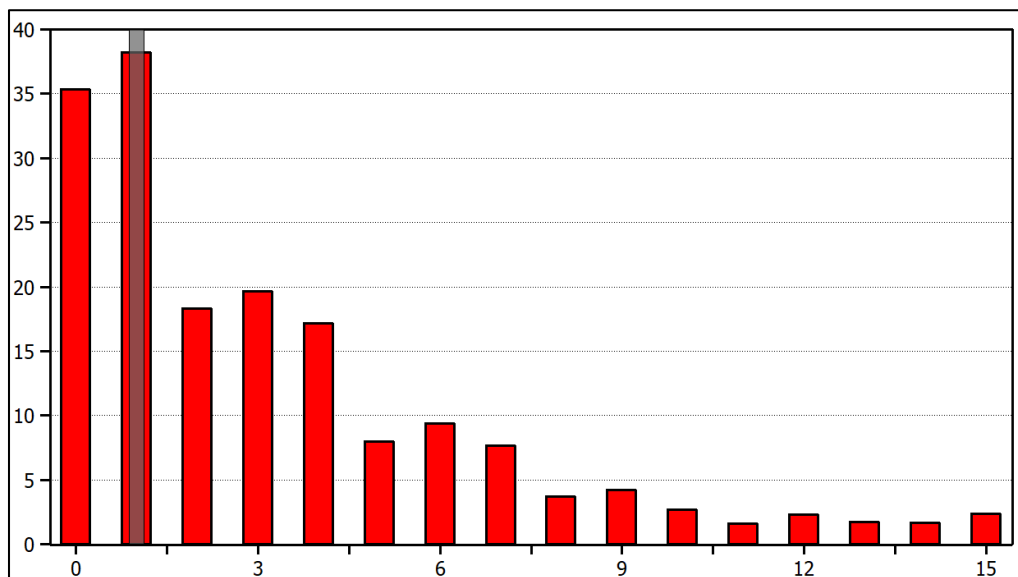


Figura 11.18. Valoración del THD en la rama de magnetización

Conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.10 Resultados de comparación del THD en la rama de magnetización conexión Y-Y.

% de THD en Corrientes de magnetización			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	34,04	34,04	34,04
10	151,6	151,6	151,6
20	138,8	138,8	138,8
30	127,2	127,2	127,2
40	118,1	118,1	118,1
50	111,1	111,1	111,1
60	105,2	105,2	105,2
70	100,4	100,4	100,4
80	96,27	96,27	96,27
90	92,61	92,61	92,61
100	89,31	89,31	89,31
150	75,9	75,9	75,9
200	65,5	65,5	65,5

Se puede apreciar que la corriente en la rama de magnetización la diferencia es distinta a la corriente de entrada del transformador de potencia, teniendo una influencia nula el nivel de la carga que esté conectada al sistema sin embargo el nivel de THD tiene una elevación abrupta hasta los 20 [A] de GIC, ya que después de este límite el porcentaje de distorsión comienza a disminuir, igual de manera constante pero no menor al 65%.

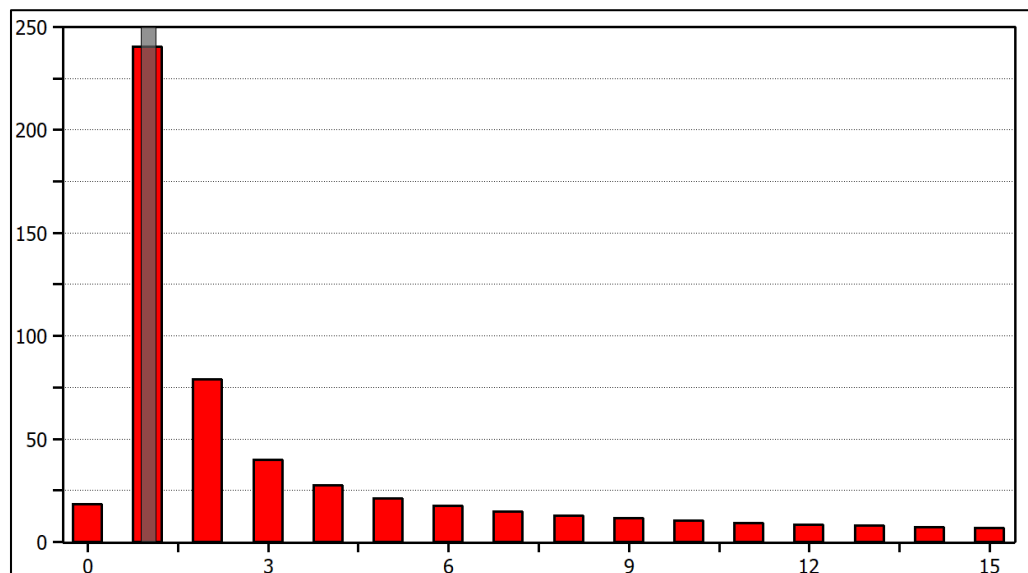


Figura 11.19. Valoración del THD en la corriente de salida del transformador
Conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.11 Resultados de comparación del THD en corrientes de salida del transformador de potencia conexión Y-Y.

% de THD en Corrientes de salida			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
0	26,98	40,07	40,07
10	26,98	40,07	40,07
20	26,98	40,07	40,07
30	26,98	40,07	40,07
40	26,98	40,07	40,07
50	26,98	40,07	40,07
60	26,98	40,07	40,07
70	26,98	40,07	40,07
80	26,98	40,07	40,07
90	26,98	40,07	40,07
100	26,98	40,07	40,07
150	26,98	40,07	40,07
200	26,98	40,07	40,07

En comparación el THD en las corrientes de salida del transformador de potencia son bajas las cuales se ven influenciadas únicamente si se encuentra con o sin carga, mas no influye el nivel de carga que se encuentre conectada al sistema ni el nivel de GIC que se somete al transformador.

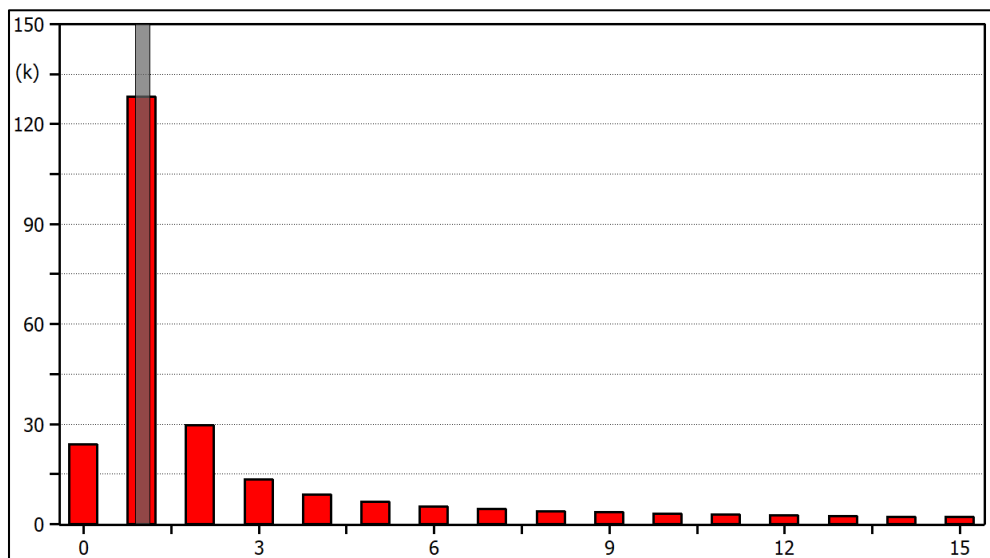


Figura 11.20. Valoración del THD en el voltaje de entrada del transformador Conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

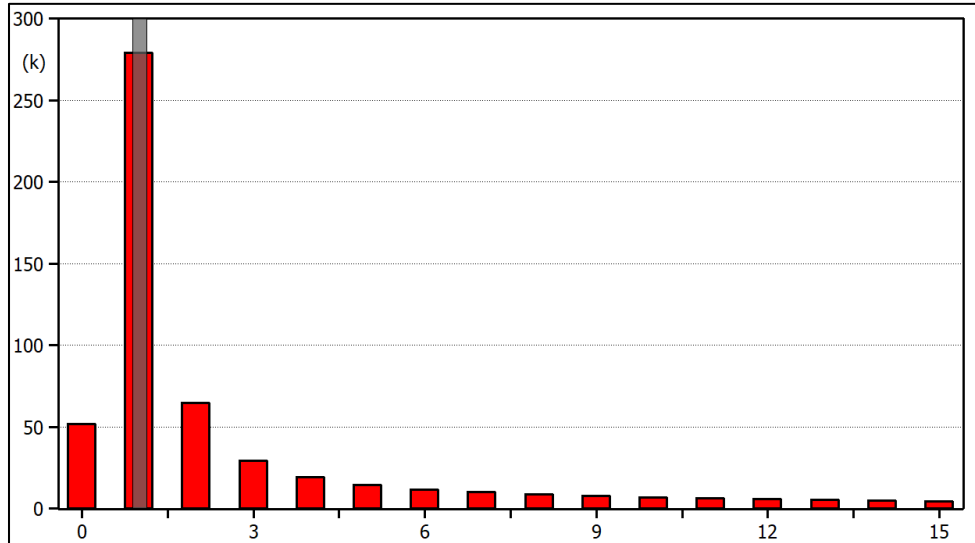


Figura 11.21. Valoración del THD en el voltaje de salida del transformador
Conexión Y-Y con GIC= 100[A] con 240 MVA.

Tabla 11.12. Resultados de comparación del THD en voltajes de entrada y salida del transformador de potencia conexión Y-Y.

% de THD en Voltajes de entrada y salida		
GIC (A)	Entrada	Salida
0	26,98	26,98
10	26,98	26,98
20	26,98	26,98
30	26,98	26,98
40	26,98	26,98
50	26,98	26,98
60	26,98	26,98
70	26,98	26,98
80	26,98	26,98
90	26,98	26,98
100	26,98	26,98
150	26,98	26,98
200	26,98	26,98

Como siguiente comparación se obtuvo valores de THD de los voltajes de entrada y salida del transformador de potencia dando como resultado que se mantiene constante con o sin carga y a distintos niveles de GIC dando a entender que la influencia de las GIC es nula en los voltajes del transformador.

11.4. CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA

Tabla 11.13. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Δ -Y.

CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA POR FASE			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
10	117 KVAR	117 KVAR	117 KVAR
50	5,43 MVAR	5,43 MVAR	5,43 MVAR
100	10,7 MVAR	10,7 MVAR	10,7 MVAR
150	15,9 MVAR	15,9 MVAR	15,9 MVAR
200	20,9 MVAR	20,9 MVAR	20,9 MVAR

De acuerdo al análisis y los resultados obtenidos se puede apreciar un comportamiento lineal en el consumo de la potencia reactiva del transformador a partir de 117 KVAR por 10 de GIC, dando una relación directamente proporcional al incremento de GIC, llevando al transformador a un consumo de más de 60 MVAR.

Tabla 11.14. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Y- Δ .

CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA POR FASE			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
10	1,11 MVAR	1,11 MVAR	1,11 MVAR
50	5,5 MVAR	5,5 MVAR	5,5 MVAR
100	10,8 MVAR	10,8 MVAR	10,8 MVAR
150	15,9 MVAR	15,9 MVAR	15,9 MVAR
200	20,9 MVAR	20,9 MVAR	20,9 MVAR

De acuerdo al análisis y los resultados obtenidos se puede apreciar un comportamiento lineal en el consumo de la potencia reactiva del transformador a partir de 1.11 MVAR por 10 de GIC, dando una relación directamente proporcional al incremento de GIC, llevando al transformador a un consumo de más de 60 MVAR.

Tabla 11.15. Resultados de comparación del consumo de potencia reactiva conexión Y-Y.

CONSUMO DE POTENCIA REACTIVA POR FASE			
GIC (A)	SIN CARGA	CARGA 50 MVA	CARGA 240 MVA
10	1,11 MVAR	1,11 MVAR	1,11 MVAR
50	5,5 MVAR	5,5 MVAR	5,5 MVAR
100	10,8 MVAR	10,8 MVAR	10,8 MVAR
150	15,9 MVAR	15,9 MVAR	15,9 MVAR
200	20,9 MVAR	20,9 MVAR	20,9 MVAR

De acuerdo al análisis y los resultados obtenidos se puede apreciar un comportamiento lineal en el consumo de la potencia reactiva del transformador a partir de 1.11 MVAR por 10 de

GIC, dando una relación directamente proporcional al incremento de GIC, llevando al transformador a un consumo de más de 60 MVAR.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el fin de conocer los efectos que las GIC producen en un transformador de potencia, en este trabajo se analizó 3 conexiones del transformador, cada una con distintos niveles de GIC. En el modelo utilizado al cual se le adjunto la rama de magnetización de forma externa se logró apreciar resultados similares entre las conexiones Δ -Y, Y- Δ y Y-Y, variando principalmente en magnitudes. En todos estos casos el tiempo en que llega al equilibrio de saturación disminuye a medida que la corriente geomagnética aumenta.

Se obtuvo graficas de las formas de onda de las señales de corriente, en las cuales se observó que pierden su simetría, esto para las tres conexiones. La corriente de magnetización presento distorsiones armónicas muy altas, existiendo armónicos pares e impares con magnitudes altas en bajas frecuencias. De igual manera se logra observar la presencia de distorsiones en la corriente primaria con un comportamiento lineal a medida que aumenta la GIC mayor es su distorsión armónica de la corriente, adicionalmente durante el análisis se presenció que el voltaje primario no se ve afectado por los armónicos.

Respecto al consumo de potencia reactiva en este trabajo se evidenció tanto en los tres tipos de conexiones que el transformador tuvo un comportamiento semejante al de las GIC, ya que la potencia reactiva aumentó a medida que la corriente geomagnética aumentaba. En las conexiones propuestas se obtuvieron resultados de mayor magnitud con ligeras variaciones entre conexiones.

Finalmente, con los tres tipos de conexiones se logró el objetivo de presenciar el comportamiento del transformador de potencia bajo condiciones GIC, se demostró que las corrientes geomagnéticas saturan el núcleo en medio ciclo, incrementan las componentes armónicas y al mismo tiempo distorsionan las señales de corriente, además se evidencia el aumento de consumo de potencia reactiva del transformador, y en comparación entre los tres tipos de conexiones propuestos la principal diferencia es el tiempo en el que llega a su estabilidad de saturación el transformador.

La posibilidad de investigaciones a futuro queda expresada en un análisis donde se agreguen más elementos al sistema, como pueden ser reactores, líneas de transmisión y más elementos que conforman un SEP y llegar a utilizar datos reales para apreciar y distinguir los efectos ante las distintas configuraciones de la red y evaluar las variables eléctricas bajo condiciones GIC.

Con el análisis propuesto queda abierta la oportunidad de evaluar y analizar los métodos de mitigación de las GIC, esto es conveniente realizarlo junto a un análisis del SEP bajo condiciones de las corrientes geomagnéticas y hacer una comparación del mejor método de mitigación comparando precios y funcionalidad.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Nahayo, P. Kotzé, P. Cilliers y S. Lotz, «Observations from SANSA's geomagnetic network during the Saint Patrick's Day storm of 17–18 March 2015,» The Author(s). Published under a Creative Commons Attribution Licence., 2019.
- [2] P. Vega-Jorquera, J. Lazzús y P. Rojas, «GA-optimized neural network for forecasting the geomagnetic storm index,» Universidad de La Serena, La Serena, 2018.
- [3] L. D. J. PACHECO CONSTANTINO, «MODELO HÍBRIDO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA PARA EL ESTUDIO DE CORRIENTES GEOMAGNÉTICAS INDUCIDAS,» UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, San Nicolas de las Garrza, 2015.
- [4] R. Purushottam Kane, «EVOLUTION OF Dst AND AURORAL INDICES DURING SOME SEVERE GEOMAGNETIC STORMS,» *Revista Brasileira de Geofísica (RBGF)*, vol. 27, n° 2, pp. 151-163, 2009.
- [5] «DETECTION OF THREE DISTINCT REGIONS IN THE EQUATORIAL ELECTROJET IN THE BRAZILIAN SECTOR,» *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 21, n° 1, 2004.
- [6] H. C. Aveiro, C. M. Denardini, M. A. Abdu y N. J. Schuch, «STATISTICAL STUDY OF INCOHERENT INTEGRATION APPLIED TO SIMULATED POWER SPECTRA OF RADAR SIGNALS BACKSCATTERED FROM EQUATORIAL ELECTROJET IRREGULARITIES,» *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 25, n° 2, pp. 105-113, 2007.
- [7] National Aeronautics and Space Administration, «Condiciones del tiempo en el espacio,» 24 Mayo 2006. [En línea].
- [8] S. Sampériz, «Análisis de los efectos de las corrientes geomagnéticas inducidas sobre la Red Eléctrica de España,» 20 Noviembre 2017. [En línea].
- [9] C. M. Valverde Camacho, ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE INDUCCIÓN GEOMAGNÉTICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS, Quito, 2015.
- [10] A. Norberto, «TRANSFORMADOR IDEAL,» 2008. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/38593511/TRANSFORMADOR_IDEAL.
- [11] D. Ismail, H. Syafruddin y S. Taib, Magnetizing current, harmonic content and power factor as the indicators of transformer core saturation, *Journal of Clean Energy Technologies*, 2013.
- [12] S. J. Chapman, Máquinas Eléctricas, McGraw-Hill, 2000.
- [13] S. V. K. a. S. Khaparde, Transformer engineering: design and practice, CRC Press, 2004.

- [14] M. Heredia y R. Intriago, «ANÁLISIS DE SISTEMAS TRIFÁSICOS DE TRANSFORMADORES CONEXIÓN D-Y,» Agosto 2015. [En línea].
- [15] A. Peña y J. Suarez, «TIPOS DE CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS,» 01 Enero 2013. [En línea].
- [16] R. Thorberg, analysis of geomagnetically induced currents in power systems, Lund, 2012.
- [17] D. Boteler, TELLURIC EFFECTS ON PIPELINES, 2015.
- [18] J. Ramírez Niño, C. Haro Hernández, J. Héctor Rodríguez y R. Mijarez, «Core saturation effects of geomagnetic induced currents in power,» Journal of Applied Research and Technology, Morelos, Mexico, 2016.
- [19] G. Enríquez Harper, El Libro Oractico de Los Generadores, Transforamdores y Motores Eléctricos, 2005.
- [20] D. Guillén y G. Idárraga, «Comportamiento de transformadores electricos bajo la presencia de GIC mediante el uso de ATP,» 01 Septiembre 2013. [En línea].
- [21] R. G. a. K. Vedante, Effects of gic on power transformers and power systems, IEEE PES, 2012.
- [22] T. S. Molinski, Why utilities respect geomagnetically induced currents. Journal of, Space Weather Effects on Technological Systems, 2002, pp. 64 (16): 1765-1778.
- [23] F. R. Faxvog, Power Grid Protection against Geomagnetic Disturbances (GMD), IEEE Electric Power Energy, 2013, pp. 1-13.
- [24] B. Zhang, Y. Liu, L. Liu, M. Mcvey, M. Gardner y X. Xiao, Effect of Load Current on Leakage Flux of Transformer with Geomagnetically Induced Current, 2011.