



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE FALLA REFLEJADAS EN EL LADO DE
ALTA TENSIÓN DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA,
MEDIANTE SIMULACIONES EN ATPDRAW Y PROGRAMACIÓN EN PYTHON

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay

Isaac Kenneth Ponce Chóez

TUTOR: Ing. Otto W. Astudillo A , MEL

Guayaquil – Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Isaac Kenneth Ponce Choez con documento de identificación N° 2450556622 y Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay con documento de identificación N° 0958722241 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 10 de febrero del año 2026

Atentamente;



Isaac Kenneth Ponce Choez
CI: 2450556622



Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay
CI: 0958722241

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Isaac Kenneth Ponce Choez con número de identificación N° 2450556622 y Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay con número de identificación N° 0958722241 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE FALLA REFLEJADAS EN EL LADO DE ALTA TENSIÓN DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIONES EN ATPDRAW Y PROGRAMACIÓN EN PYTHON”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Electricidad, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 10 de febrero del año 2026

Atentamente;



Isaac Kenneth Ponce Choez
CI: 2450556622



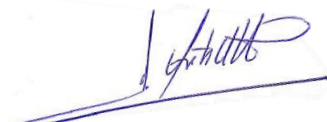
Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay
CI: 095872224

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Otto Washington Astudillo Astudillo con documento de identificación N° 0102054871 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES DE FALLA REFLEJADAS EN EL LADO DE ALTA TENSIÓN DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA, MEDIANTE SIMULACIONES EN ATPDRAW Y PROGRAMACIÓN EN PYTHON”, realizado por Isaac Kenneth Ponce Choez con número de identificación N° 2450556622 y Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay con número de identificación N° 095872224, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 29 de enero del año 2026

Atentamente;



Otto Washington Astudillo Astudillo
CI: 0102054871

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, de manera especial, a mi madre, Letty Chóez por ser el pilar fundamental de mi vida y de mi formación profesional. Su amor incondicional, su esfuerzo silencioso y su fe constante han sido mi mayor fortaleza para no rendirme, incluso en los momentos en los que parecía imposible continuar.

Este logro es reflejo de su entrega, de sus sacrificios y de la confianza que siempre depositó en mí.

Asimismo, dedico este trabajo a mis hermanos, por su apoyo, su solidaridad y su disposición para tenderme la mano cuando más lo necesité, y a mi padre, por su presencia, su cariño y su deseo permanente de verme salir adelante. Este logro también les pertenece.

Isaac Kenneth Ponce Choez

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios Todopoderoso, quien me ha dado la fortaleza y sabiduría para superar cada obstáculo en el camino. A mi familia, por ser mi mayor apoyo y mi fuente de inspiración: a mi madre, Laura Zhangallimbay, por su respaldo, por ser siempre un ejemplo de esfuerzo, perseverancia, por cuidarme, brindarme su amor incondicional durante todos los años de mi vida; a mi padrino Gregorio Méndez que siempre nos apoyó, a mi madre también agradezco a mi abuelito Daniel Sumba por recomendarme seguir estudiando, sin él no estaría aquí. Y, por último, pero no menos importante se lo dedico también a mi abuelita Jesús Naula, por cuidarme y estar siempre a mi lado cuando más la necesitaba. Y en general a mis familiares más cercanos que siempre creyeron en mí y me apoyaron.

Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por la fortaleza y las bendiciones recibidas a lo largo de este camino.

Mi más profundo agradecimiento es para mi madre, por su apoyo incondicional, su esfuerzo constante y por impulsarme a no rendirme. Su ejemplo y su fe han sido fundamentales en mi formación personal y académica.

A mis hermanos, por su apoyo solidario y por estar presentes cuando lo necesité. Su respaldo fue clave para que pudiera continuar mis estudios y culminar esta etapa.

A mi padre, por su cariño, sus consejos y su permanente deseo de verme progresar.

Expreso un sincero agradecimiento a mi tutor de tesis, el Ingeniero Otto Astudillo, por su guía, su disposición para resolver dudas y su acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo, los cuales contribuyeron significativamente a la calidad de la investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, hicieron posible la culminación de este logro.

Isaac Kenneth Ponce Chóez

Profundamente agradecido con Dios por la vida, la salud y la fortaleza para alcanzar este logro tan importante en mi carrera. Agradeciendo a mi madre, Laura Zhangallimbay, y a mis abuelitos, Daniel y Jesús, por su amor constante y su apoyo incondicional en cada paso de este proceso. Sin ellos, este momento no sería posible. También agradezco a mi padrino Gregorio Méndez por siempre creer en mí. También agradezco especialmente a los ingenieros Otto Astudillo, Juan Carlos Lata y Carlos Chávez, por su valiosa guía y respaldo durante la elaboración de este proyecto.

Dennis Alexander Pinos Zhangallimbay

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ACRONIMOS	xvi
CAPITULO I.....	1
1 TITULO.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 INTRODUCCIÓN	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 ALCANCE.....	4
1.6 BENEFICIARIOS	5
1.7 OBJETIVOS	5
1.7.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPITULO II.....	7
2 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	7
2.1. SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA	7
2.1.1 INTRODUCCION AL SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA	7
2.1.2 FALLAS EN LOS SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA.....	8
2.2 FALLAS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS	9
2.2.1 FALLAS SIMETRICAS	9
2.2.2 FALLAS ASIMETRICAS	10
2.3 COMPONENTES SIMETRICAS	12

2.3.1	REDES DE SECUENCIA EN TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS	14
2.4	TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	15
2.4.1	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	16
2.4.2	CONEXIONES EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	17
2.4.3	GRUPOS VECTORIALES DE CONEXIÓN	19
2.5	SOFTWARE UTILIZADO	20
2.5.1	PYTHON	20
2.5.2	ATP DRAW	21
CAPITULO III		22
3	DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE FALLA	22
3.1	DATOS GENERALES DEL TRANSFORMADOR.....	22
3.2	DEFINICION Y DESARROLLO BASE DEL SISTEMA	22
3.3	ESTABLECIOMIENTO DE LOS DATOS ELECTRICOS DEL TRANSFORMADOR	24
3.4	IMPEDANCIA REAL DEL TRANSFORMADOR A PARTIR DE LA RESISTENCIA DE CORTOCIRCUITO.....	25
3.4.1	HALLAR EL VALOR DE RESISTENCIA DE CORTOCIRCUITO.....	26
3.4.2	HALLAR LAS REACTANCIAS DEL TRANSFORMADOR.....	27
3.5	MODELO DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO DE POTENCIA MEDIANTE EL METODO DE COMPONENTES SIMETRICAS	28
3.6	FORMULAS PARA OBTENER LAS CORRIENTES DE DISTINTAS FALLAS 29	
3.6.1	CORRIENTES DE FALLA MONOFASICA A TIERRA EN BT (ESTRELLA)	29
3.6.1.1	FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA MONOFASICA 31	
3.6.2	CORRIENTES DE FALLA BIFASICA EN BT (ESTRELLA).....	33
3.6.2.1	FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA BIFASICA ..	35
3.6.3	CORRIENTES DE FALLA BIFASICA A TIERRA EN BT (ESTRELLA). 37	
3.6.3.1	FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA BIFASICA A TIERRA 40	
3.6.4	PARA EL CASO DE FALLA TRIFASICA	42
3.6.4.1	FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA TRIFASICA 44	
3.7	CONCLUSION FINAL SOBRE EL MODELO MATEMATICO.....	45

CAPITULO IV	46
4 METODOLOGIA Y DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	46
4.1 ENFOQUE METODOLOGICO.....	46
4.2 PYTHON PARA CORRIENTES DE FALLA.....	46
4.3 PARAMETROS Y DESCRIPCIONES DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA BAJO ESTUDIO	47
4.4 VALORES BASE E IMPEDANCIA.....	48
4.5 IMPEDANCIA DE SECUENCIA	48
4.6 METODO DE COMPONENTES SIMETRICAS EN 'PYTHON	49
4.7 CORRIENTES REFLEJADAS EN EL LADO DE ALTA TENSION	49
4.8 APLICACIÓN DE LOS DISTINTOS CASOS DE FALLAS	50
4.9 CODIGO PYTHON COMPLETO	50
4.10 DEMOSTRACION DE LOS RESULTADOS ANALIZADOS EN PYTHON	53
4.8.1 RESULTADOS EN PYTHON PARA DYN1	53
4.8.2 RESULTADOS EN PYTHON PARA DYN5	54
4.11 COMPARACION DE CORRIENTES DE FALLA DE DOS GRUPOS VECTORIALES MEDIANTE LA SIMULACION PYTHON	55
4.12 OBSERVACIONES FINALES DEL CAPITULO	57
CAPITULO V	58
5 MODELADO Y SUMULACION EN ATP DRAW.....	58
5.1 MODELADO DEL DIAGRAMA ELECTRICO.....	58
5.2 CALCULOS PARA LOS PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR.....	59
5.3 SIMULACION DE FALLAS	61
5.3.1 FALLA MONOFASICA EN ATPDRAW	62
5.3.1.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN BAJA (ESTRELLA) 63	
5.3.1.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA). 63	
5.3.2 FALLA BIFASICA EN ATP DRAW	64
5.3.2.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FASE EN BAJA (ESTRELLA)65	
5.3.2.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA). 65	
5.3.3 FALLA BIFASICA A TIERRA EN ATP DRAW.....	66
5.3.3.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN BAJA (ESTRELLA) 67	
5.3.3.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA). 67	
5.3.4 FALLA TRIFÁSICA EN ATP DRAW.....	68
5.3.4.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FASE EN BAJA (ESTRELLA)69	

5.3.4.2	CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA)	69
5.4	COMPARACION AL CAMBIAR EL GRUPO VECTORIAL	70
5.4.1.1	CURVA CORRIENTES EN BAJA (ESTRELLA)	70
5.4.1.2	CORRIENTES EN ALTA (DELTA)	71
5.5	CONCLUSION FINAL DEL CAPITULO	73
CAPITULO VI		74
6	COMPARACION FINAL CALCULO ANALITICO CON ATP DRAW	74
6.1	CONCLUSIONES	75
6.2	RECOMENDACIONES	76
CAPITULO VII		78
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	78
7.1	ANEXOS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. FALLA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	9
FIGURA 2.2. FALLA ENTRE TRES LÍNEAS.....	10
FIGURA 2.3. FALLA DE LÍNEA A TIERRA.....	11
FIGURA 2.4. FALLA ENTRE DOS LÍNEAS	11
FIGURA 2.5. FALLA ENTRE DOS LÍNEAS A TIERRA	12
FIGURA 2.6. COMPONENTES DE SECUENCIAS DE VOLTAJES.....	13
FIGURA 2.7. TIPOS DE CONEXIÓN DE BANCO DE TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS	15
FIGURA 2.8. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 3 COLUMNAS	16
FIGURA 2.9. BANCO DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS YNY	17
FIGURA 2.11. CONEXIÓN DE BOBINADOS EN DELTA D_1	18
FIGURA 2.10. CONEXIÓN DE BOBINADOS EN ESTRELLA Y_0	17
FIGURA 2.12. CONEXIÓN DE BOBINADOS EN ZIG-ZAG Z_1	18
FIGURA 2.13. COMBINACIÓN DE CONFIGURACIONES DE BOBINADOS DY1	20
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE SECUENCIAS PARA FALLA MONOFÁSICA A TIERRA.....	29
FIGURA 3.2. DIAGRAMA EQUIVALENTE DE THEVENIN PARA FALLA MONOFÁSICA.....	29
FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE SECUENCIA PARA FALLA BIFÁSICA.....	33
FIGURA 3.4. DIAGRAMA EQUIVALENTE DE THEVENIN PARA FALLA BIFÁSICA	33
FIGURA 3.5. DIAGRAMA DE SECUENCIA PARRA FALLA BIFÁSICA A TIERRA..	37
FIGURA 3.6. DIAGRAMA EQUIVALENTE DE THEVENIN PARA FALLA BIFÁSICA A TIERRA.....	37
FIGURA 3.7. DIAGRAMA EQUIVALENTE DE THEVENIN PARA FALLA TRIFÁSICA	42
FIGURA 5.1. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA	59
FIGURA 5.2. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR EN ATPDRAW	61
FIGURA 5.3. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA PARA UNA FALLA MONOFÁSICA.....	62
FIGURA 5.4. CURVA DE CORRIENTES EN BT (FALLA MONOFÁSICA).....	63
FIGURA 5.5. CURVAS DE CORRIENTES EN AT PARA UNA FALLA MONOFÁSICA	63
FIGURA 5.6. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA PARA UNA FALLA BIFÁSICA.....	64
FIGURA 5.7. CURVAS DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA BIFÁSICA	65
FIGURA 5.8. CURVAS DE CORRIENTES EN AT PARA UNA FALLA BIFÁSICA	65
FIGURA 5.9. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA PARA UNA FALLA BIFÁSICA A TIERRA.....	66
FIGURA 5.10. CURVAS DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA BIFÁSICA A TIERRA.....	67

FIGURA 5.11. CURVAS DE CORRIENTES EN AT PARA UNA FALLA BIFÁSICA A TIERRA.....	67
FIGURA 5.12. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA PARA UNA FALLA TRIFÁSICA	68
FIGURA 5.13. CURVAS DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA TRIFÁSICA ..	69
FIGURA 5.14. CURVAS DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA TRIFÁSICA ..	69
FIGURA 5.15. CURVA DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA MONOFÁSICA CONEXIÓN DYN1.....	70
FIGURA 5.16. CURVA DE CORRIENTES EN BT PARA UNA FALLA MONOFÁSICA GRUPO CONEXIÓN.....	71
FIGURA 5.17. CURVA DE CORRIENTES EN AT PARA UNA FALLA MONOFÁSICA CONEXIÓN DYN1.....	71
FIGURA 5.18. CURVA DE CORRIENTES EN AT PARA UNA FALLA MONOFÁSICA CONEXIÓN DYN5.....	72
FIGURA 7.1. VENTANA PRINCIPAL DE ATPDRAW CON ELEMENTOS VARIOS ..	81
FIGURA 7.2. PARAMETROS DE LA FUENTE PARA EL SISTEMA EN ATP DRAW ..	81
FIGURA 7.3. CORRIENTES DE FALLA TRIFÁSICA EN BAJA(ESTRELLA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN3	82
FIGURA 7.4. CORRIENTES DE FALLA TRIFÁSICA EN ALTA(DELTA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN3	82
FIGURA 7.5. CORRIENTES DE FALLA BIFÁSICA A TIERRA EN BAJA(ESTRELLA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN7.....	83
FIGURA 7.6. CORRIENTES DE FALLA BIFÁSICA A TIERRA EN ALTA(DELTA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN7.....	83
FIGURA 7.7. CORRIENTES DE FALLA BIFÁSICA EN BAJA(ESTRELLA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN9	84
FIGURA 7.8. CORRIENTES DE FALLA BIFÁSICA EN ALTA(DELTA) PARA UN GRUPO VECTORIAL DYN9	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1. COMPARACIÓN DE CORRIENTES FALLA PARA TRANSFORMADORES DYN1 Y DYN5 (LV).....	55
TABLA 4.2. COMPARACIÓN DE CORRIENTES DE FALLA EN TRANSFORMADORES DYN1 Y DYN5 (HV).....	56
TABLA 6.1 COMPARACIÓN MAGNITUDES DE CORRIENTES DE FALLA- CÁLCULOS PYTHON VS ATPDRAW.....	74

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de las corrientes de falla reflejadas en el lado de alta tensión de un transformador trifásico de potencia, considerando la influencia del grupo vectorial de conexión. El estudio se desarrolló a partir del método de componentes simétricas, el cual permitió evaluar distintos tipos de fallas asimétricas y simétricas en sistemas eléctricos de potencia, con énfasis en transformadores conectados en configuración delta–estrella con neutro a tierra (Dyn).

Se elaboró un modelo matemático representativo del transformador, sustentado en la teoría fundamental de componentes simétricas y en parámetros eléctricos equivalentes, con el fin de calcular las corrientes de cortocircuito en el lado de baja tensión y su correspondiente reflexión hacia el lado de alta tensión. Dicho modelo fue implementado mediante programación en Python, lo que permitió automatizar los cálculos, mejorar la precisión numérica y realizar el análisis sin depender de software comercial de licenciamiento elevado.

Posteriormente, se desarrolló un modelo computacional del sistema eléctrico en el software ATPDraw, donde se parametrizó el transformador a partir de sus resistencias e inductancias equivalentes y se realizaron simulaciones electromagnéticas para cada tipo de falla y grupo vectorial analizado. Estas simulaciones permitieron observar las formas de onda de corriente en el dominio del tiempo y analizar el comportamiento transitorio del sistema.

Finalmente, se efectuó un análisis comparativo entre los valores de corriente eficaz (RMS) obtenidos mediante los cálculos en Python y los extraídos de las simulaciones en ATPDraw. Los resultados evidenciaron una alta concordancia entre ambos métodos, validando el modelo matemático propuesto. Asimismo, se comprobó que el cambio de grupo vectorial no modifica la magnitud de las corrientes de falla, pero sí introduce desplazamientos angulares que afectan la correspondencia de fases y la interpretación de las mediciones, aspecto relevante para la correcta coordinación de los sistemas de protección eléctrica.

Palabras clave: Corrientes de falla, componentes simétricas, transformador trifásico, grupo vectorial, Python, ATPDraw, sistemas eléctricos de potencia.

ABSTRACT

In the present work, the behavior of fault currents reflected on the high-voltage side of a three-phase power transformer was analyzed, considering the influence of the vector group connection. The study was carried out using the symmetrical components method, which allowed the evaluation of different types of unbalanced and balanced faults in power systems, with emphasis on delta–wye grounded (Dyn) transformer configurations.

A representative mathematical model of the transformer was developed based on the fundamental theory of symmetrical components and equivalent electrical parameters, in order to calculate short-circuit currents on the low-voltage side and their corresponding reflection on the high-voltage side. This model was implemented using Python programming, enabling automated calculations and improved numerical accuracy without relying on proprietary or high-cost commercial software.

Subsequently, a computational model of the electrical system was developed using ATPDraw software, where the transformer was parameterized based on its equivalent resistances and inductances, and electromagnetic simulations were performed for each fault type and vector group analyzed. These simulations allowed the observation of current waveforms in the time domain and the analysis of the system's transient behavior.

Finally, a comparative analysis was conducted between the root mean square (RMS) current values obtained from Python calculations and those extracted from ATPDraw simulations. The results showed a high level of agreement between both methods, validating the proposed mathematical model. Additionally, it was verified that changes in the transformer vector group do not affect the magnitude of fault currents, but introduce angular displacements that alter phase correspondence and the interpretation of measurements, which is relevant for the coordination of electrical protection systems.

Keywords: Fault currents, symmetrical components, three-phase transformer, vector group, Python, ATPDraw, power systems.

ACRONIMOS

ATP: Alternative transient program.

EMTP: Electromagnetic transients program.

H: terminal de alta tensión.

X: terminal de baja tensión.

CC: cortocircuito.

S-F: secuencias de Fortescue

RMS: Root Mean Square.

AT: Alta Tensión.

BT: Baja Tensión.

NumPy: Numerical Python

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

IEC: International Electrotechnical Commission

AC: Corriente Alterna.

kV: Kilovoltio.

MVA: Megavoltio-amperio

kW: Kilovatio.

pu: Por Unidad

CAPITULO I

1 TITULO

Análisis de las corrientes de falla reflejadas en el lado de alta tensión de un transformador trifásico de potencia, mediante simulaciones en ATPDraw y programación en Python.

1.1 ANTECEDENTES

El análisis de las fallas en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) ha sido una de las herramientas importantes para poder referirse al diseño, operación y para protecciones de redes eléctricas. El método de componentes simétricas creado por Fortescue nos ha facilitado el estudio de las fallas desbalanceadas, transformándose en unos de los métodos más importantes tanto para la vida académica como en lo profesional en la Ing. Eléctrica.

En varios estudios y normativas técnicas nos han demostrado que el comportamiento de los cortocircuitos de los transformadores de potencia depende directamente de cómo están configurados internamente. Principalmente como las configuraciones como delta-estrella con neutro a tierra, nos demuestran características importantes cuando hay fallas monofásicas y bifásicas a tierra, ya que podemos observar como la secuencia cero y su recorrido interno en el lado de delta.

1.2 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia están permanentemente expuestos a distintos tipos de fallas eléctricas, las cuales pueden comprometer la estabilidad, la seguridad y la continuidad del suministro de energía. Durante la ocurrencia de un cortocircuito, se generan corrientes de elevada magnitud que producen esfuerzos térmicos y electromecánicos sobre los equipos, además de afectar la correcta operación de los sistemas de protección y control del sistema eléctrico en su conjunto.

El comportamiento de las corrientes de falla no depende únicamente de la magnitud del cortocircuito, sino también del tipo de falla, de la topología del sistema y de la forma en que los distintos elementos se encuentran interconectados. En este contexto, los transformadores

trifásicos de potencia desempeñan un papel fundamental, ya que actúan como elementos de acoplamiento entre redes de diferentes niveles de tensión y pueden modificar la forma en que las corrientes de falla se reflejan entre el lado de baja y el lado de alta tensión.

En particular, la configuración de los devanados y el grupo vectorial del transformador influyen directamente en el desfase angular y en la distribución de las corrientes reflejadas durante una condición de falla. Si bien en ciertos tipos de fallas las magnitudes de las corrientes pueden mantenerse prácticamente constantes, los desplazamientos angulares introducidos por el grupo vectorial tienen un impacto significativo en el análisis fasorial del sistema, lo cual resulta determinante para la correcta coordinación de protecciones y la evaluación del comportamiento del sistema ante contingencias.

En la práctica, el estudio de corrientes de falla y su propagación a través de los transformadores suele realizarse mediante herramientas computacionales especializadas, que permiten analizar distintos escenarios de operación y tipos de falla con un alto nivel de detalle. Sin embargo, el acceso limitado a software comercial de alto costo puede representar una barrera para la realización de este tipo de estudios en entornos académicos y de investigación.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los transitorios eléctricos en los sistemas de potencia demandan el uso de programas avanzados, sin embargo, estos en su mayoría son de pago. Esta situación limita considerablemente las posibilidades de los estudiantes e investigadores para efectuar estudios técnicos detallados y precisos por su propia cuenta.

Dentro de estos fenómenos eléctricos, conocer con exactitud las corrientes de cortocircuito que se refleja en los transformadores de potencia es esencial para garantizar una adecuada selección de dispositivos de protección y una correcta estimación de los niveles de cortocircuito, considerando la importancia de las componentes simétricas.

La secuencia cero del transformador con conexión D-Yg no proporciona un camino para la corriente de falla desde el lado delta, esto está estrechamente relacionado con la coordinación

de protección, como la coordinación de puesta a tierra y la configuración del relé. Si estos análisis carecen de precisión, se corre el peligro de tener una mala coordinación de protecciones, fallas no detectadas y afectaciones a la confiabilidad del sistema eléctrico.

Ante esto, proponemos el uso de programas gratuitos como Python y ATPDraw para el análisis de las corrientes de falla reflejadas en transformadores trifásicos de potencia. Python permitirá implementar modelos matemáticos basados en el método de componentes simétricas y en el modelado del transformador, facilitando el cálculo de corrientes de falla y su reflexión en el lado de alta tensión bajo distintos grupos vectoriales de conexión.

Por su parte, ATPDraw será utilizado para modelar y simular el comportamiento transitorio del transformador ante condiciones de falla, permitiendo validar los resultados obtenidos mediante los cálculos analíticos. La combinación de ambas herramientas posibilita un análisis preciso y de bajo costo, reduciendo la dependencia de software comercial y fortaleciendo el aprendizaje práctico en el estudio de fenómenos transitorios en sistemas eléctricos de potencia.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El estudio de las corrientes de falla en transformadores de potencia es importante para mantener la confiabilidad y eficiencia en los sistemas eléctricos de potencia. Encontrar los valores con buena precisión nos ayudan en la selección correcta de dispositivos de protección para así mantener la continuidad del suministro eléctrico.

En particular, las configuraciones de conexión entre los devanados influyen significativamente en el comportamiento de las corrientes reflejadas durante una falla. En los transformadores conectados en delta-estrella (Δ -Y), la componente de secuencia cero no se transmite a través del devanado en delta, lo que genera diferencias significativas en la magnitud y el perfil fasorial de las corrientes reflejadas en el lado de alta tensión durante fallas asimétricas [1].

Si bien el bloqueo de la componente de secuencia cero depende de la topología de conexión del transformador, el grupo vectorial determina el desplazamiento angular entre los

devanados, lo cual influye en la distribución fasorial de las corrientes reflejadas y en la respuesta de los sistemas de protección. Este aspecto justifica la necesidad de analizar distintos grupos vectoriales para una adecuada coordinación y selección de protecciones.

Por otra parte, el uso de software de simulación con licencias de alto costo limita el acceso de estudiantes e investigadores a herramientas profesionales para realizar este tipo de estudios. Considerando esto, la utilización de plataformas de libre acceso como Python y ATPDraw representa una alternativa viable, económica y didáctica para el desarrollo de modelos con buen margen de precisión que permitan analizar los efectos de las corrientes de falla reflejadas en transformadores de potencia.

Nuestra investigación permite comprender en profundidad el efecto de la secuencia cero de sus componentes y sus distintos grupos vectoriales en conexión de las corrientes reflejadas de transformadores de potencia, además demuestra la calidad y precisión que se puede lograr con software libre en la ingeniería eléctrica, contribuyendo al fortalecimiento de competencias prácticas en la evaluación y modelación de fenómenos transitorios.

1.5 ALCANCE

El presente trabajo se enfoca en el análisis teórico y computacional de las corrientes de falla reflejadas en el lado delta de un transformador trifásico considerando la influencia del grupo vectorial. No se realizará pruebas experimentales ni mediciones en el laboratorio.

Se analizará los principales tipos de fallas que suelen haber cuando ocurre un cortocircuito en el transformador trifásico de potencia como, por ejemplo: la falla monofásica, falla bifásica, falla bifásica a tierra y falla trifásica. Para todos esos casos implementaremos el método de las componentes simétricas con el propósito de encontrar las corrientes en el lado de baja tensión y a su vez reflejada en el lado de alta tensión del transformador, valorando también la influencia de los grupos vectoriales más comunes utilizados en los transformadores de potencia.

En el desarrollo computacional se utilizará el software Python para el modelo matemático basados en datos del transformador, mientras que la confirmación y validación de los

resultados se llevará a cabo en el Software ATPDraw. El alcance de nuestro trabajo se enfocará principalmente en el análisis de las corrientes de cortocircuito reflejadas y su comportamiento dependiendo de las conexiones del transformador de potencia.

1.6 BENEFICIARIOS

- El presente trabajo de titulación beneficia a los estudiantes de la investigación. Ya que gracias a las investigaciones que se hacen, profundizaran conocimientos adquiridos durante su formación académica en el campo de sistemas eléctricos de potencia, principalmente en el análisis de fallas y en el uso de las herramientas de simulación y programación aplicadas a la ingeniería eléctrica como Python y ATPDraw.
- Este proyecto beneficiara también a los estudiantes y a los docentes de la carrera de Ing. Eléctrica. Ya que se podría tomar como referencia para el estudio de como se ve reflejado las corrientes mediante diferentes configuraciones del transformador trifásico de potencia. En general beneficiara principalmente a la comunidad académica de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Así mismo también beneficiara a los profesionales que se dedican en el campo eléctrico de potencia que están interesados en el área de análisis de fallas y en las aplicaciones alternativas de simulaciones y métodos computacionales como ATPDraw y Python, concluyendo el desarrollo de los estudios técnicos con menores costos de Software y mayor libre de acceso.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar las corrientes de falla reflejadas en el lado de alta tensión de un transformador trifásico de potencia, utilizando programación en Python y validación mediante ATPDraw, para la determinación de la influencia de los diferentes grupos vectoriales de conexión.

1.7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un modelo representativo de transformador de potencia sustentándonos de la teoría fundamental para la realización del análisis de cortocircuito.
- Implementar códigos en Python, tomando en cuenta las configuraciones vectoriales más comunes que permitan determinar las corrientes de falla reflejadas en el lado de alta tensión del transformador, tomando en cuenta las configuraciones vectoriales más comunes.
- Realizar simulaciones en ATPDraw según los grupos vectoriales empleados, elaborando el diagrama y parametrización del sistema para comparar el comportamiento de las corrientes de falla reflejadas en el transformador según los grupos vectoriales empleados.
- Efectuar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante las simulaciones en ATPDraw y los cálculos desarrollados con Python, para la evaluación de su concordancia y precisión.

CAPITULO II

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El presente capítulo tiene como objetivo establecer el marco conceptual y teórico que sustenta el desarrollo de esta investigación, proporcionando las bases necesarias para la comprensión, modelación y análisis de los fenómenos eléctricos estudiados a lo largo del trabajo. En particular, se abordan los principios fundamentales del análisis de sistemas eléctricos de potencia en condiciones normales y de falla, así como los modelos matemáticos y herramientas de simulación empleados para su evaluación.

2.1. SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA

2.1.1 INTRODUCCION AL SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia está constituido por el conjunto de instalaciones, equipos, redes y procesos destinados a la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. Su objetivo principal es suministrar energía de forma continua, segura y confiable a los usuarios finales, manteniendo parámetros de calidad dentro de límites establecidos por normativas técnicas [2].

La energía eléctrica utilizada en los sistemas de potencia se obtiene a partir de diversas fuentes primarias, tales como centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, eólicas, solares, nucleares y geotérmicas. Estas fuentes transforman la energía disponible en la naturaleza en energía eléctrica, la cual es posteriormente transportada a través de redes de transmisión y distribución hasta los centros de consumo [3].

El manejo de la energía eléctrica en los sistemas de potencia se realiza principalmente en forma de corriente alterna, debido a las ventajas técnicas que ofrece frente a la corriente continua, como la facilidad de transformar los niveles de tensión y reducir las pérdidas durante la transmisión a largas distancias [4]. Los circuitos de corriente alterna utilizados en estos sistemas son excitados por fuentes senoidales, lo que permite un análisis matemático sistemático tanto en condiciones normales como ante la ocurrencia de fallas[5].

La interconexión de sistemas eléctricos permite mejorar la confiabilidad y flexibilidad operativa; sin embargo, también incrementa la complejidad del sistema y la severidad de los fenómenos transitorios que pueden presentarse ante perturbaciones [6]. Por esta razón, el estudio de fallas eléctricas constituye un aspecto fundamental en el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

2.1.2 FALLAS EN LOS SISTEMA ELECTRICOS DE POTENCIA

Los sistemas eléctricos de potencia están permanentemente expuestos a la ocurrencia de fallas debido a múltiples factores, entre los que se incluyen descargas atmosféricas, deterioro del aislamiento, envejecimiento de los equipos, contaminación ambiental y errores humanos durante la operación y mantenimiento [7].

Una falla eléctrica se caracteriza por la aparición de una trayectoria de baja impedancia que provoca el flujo de corrientes de magnitud considerablemente mayor a la corriente nominal del sistema. Estas corrientes elevadas pueden generar esfuerzos térmicos y mecánicos severos en los equipos eléctricos, reduciendo su vida útil o provocando daños irreversibles [8].

Las descargas atmosféricas representan una de las principales causas de fallas en sistemas de transmisión. La alta tensión inducida entre los conductores y las estructuras aterrizadas puede ionizar el aire, creando un camino conductor hacia tierra y provocar incendios como se puede ver en la figura 2.1. Una vez establecida esta trayectoria, la corriente de falla fluye desde el conductor hacia el neutro del sistema, generalmente aterrizado en transformadores o generadores [9].

El análisis de corrientes de falla permite determinar los niveles de cortocircuito del sistema, los cuales constituyen un parámetro esencial para el diseño, selección y coordinación de los dispositivos de protección. Una estimación incorrecta de estas corrientes puede provocar disparos indebidos, fallas no despejadas y pérdida de confiabilidad en el suministro eléctricos [10].



Figura 2.1. Falla en un sistema eléctrico de potencia

Fuente: [11].

2.2 FALLAS EN SISTEMAS TRIFÁSICOS

2.2.1 FALLAS SIMÉTRICAS

Las fallas simétricas son aquellas que afectan de manera equilibrada a las tres fases del sistema eléctrico. El caso más representativo es el cortocircuito trifásico, en el cual las corrientes y tensiones mantienen la simetría del sistema trifásico original [12]. En la figura 2.2 se puede observar el diagrama de este, con el neutro de la estrella aterrizado.

Aunque las fallas simétricas representan un porcentaje reducido de los eventos reales, aproximadamente un 5 %, generan las corrientes de mayor magnitud y son utilizadas como referencia para el cálculo de los niveles máximos de cortocircuito que deben soportar los equipos eléctricos [9].

Debido a su severidad, el estudio de fallas simétricas es fundamental para el dimensionamiento de interruptores de potencia, barras colectoras y otros elementos críticos del sistema eléctrico.

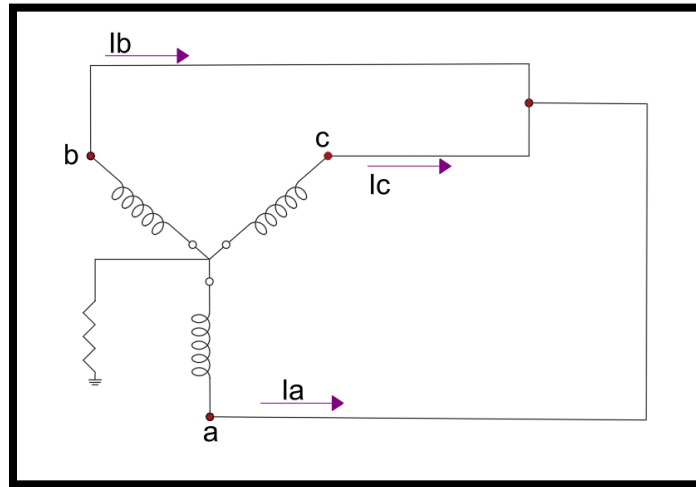


Figura 2.2. *Falla entre tres líneas*

Fuente: adaptado de [13].

2.2.2 FALLAS ASIMÉTRICAS

Las fallas asimétricas producen un desequilibrio en el sistema trifásico y representan la mayoría de los eventos reales que ocurren en los sistemas eléctricos de potencia [7]. Estudios estadísticos indican que entre el 70 % y 80 % de las fallas en líneas de transmisión corresponden a fallas monofásicas a tierra [9].

Las fallas asimétricas más comunes incluyen las fallas monofásicas a tierra, fallas bifásicas y fallas bifásicas a tierra. En estos casos, las magnitudes eléctricas dejan de estar balanceadas, lo que complica el análisis directo del sistema mediante métodos convencionales [14].

El análisis de este tipo de fallas requiere el uso de herramientas matemáticas que permitan manejar sistemas desbalanceados. En este contexto, el método de las componentes simétricas se convierte en una técnica indispensable para el estudio de corrientes y tensiones durante condiciones de falla [15].

La configuración mostrada en la figura 2.3 corresponde al esquema de conexión empleado para la simulación de una falla monofásica a tierra en un sistema trifásico con conexión en estrella aterrizada. La falla se aplica en una de las fases.

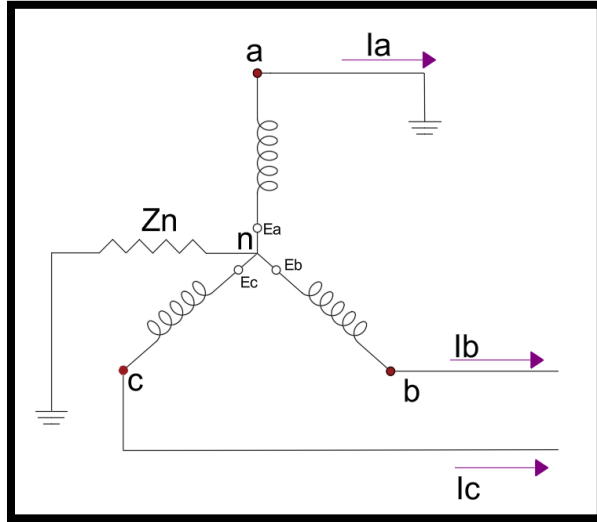


Figura 2.3. *Falla de línea a tierra*

Fuente: *Adaptado de [13].*

A continuación, en la figura 2.4 se presenta el esquema de conexión utilizado para la simulación de una falla bifásica entre dos fases del sistema trifásico con neutro aterrizado.

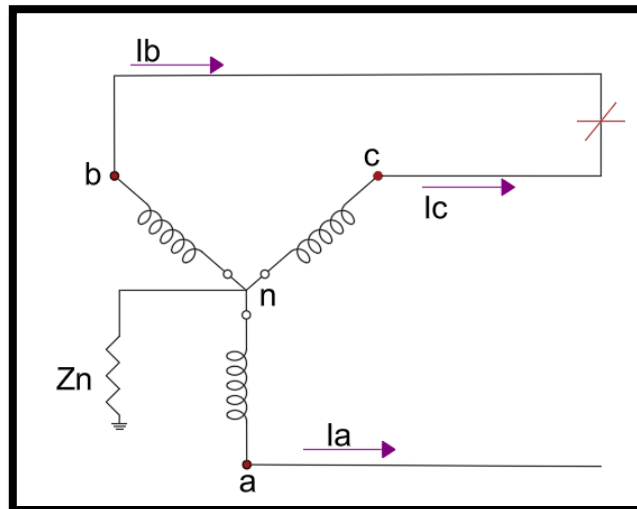


Figura 2.4. *Falla entre dos líneas*

Fuente: *adaptado de [13].*

Seguidamente, se muestra en la figura 2.5 la configuración empleada para la simulación de una falla bifásica a tierra en un sistema trifásico con conexión en estrella aterrizada. En este caso, dos fases se encuentran en cortocircuito entre sí y simultáneamente con tierra.

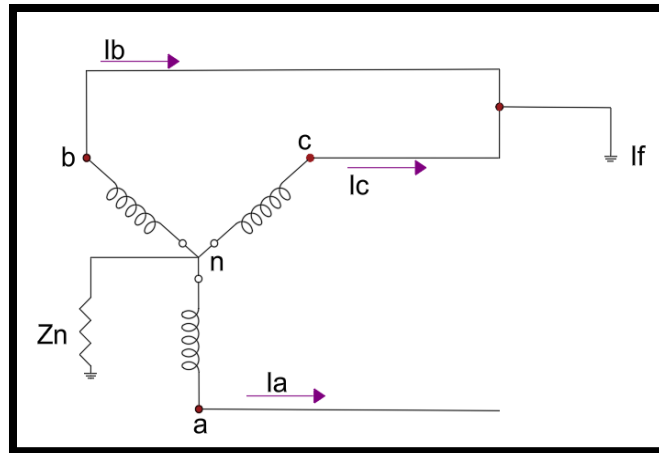


Figura 2.5. Falla entre dos líneas a tierra

Fuente: adaptado de [13].

2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

El método de componentes simétricas fue desarrollado por Charles L. Fortescue en 1918 y constituye una de las herramientas fundamentales para el análisis de sistemas trifásicos desbalanceados [16]. Este método establece que cualquier sistema trifásico no balanceado puede descomponerse en tres sistemas trifásicos balanceados independientes.

Las componentes de secuencia positiva representan el estado normal de operación del sistema y conservan la secuencia de fases original. Las componentes de secuencia negativa presentan una secuencia inversa y están asociadas a condiciones de desequilibrio severo [17].

Las componentes de secuencia cero están formadas por tres fasores de igual magnitud y fase, y aparecen principalmente en fallas que involucran la tierra. La circulación de estas componentes depende directamente de la configuración del sistema y de la puesta a tierra de los neutros [18].

El uso del método de componentes simétricas permite desacoplar un sistema trifásico complejo en tres redes más simples, cuyos resultados pueden superponerse para obtener la respuesta del sistema original. Esta metodología es ampliamente utilizada en estudios de

cortocircuito y análisis de fallas asimétricas [19]. Los elementos de interés del sistema son las máquinas, transformadores, líneas de transmisión y cargas conectadas a configuraciones Δ o Y.

Según el teorema de Fortescue, cualquier sistema de tensiones trifásicas V_a , V_b y V_c puede descomponerse en tres sistemas balanceados llamados componentes de secuencia:

- **Secuencia cero (V_0):** Tres fasores iguales en magnitud y ángulo. No hay desfase entre fases véase la figura 2.6.
- **Secuencia positiva (V_1):** Tres fasores iguales, Desfase de $+120^\circ$, Orden normal de fases (a–b–c) véase la figura 2.6.
- **Secuencia negativa (V_2):** Tres fasores iguales, Desfase de $+120^\circ$, Orden inverso de fases (a–c–b) véase la figura 2.6.

Las tensiones de fase se obtienen a partir de las componentes de secuencia mediante:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

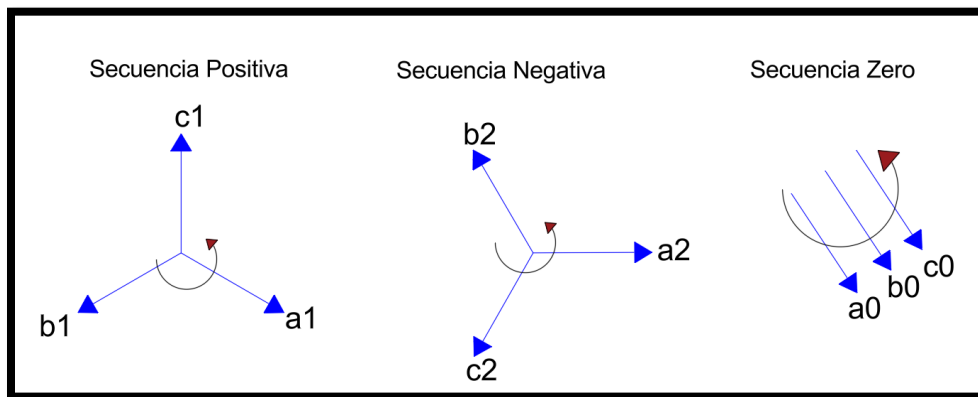


Figura 2.6. Componentes de secuencias de voltajes

Fuente: adaptado de [7].

2.3.1 REDES DE SECUENCIA EN TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS

En los estudios de fallas asimétricas, los transformadores de potencia se representan mediante redes equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero, de acuerdo con el método de componentes simétricas. Para las secuencias positiva y negativa, el transformador presenta una impedancia equivalente que, en condiciones normales de operación, es similar a su impedancia de cortocircuito, ya que ambos sistemas representan el comportamiento del transformador frente a corrientes desbalanceadas en régimen transitorio [20].

El comportamiento del transformador frente a corrientes de secuencia cero depende directamente de la conexión de los devanados y del esquema de puesta a tierra de los neutros. En transformadores con conexión delta-estrella, las corrientes de secuencia cero pueden circular internamente en el devanado en delta, proporcionando un camino de retorno magnético y eléctrico, pero no se transmiten hacia el otro lado del transformador como se muestra en la figura 2.7, lo que implica un desacoplamiento de la red de secuencia cero entre los sistemas de alta y baja tensión [21].

Este fenómeno tiene una influencia directa en la magnitud y en la forma de las corrientes de falla reflejadas en el lado de alta tensión, especialmente durante fallas monofásicas a tierra. En consecuencia, la correcta modelación de las redes de secuencia del transformador resulta fundamental para la evaluación precisa de corrientes de cortocircuito, la coordinación de protecciones y el análisis de sobretensiones asociadas a condiciones de falla, lo que resalta la importancia de considerar la configuración del transformador en los estudios de cortocircuito y protección de sistemas eléctricos de potencia [22].

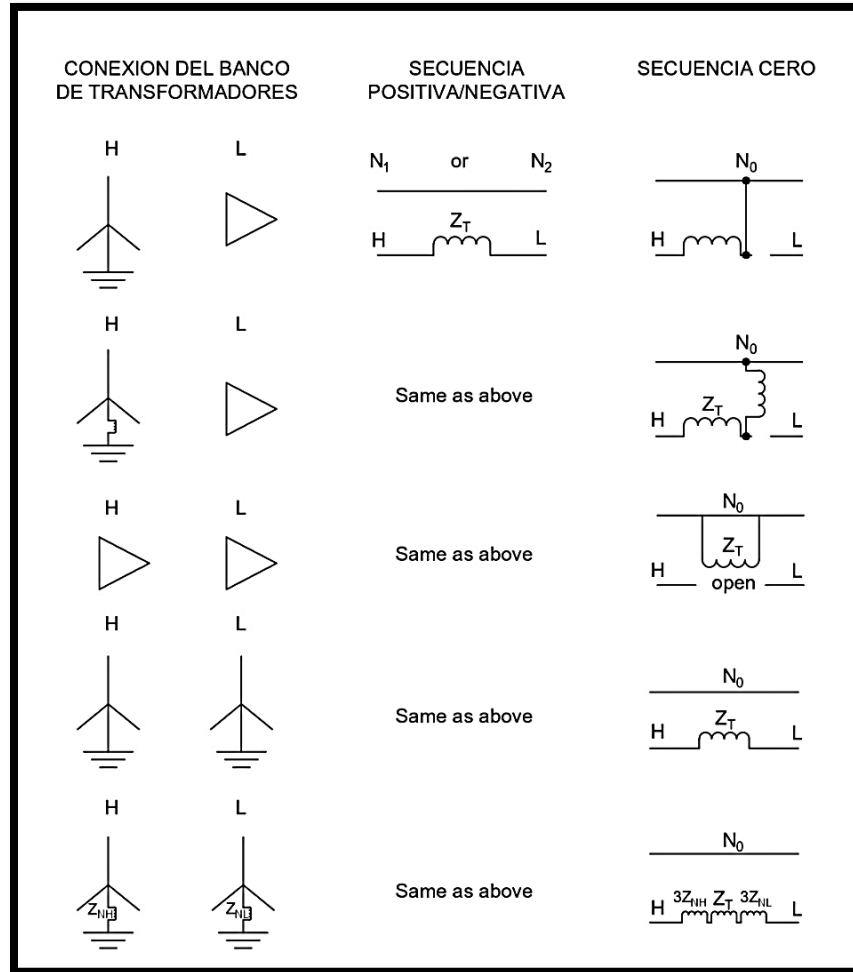


Figura 2.7. Tipos de conexión de banco de transformadores de dos devanados

Fuente: adaptado de [21].

2.4 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Un transformador es una máquina estática de corriente alterna que permite variar alguna función de la corriente como el voltaje o la intensidad, manteniendo la frecuencia y la potencia, en el caso de un transformador ideal. Los transformadores son un elemento clave en el desarrollo de la industria eléctrica. Gracias a ellos se pudo realizar, de una manera práctica y económica, el transporte de energía eléctrica a grandes distancias [23].

Un transformador está constituido por dos circuitos eléctricos acoplados mediante un circuito magnético. El funcionamiento del transformador se basa en la Ley de inducción de Faraday, de manera que un circuito eléctrico influye sobre el otro a través del flujo generado en el circuito magnético [24].

2.4.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Dado que la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica se realizan predominantemente en sistemas trifásicos, se desarrollaron transformadores diseñados para operar bajo este tipo de configuración. Estos equipos permiten adecuar los niveles de tensión entre distintas etapas del sistema eléctrico de potencia de manera eficiente y confiable.

Los transformadores trifásicos pueden construirse como una unidad trifásica con tres devanados montados sobre un núcleo magnético común como se muestra en la figura 2.8. Esta alternativa es, en general, la más utilizada, ya que permite obtener equipos de menor tamaño y peso, con menor consumo de material, menor costo y una eficiencia global ligeramente superior [25].

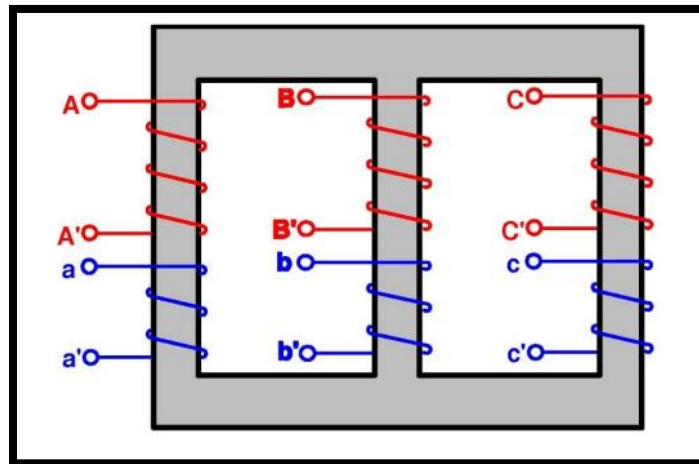


Figura 2.8. Transformador trifásico de 3 columnas

Fuente: [26].

Los transformadores trifásicos pueden construirse también, como se muestra en la figura 2.9 mediante la asociación de tres transformadores monofásicos.

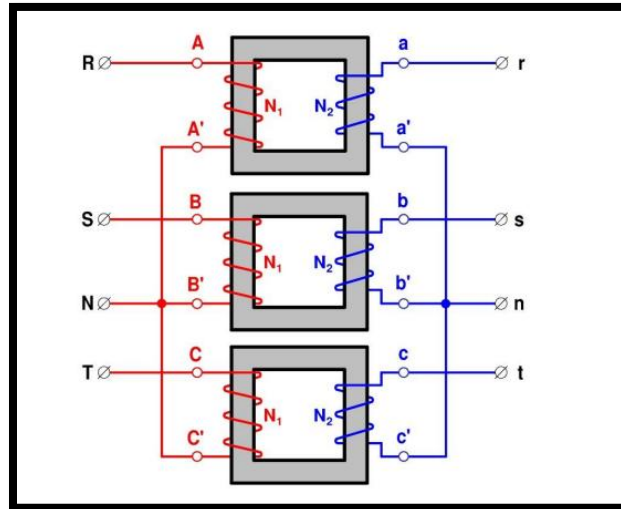


Figura 2.9. Banco de tres transformadores monofásicos YNy

Fuente: [26].

2.4.2 CONEXIONES EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Las conexiones de los devanados en los transformadores trifásicos influyen directamente en su comportamiento frente a fallas, especialmente ante fallas monofásicas a tierra y la circulación de componentes de secuencia cero. Las configuraciones más comunes son estrella (Y), delta (Δ) y zigzag (Z), cada una con características particulares en cuanto a la disponibilidad de neutro, la propagación de corrientes de secuencia cero y el comportamiento ante desbalances [27].

La conexión en estrella, como se observa en la figura 2.10 permite disponer de un neutro para la puesta a tierra y la operación de esquemas de protección.

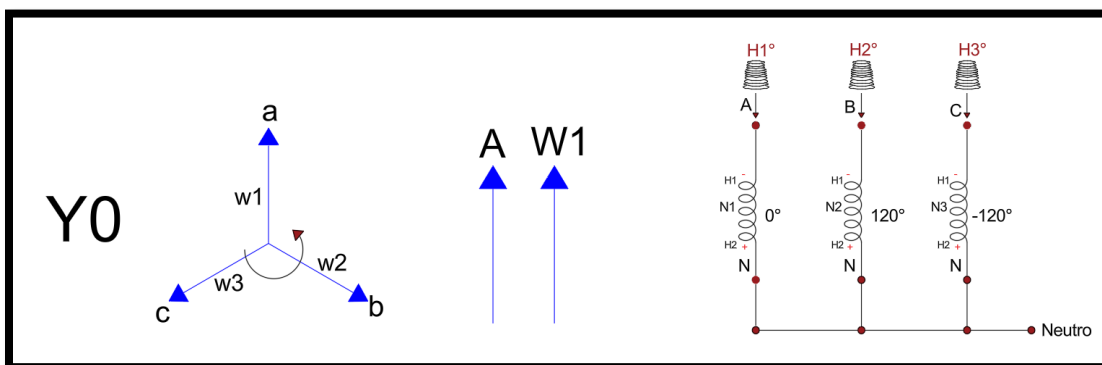


Figura 2.10. Conexión de bobinados en estrella Y0

Fuente: adaptado de [29].

La conexión en delta, que se muestra en la figura 2.11 permite la circulación interna de corrientes de secuencia cero, estabilizando las tensiones de fase; no obstante, dicha componente no se transfiere hacia el otro lado del transformador, ya que queda confinada dentro del devanado en delta.

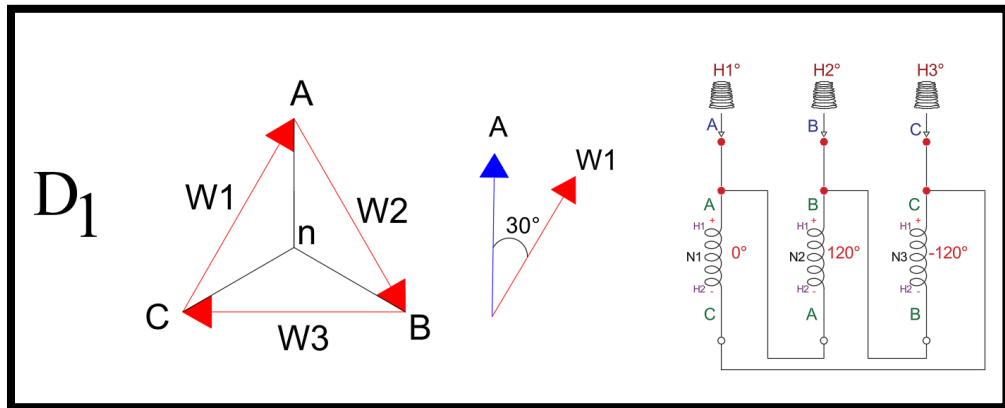


Figura 2.11. Conexión de bobinados en delta D_1

Fuente: adaptado de [29].

Por su parte, la conexión en zigzag de la figura 2.12 proporciona un neutro eléctricamente estable y una baja impedancia para corrientes de secuencia cero, lo que la hace adecuada para aplicaciones de puesta a tierra y protección en sistemas de distribución [28].

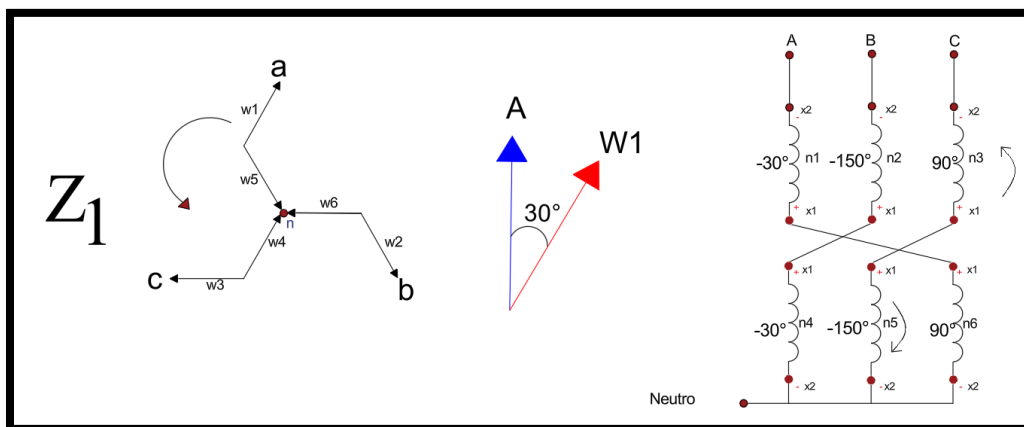


Figura 2.12. Conexión de bobinados en Zig-Zag Z_1

Fuente: adaptado de [29].

2.4.3 GRUPOS VECTORIALES DE CONEXIÓN

El grupo vectorial de un transformador indica el tipo de conexión de los devanados y el desfase angular existente entre las tensiones del primario y del secundario. Este desfase se expresa mediante la notación de reloj, la cual permite identificar de forma estandarizada el desplazamiento de fase entre los sistemas de alta y baja tensión [30].

Este aspecto es de gran importancia porque, si bien el grupo vectorial no altera la magnitud de las corrientes de secuencia, sí modifica las relaciones angulares entre tensiones y corrientes, lo cual resulta relevante en el análisis de corrientes reflejadas, en la correcta interconexión de transformadores en paralelo y en la coordinación de los sistemas de protección [31].

Las configuraciones para los equipos de transformadores de sistema trifásico se identifican mediante descripciones que especifican el tipo de conexión: Y, D o Z para el devanado de alta tensión, y y, d o z para los devanados de media o baja tensión. Cuando un devanado contiene neutro externamente, se añade la letra N en el lado de alto voltaje o n en el lado de bajo voltaje. En el caso de los transformadores auto conectados, el devanado correspondiente al nivel de menor voltaje se representa con la letra a, de auto [32].

Además, debe indicarse el desfase angular que existe en los vectores de tensiones del primario y del secundario. Este ángulo se coloca observando la diferencia de fase entre la tensión línea-neutro del terminal H1 (alta tensión) y la del terminal X1 (baja tensión). El desplazamiento puede variar de 0° a 330° cada 30° , empleando la denominada notación de reloj, donde la posición 1 equivale a 30° , la 2 a 60° , y así sucesivamente [29].

La designación completa del grupo vectorial o fasorial se obtiene combinando el tipo de conexión de los devanados y el desplazamiento angular, y debe indicarse en la placa de características del transformador en la figura 2.13 se puede observar mejor esto. Algunos ejemplos habituales son Dyn1, YNd1 y YNyn+d, entre otros. Esta información resulta esencial para la correcta modelación del transformador en estudios de flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones, así como para garantizar la compatibilidad operativa entre transformadores conectados en un mismo sistema eléctrico [29].

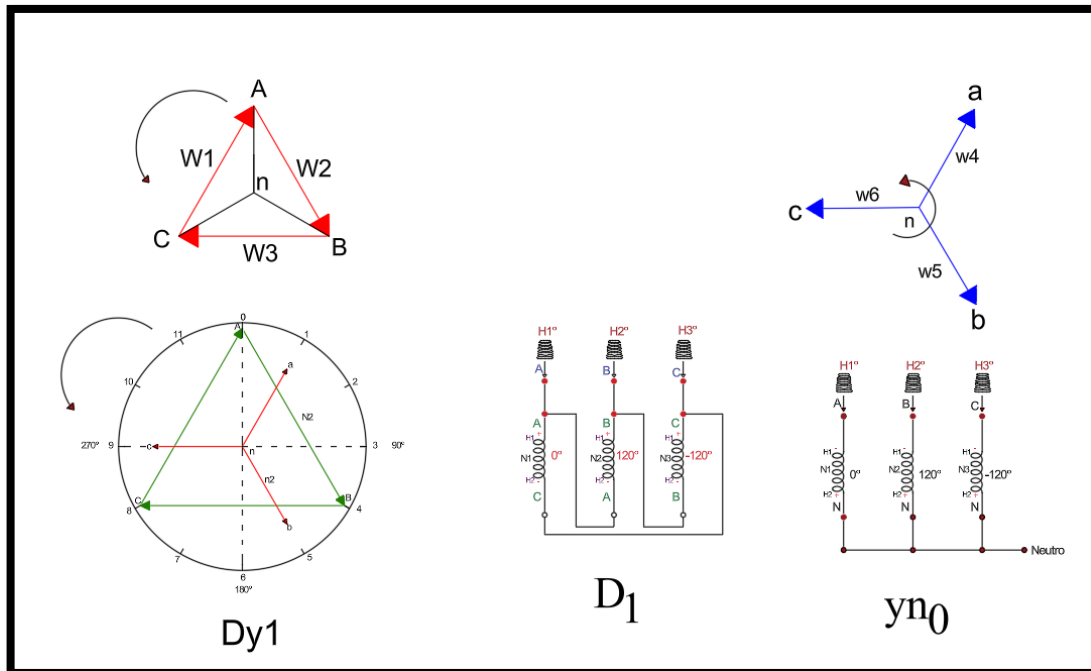


Figura 2.13. *Combinación de configuraciones de bobinados Dy1*

Fuente: adaptado de [29].

2.5 SOFTWARE UTILIZADO

2.5.1 PYTHON

Python es un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado en ingeniería por su capacidad para realizar cálculos numéricos, análisis matricial y modelado matemático. Gracias a sus librerías científicas, Python permite implementar de forma eficiente algoritmos orientados al análisis de sistemas eléctricos de potencia [33].

Python es muy usado en muchos campos. Sirve para crear aplicaciones web, trabajar con datos, hacer cálculos matemáticos e incluso para temas de inteligencia artificial. Lo bueno es que es fácil de entender, funciona bien y se puede usar en distintos sistemas operativos. Además, es libre y de código abierto, así que se integra sin problema en diferentes entornos de trabajo [34].

Python resulta muy útil para resolver problemas técnicos, incluso los que suelen aparecer en áreas de Investigación y Desarrollo. También se usa bastante en proyectos de sistemas embebidos, donde ayuda mucho porque puede automatizar cálculos y procesar datos de forma rápida [35].

2.5.2 ATP DRAW

ATPDraw es una herramienta gráfica basada en el programa Alternative Transients Program (ATP). Este software permite modelar transformadores, líneas y otros equipos eléctricos para estudiar su comportamiento ante condiciones de falla [36].

ATPDraw es una herramienta gráfica que se usa como la parte visual del software ATP dentro del entorno EMTP. Sirve para simular fenómenos transitorios en sistemas eléctricos. Lo bueno es que se maneja casi todo con el cursor, así que uno puede armar los diagramas y las configuraciones de manera visual. Luego, la aplicación genera automáticamente el archivo de entrada compatible con ATP, siguiendo el principio de que lo que ves en pantalla es exactamente lo que obtienes al final [37].

Entre sus ventajas se incluyen la capacidad de trabajar con varios circuitos simultáneamente, copiar elementos entre proyectos y realizar ediciones estándar con facilidad. También permite exportar mediante el portapapeles de Windows y guardar todo el proyecto como un único archivo [38].

CAPITULO III

3 DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO PARA EL CALCULO DE CORRIENTES DE FALLA

En el capítulo III se presenta el procedimiento matemático del modelo utilizado para los cálculos de las corrientes de falla en un transformador trifásico de potencia. Nuestro objetivo principal es establecer, de forma ordenada, los procedimientos teóricos y matemáticos necesarios para analizar distintos tipos de cortocircuito y ver como se ve reflejada en el lado de alta mediante diferentes grupos vectoriales usando el método de componentes simétricas.

3.1 DATOS GENERALES DEL TRANSFORMADOR

El sistema muestra un análisis corresponde a un transformador trifásico de potencia con una capacidad nominal de 30 MVA, voltajes nominales de 69 kV en el lado primario del transformador y 13.8 kV en el lado secundario del transformador, y una impedancia de cortocircuito del 12.5 %. En este sistema el transformador tiene una resistencia de puesta a tierra de 2 ohm ($R_g = 2 \Omega$). El transformador tiene una configuración de conexión del tipo Delta–Estrella en el lado de baja tensión, expresándolo grupo vectorial Dyn1.

Este grupo de conexión es muy utilizado en sistemas eléctricos de potencia gracias a su comportamiento favorable frente a fallas a tierra, ya que el devanado en delta permite la circulación interna de corrientes de secuencia cero, limitando su paso hacia el lado de alta tensión.

3.2 DEFINICION Y DESARROLLO BASE DEL SISTEMA

Para el desarrollo del modelo matemático se va a trabajar con el Teorema de Fortescue, ya que es uno de los métodos más fiable y preciso para poder encontrar la corriente de falla en el lado de baja y reflejada en el lado de alta. Primeramente, antes de sacar las fallas se va a necesitar la impedancia bases del sistema.

La impedancia base del sistema en el lado estrella se calcula a partir de la expresión de la ecuación 1 como se muestra:

$$Z. base. 13.8KV (Estrella) = \frac{V. fase^2}{S_{nom.} 1f} = \frac{V. ff^2}{S_{nom.} 3f}$$

Ecuación 1 Relación de Impedancia Base para el lado en Estrella (Y).

Donde el voltaje de fase es igual a el voltaje de fase-fase en el lado de Estrella sobre la $\sqrt{3}$ y nuestra Potencia nominal base es la capacidad que tiene el transformador. La expresión de la fórmula quedaría:

$$Z. base. 13.8KV (Estrella) = \frac{\left(\frac{13.8KV}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{30MVA}{3}} = \frac{7967.43^2}{10 \cdot 10^6 VA} = 6.34 \Omega$$

Para calcular la impedancia base en el lado de delta, la fórmula sería:

$$Z. base. 13.8KV (Delta) = 3 \cdot Z. base. 13.8KV (Estrella)$$

Ecuación 2 Relación de Impedancia Base para el lado en Delta (Δ).

Como se muestra en la fórmula, para sacar la impedancia base en el lado delta, se dice que es simplemente tres veces la impedancia en el lado estrella. La expresión de la fórmula de la impedancia base delta quedaría:

$$Z. base. 13.8KV (Delta) = \frac{V. ff^2}{S_{nom.} 1f} = 3 \cdot 6.34 \Omega = 19.02 \Omega$$

Y finalmente para sacar la corriente de base de nuestro sistema, nuestra expresión sería:

$$I. Base = \frac{S. nom}{\sqrt{3} \cdot Vff}$$

Ecuación 3 Corriente base en el lado de estrella (Y).

La corriente base del sistema en el lado estrella quedaría:

$$I. Base_{LV} = \frac{30 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 1255.1 A$$

Los valores bases expresados permiten mostrar las impedancias y corrientes del transformador trifásico de potencia en términos relativos, lo cual facilita el análisis de fallas mediante el método de las componentes simétricas.

3.3 ESTABLECIMIENTO DE LOS DATOS ELECTRICOS DEL TRANSFORMADOR

Se inicia con la impedancia de cortocircuito que da el fabricante, se obtiene la impedancia total del transformador referida al lado de baja tensión. Esta impedancia representa la resistencia total del transformador al paso de corriente durante una condición de falla.

La impedancia de cortocircuito en ohmios se determina multiplicando el valor en por unidad por la impedancia base del sistema como se muestra en la ecuación 4:

$$Z. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = Z. base. Estrella \cdot Zcc. pu$$

Ecuación 4 Impedancia de Cortocircuito Real en el lado estrella (Y).

En condiciones normales de operación, esta impedancia se descompone en una parte resistiva y una parte reactiva, las cuales se relacionan con las pérdidas en cortocircuito y la reactancia de dispersión del transformador, respectivamente. Remplazando los valores en la ecuación 4 nuestra impedancia de cortocircuito quedaría:

$$Z. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = 6.34 \cdot 0.125 = 0.7925 \Omega$$

Entonces se asimila que la impedancia de la secuencia positiva, negativa y polar son lo mismo.

$$Z_{cc} (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = 0.7925 \Omega = Z1 = Z2 = Z0$$

Aunque la $Z0$ puede ser diferente de ($Z1$ --- $Z2$) ---- [Fabricante]

Para sacar la parte resistiva y la parte reactiva de la impedancia de cortocircuito real con referencia en el lado de 13.8KV.

Se necesita saber nuestra resistencia de cortocircuito (R_{cc}). En este caso los datos que nos brinda el fabricante del transformador no está el valor R_{cc} .

Entonces tendríamos que hallarlo, ya que es algo importante porque nos ayuda a sacar los valores de la Resistividad e Inductividad del transformador. Y esos valores nos ayuda a modelar el circuito y simularlo en el Software ATPDraw.

3.4 IMPEDANCIA REAL DEL TRANSFORMADOR A PARTIR DE LA RESISTENCIA DE CORTOCIRCUITO

Como se muestra en nuestros Datos del Fabricante se da la Potencia Perdidas a vacío (P_0) y la Potencia Pérdidas totales (P_{tot})

$$P_0 = \text{Pérdidas a vacío (kW)} = 22 \text{ KW}$$

$$P_{tot} = \text{Pérdidas totales (kW)} = 230 \text{ KW}$$

Para hallar el R_{cc} se necesita la potencia de cortocircuito (P_{cc}). Como en los datos del fabricante no nos dan la P_{cc} , pero si nos dan la perdida a vacío (P_0) y las pérdidas totales.

Entonces la ecuación 5 para hallar la potencia de cortocircuito se expresaría de la siguiente manera:

$$P_{tot} = P_0 + P_{cc}$$

Ecuación 5 Pérdidas totales de potencia.

$$P_{cc} = P_{tot} - P_0 = 230 - 22 = 208 \text{ KW}$$

$$P_{cc} = 208 \text{ KW}$$

3.4.1 HALLAR EL VALOR DE RESISTENCIA DE CORTOCIRCUITO

Una vez que se halla la Pcc, se podrá sacar el valor Rcc del sistema. Para eso se utiliza la siguiente ecuación 6 que se expresaría:

$$P_{cc} = 3 \cdot R_{cc} \cdot I_{cc}^2$$

Ecuación 6 Pérdidas en el Cobre Trifásicas.

Despejando la variable Rcc:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^2} = \frac{208000}{3 \cdot 1255.10^2} = 0.044 \Omega$$

Se transforma el valor Rcc a por unidad:

$$R_{cc_{pu}} = \frac{R_{cc_{Real}}}{Z_{base13.8KV}} = \frac{0.044}{6.34} = 0.0069 \text{ pu}$$

Y luego se transforma a valor en porcentaje:

$$R_{cc}(\%) = R_{cc_{pu}} \cdot 100\% = 0.0069 \cdot 100\% = 0.69\%$$

$$\mathbf{R_{cc}(\%) = 0.69\%}$$

Ahora que ya se tiene el valor Rcc se puede hallar no solamente la parte resistiva e inductiva, si no que tambien la parte de la reactancia del transformador para poder tener el valor complejo de la impedancia.

Lo primero que se hace es transformar el Rcc de porcentaje (%) a valor real en ohm. Para ello se va a usar la ecuación 7:

$$R. cc (\Omega). LV (f. Estrella) = \left(\frac{R_{cc}(\%)}{100} \right) \cdot Z. base. 13.8KV (Estrella)$$

Ecuación 7 Resistencia de cortocircuito en el lado de baja tensión.

Remplazando los valores, la expresión quedaría:

$$R. cc (\Omega). LV (f. Estrella) = \left(\frac{0.69}{100} \right) \cdot 6.34 = 0.0437 \Omega$$

3.4.2 HALLAR LAS REACTANCIAS DEL TRANSFORMADOR

Para hallar la reactancia de cortocircuito en porcentaje en el lado estrella se aplica la ecuación 8:

$$X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \%$$

Ecuación 8 Precisión del componente reactivo de la impedancia.

Remplazando los valores, se obtiene la reactancia de cortocircuito en porcentaje:

$$Ecuacion_{10} \rightarrow X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \sqrt{12.5^2 - 0.69^2} = 12.48 \%$$

Para pasarlo a valor real, se utiliza la ecuación 9:

$$X. cc (\Omega). LV (f. Estrella) = \left(\frac{X_{cc}(\%)}{100} \right) \cdot Z. base. LV (Estrella)$$

Ecuación 9 Reactancia de cortocircuito real(Y).

Remplazando los valores en la ecuación 9, la reactancia en valor real sería:

$$X_{cc}(\Omega).LV(f.Estrella) = \left(\frac{12.48}{100}\right) \cdot 6.34 = 0.791 \Omega$$

Para este caso de estudio vamos a asimilar que la impedancia de secuencia positiva, negativa y cero son iguales.

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 = R_{cc}(f.Estrella) + j X_{cc}(f.Estrella)$$

Remplazando los valores obtenidos la impedancia en valor imaginario y magnitud quedaría:

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 = Z_0 &= (0.0437 + j0.791) = 0.7925 \angle 86,81 \Omega \text{ --- [MAGNITUD]} \\ &= Z_{cc}(\Omega).LV(f.Estrella) \end{aligned}$$

$$Z_0: \text{Puede ser Diferente a } (Z_1 \text{ --- } Z_2) \text{ --- [Fabricante]}$$

3.5 MODELO DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO DE POTENCIA MEDIANTE EL METODO DE COMPONENTES SIMETRICAS

Para el análisis de cortocircuitos asimétricas se emplea el método de componentes simétricas, que nos permite descomponer un sistema trifásico desequilibrado en tres sistemas equilibrados como: secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero.

Para el caso de transformador trifásico de potencia analizado, las impedancias tanto de secuencia positiva y negativa se consideran iguales, eso quiere decir que el sistema es balanceado y no presenta asimetrías importantes. Estas impedancias están directamente relacionadas con la impedancia de fallas del transformador.

La impedancia de secuencia cero o polar, depende de cómo está configurado la parte del devanado en el transformador y de la forma como el neutro se encuentra conectado a tierra. Como por ejemplo en un transformador con conexión Dyn, la corriente de secuencia cero puede circular internamente en la parte delta, lo que cambia el comportamiento de las fallas a tierra y a su vez limita como se ve reflejada estas corrientes hacia el lado de alta tensión.

3.6 FORMULAS PARA OBTENER LAS CORRIENTES DE DISTINTAS FALLAS

3.6.1 CORRIENTES DE FALLA MONOFASICA A TIERRA EN BT (ESTRELLA)

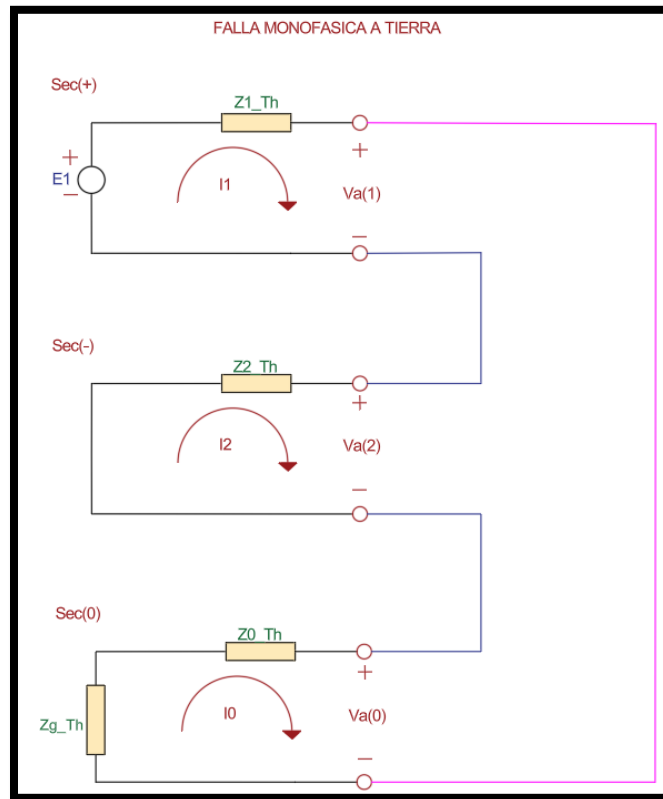


Figura 3.1. Diagrama de secuencias para falla monofásica a tierra

Fuente: Autores

Estirando el circuito de la figura 3.1 nos quedaría así:

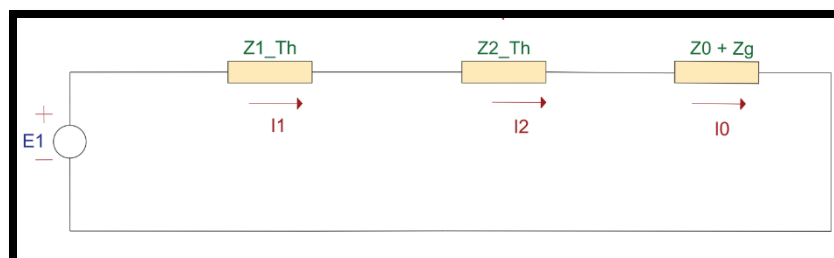


Figura 3.2. Diagrama equivalente de Thevenin para falla monofásica

Fuente: Autores

Aclarado el tema de las impedancias, ahora se va a expresar la ecuación que se va a necesitar para poder obtener la corriente de falla monofásica en el lado de baja.

Para la corriente de falla monofásica en el LV se aplica ley de ohm a el circuito equivalente de Thévenin de la figura 3.2 y nos queda así:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + Z_g}$$

Ecuación 10 Corriente de secuencia positiva en una falla monofásica (Y).

El E_1 es la tensión de fase, Z_1 , Z_2 y Z_0 son las impedancias de secuencia positiva, negativa y polar, y Z_g es la impedancia de puesta a tierra, que en este caso la resistencia de tierra sería de 2 ohm. El factor 3 aparece por la suma de las corrientes de secuencia en el punto de cortocircuito.

$$I. \text{ falla. } 1f. \text{ con : } Rg = 2 \Omega \text{ --- } Zg = 3 \cdot Rg = 6 \Omega$$

$$\text{Impedancia de puesta a tierra del Trafo (LV): } [Z. g = 6 \Omega]$$

Remplazando los valores en la ecuación 10, la corriente de falla monofásica a tierra nos daría:

$$I_1 = \frac{7967.434}{(0.79 \angle 86.81^\circ) + (0.79 \angle 86.81^\circ) + (0.79 \angle 86.81^\circ) + 6} \text{ A. rms. Sim}$$

$$I_1 = 1211.94 \angle -21.13^\circ$$

$$I_1 = I_2 = I_0$$

Para una falla monofásica se entiende que la corriente de dos fases es cero y que solo pasa la corriente en una sola fase. Para encontrar la corriente que pasa en dicha fase se aplicara el Teorema de Fortescue.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación 11 Teorema de Fortescue.

Las corrientes de falla en cada fase serían:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2$$

$$\begin{aligned} I_a &= (1211.94 \angle -21.13^\circ) + (1211.94 \angle -21.13^\circ) + (1211.94 \angle -21.13^\circ) \\ &= 3635.848 \angle -21.13 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_b = I_0 + a^2 \cdot I_1 + (a \cdot I_2) = 0$$

$$I_c = I_0 + a \cdot I_1 + (a^2 \cdot I_2) = 0$$

3.6.1.1 FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA MONOFASICA

Se determina el factor para pasar de baja tensión hacia alta tensión:

$$k = \frac{13800}{69000} \cdot e^{\pm j\theta_g}$$

Ecuación 17 Determinación de la Relación de Transformación, factor K

$$\theta_g = 30^\circ \cdot \text{grupo vectorial}$$

$$\theta_g = 30^\circ \cdot 1$$

Al reflejar en delta de alta tensión (no pasa la componente 0).

Corrientes de fase internas de delta

$$I_{ab} = k(I_1 + I_2)$$

$$I_{bc} = k(a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2)$$

$$I_{ca} = k(a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2)$$

Remplazo de valores:

$$I_{ab} = 727.169 \angle 8.87^\circ$$

$$I_{bc} = 0$$

$$I_{ca} = 0$$

Corrientes de líneas externas, la que se puede leer en los bornes:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

Remplazo de valores:

$$I_A = 727.169 \angle 8.87^\circ$$

$$I_B = 727.169 \angle -171.13^\circ$$

$$I_C = 0$$

Al pasar la corriente de línea a corriente de fase equivalente visto desde los bornes en el lado delta para compararlo con ATPDraw, nos queda:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

Ecuación 18 Relación de Corrientes de Fase y Línea en Conexión Delta

$$I_{A, fase} = \frac{727.169 \angle 8.87^\circ}{\sqrt{3}} = 419.83 \angle 8.87^\circ$$

$$I_{B, fase} = \frac{727.169 \angle -171.13^\circ}{\sqrt{3}} = 419.83 \angle -171.13^\circ$$

$$I_{C, fase} = 0$$

“Esto sería para dyn1. El grupo vectorial solo hace que cambie el Angulo de la corriente, y eso se le puede ajustar en la variable k”

3.6.2 CORRIENTES DE FALLA BIFASICA EN BT (ESTRELLA)

Se crea el diagrama de secuencia para una falla bifásica.

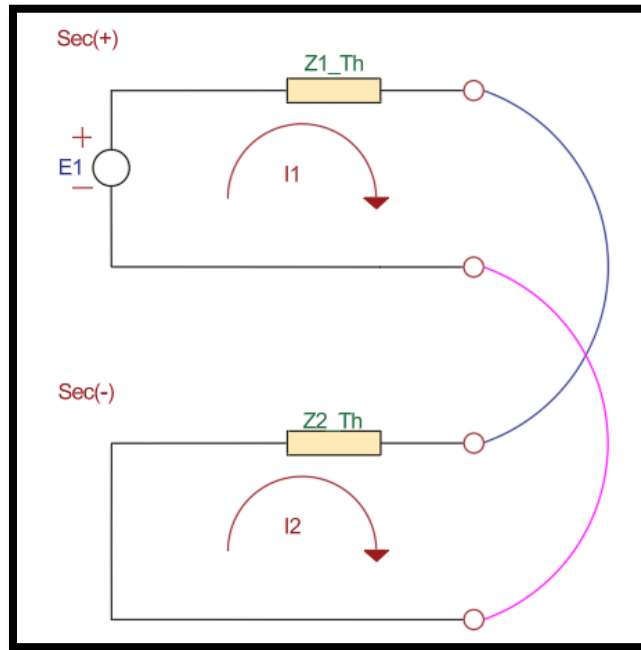


Figura 3.3. Diagrama de secuencia para falla bifásica

Fuente: Autores

Simplificando el circuito de la figura 3.3 a su equivalente de **Thevenin**:

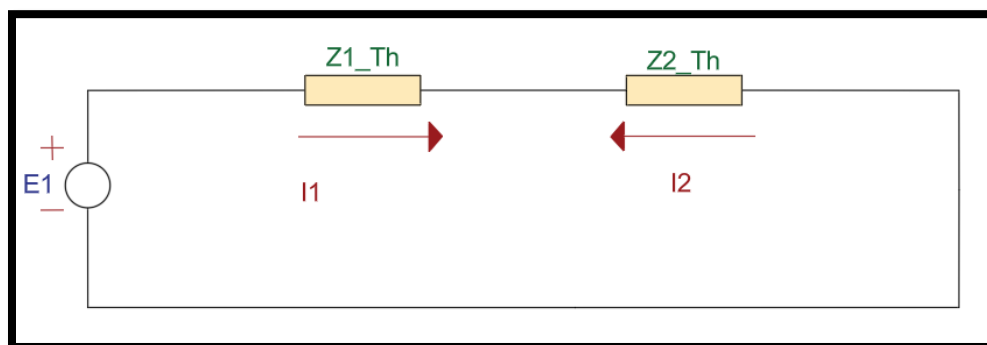


Figura 3.4. Diagrama equivalente de Thevenin para falla bifásica

Fuente: Autores

En este caso no hay la secuencia polar para la falla bifásica, asimilamos que la corriente polar será cero. Y como se observa en la Fig 3.4, las corrientes I_1 y I_2 están en sentido contrario. La expresión matemática quedaría:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2$$

Al aplicar ley de ohm en el circuito equivalente de Thévenin:

$$I_1 = -I_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2}$$

Ecuación 11 Relación de corriente de secuencia positiva y negativa para falla bifásica.

Remplazando los valores en la ecuación 11, se obtiene la corriente de secuencia tanto positiva como negativa:

$$I_1 = -I_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{7967.434}{(0.79 \angle 86.81^\circ) + (0.79 \angle 86.81^\circ)}$$

$$I_0 = 0, \quad I_1 = 5042.679 \angle -86.81^\circ \text{ A}, \quad I_2 = 5042.679 \angle 93.19^\circ \text{ A}$$

Ahora se aplica el teorema de Fortescue para hallar las corrientes de las fases para nuestro sistema eléctrico del transformador:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación 12 Teorema de Fortescue.

Una vez aplicado el teorema de Fortescue, se obtiene los resultados para las tres fases de las corrientes en el lado de estrella:

$$I_a = 0 + I_1 + I_2 = (4 \angle -86.81^\circ) + (4 \angle 93.19^\circ) = 0$$

$$I_b = 0 + a^2 \cdot I_1 + (a \cdot I_2) = (4 \angle 153.19^\circ) + (4 \angle -146.81^\circ) = 8734.17 \angle -176.81^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 0 + a \cdot I_1 + (a^2 \cdot I_2) = (4 \angle 33.19^\circ) + (4 \angle -26.81^\circ) = 8734.176 \angle 3.19 \text{ A}$$

Como se logra apreciar, las magnitudes de las dos fases tanto para b y c son iguales, en conclusión, corriente de falla bifásica quedaría de esta forma:

$$I. \text{ falla. } 2f. LV = |I_b| = |I_c| = 8734.17 A$$

3.6.2.1 FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA BIFASICA

Al reflejar en delta de alta tensión

$$k = \frac{13800}{69000} \cdot e^{\pm j\theta_g}$$

$$\theta_g = 30^\circ \cdot \text{grupo vectorial}$$

$$\theta_g = 30^\circ \cdot 1$$

Corrientes de fase internas de delta:

$$I_{ab} = k(I_1 + I_2)$$

$$I_{bc} = k(a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2)$$

$$I_{ca} = k(a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2)$$

Reemplazo de valores:

$$I_{ab} = 0$$

$$I_{bc} = 1746.834 \angle -146.81^\circ$$

$$I_{ca} = 1746.834 \angle 33.19^\circ$$

Corrientes de líneas externas, la que se puede leer en los bornes:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

Reemplazo de valores:

$$I_A = 1746.834 \angle 33.19^\circ$$

$$I_B = 1746.834 \angle -146.81^\circ$$

$$I_C = 3493.668 \angle -146.81^\circ$$

Al pasar la corriente de línea a corriente de fase equivalente visto desde los bornes en el lado delta para compararlo con ATPDraw, nos queda:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_{AB} = \frac{1746.834 \angle 33.19^\circ}{\sqrt{3}} = 1008.5350 \angle 33.19^\circ$$

$$I_{BC} = \frac{1746.834 \angle -146.81^\circ}{\sqrt{3}} = 1008.5350 \angle -146.81^\circ$$

$$I_{CA} = \frac{3493.668 \angle -146.81^\circ}{\sqrt{3}} = 2017.07 \angle -146.81^\circ$$

3.6.3 CORRIENTES DE FALLA BIFASICA A TIERRA EN BT (ESTRELLA)

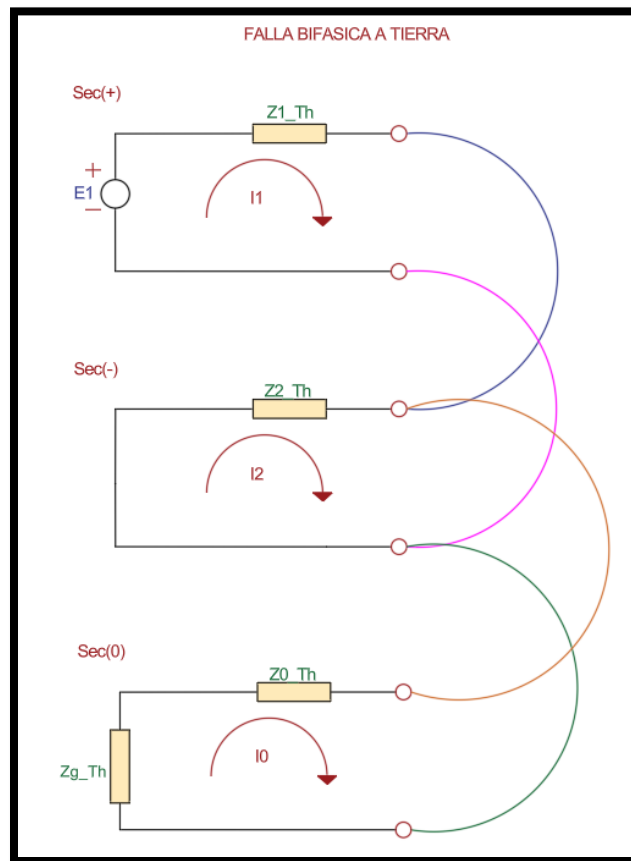


Figura 3.5. Diagrama de secuencia para falla bifásica a tierra

Fuente: Autores

Estirando el circuito de la figura 3.5 nos queda:

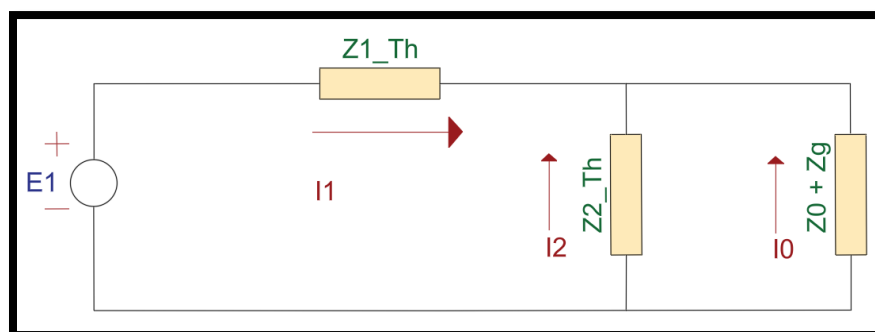


Figura 3.6. Diagrama equivalente de Thevenin para falla bifásica a tierra

Fuente: Autores

Como se logra apreciar en el diagrama equivalente de Thevenin de la figura 3.6, el circuito está conectado en paralelo en la secuencia negativo y cero. Pero la secuencia cero a su vez está en serie con la impedancia de la resistencia a tierra. Y todo eso está en el inicio con serie de la secuencia positiva.

Por lo tanto, la ecuación para sacar la corriente de la secuencia positiva sería:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot (Z_0 + Z_g)}{Z_2 + Z_0 + Z_g}}$$

Ecuación 13 Corriente de secuencia positiva para falla bifásica a tierra.

Remplazando los valores de la ecuación 13, tenemos nuestra corriente de secuencia positiva para la falla bifásica a tierra:

$$I_1 = \frac{\frac{13800}{\sqrt{3}}}{(0.7925 \angle 86,81) + \frac{(0.7925 \angle 86,81) \cdot (0.7925 \angle 86,81 + 6)}{(0.7925 \angle 86,81) + (0.7925 \angle 86,81) + 6}} = 5117,16 \angle - 83.309 \text{ A}$$

Para hallar la I_2 y la I_0 usamos el divisor de corriente con referencia al Diagrama equivalente de Thevenin de la Fig 3.6.

$$I_2 = -I_1 * \frac{Z_0 + Z_g}{Z_2 + Z_0 + Z_g}$$

Ecuación 15. Divisor de Corriente para I_2

$$I_0 = -I_1 * \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + Z_g}$$

Ecuación 16. Divisor de Corriente para I_0 .

Remplazando los valores en la ecuación 15:

$$I_2 = 4958.58 \angle 89.5741$$

$$I_0 = 644.2696 \angle 168.93$$

Ahora se aplica el teorema de Fortescue para hallar las corrientes de las fases para nuestro sistema eléctrico del transformador:

Teorema de Fortescue (S-F)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones para cada fase nos quedan:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2$$

$$I_b = I_0 + (a^2 \cdot I_1) + (a \cdot I_2)$$

$$I_c = I_0 + (a \cdot I_1) + (a^2 \cdot I_2)$$

Obtenemos las corrientes de falla para cada fase:

$$I_a = (644.2696 \angle 168.93) + (4958.58 \angle 89.5741) + (5117.16 \angle -83.309) = 0$$

$$\begin{aligned} I_b &= (644.2696 \angle 168.93) + (5117.16 \angle 156.69) + (4958.58 \angle -150.426) \\ &= 9648.99 \angle -178.225 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c &= (644.2696 \angle 168.93) + (5117.16 \angle 36.691) + (4958.58 \angle -30.726) \\ &= 7775.645 \angle 4.9435 \text{ A} \end{aligned}$$

En conclusión, los resultados de las corrientes de falla bifásica a tierra quedarían de la siguiente forma:

$$I. \text{ falla. } 2fG.LV = (I_b = 9648.99 \angle -178.225 \text{ A}) ; (I_c = 7775.645 \angle 4.9435 \text{ A})$$

3.6.3.1 FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA BIFASICA A TIERRA

Al reflejar en delta de alta tensión:

$$k = \frac{13800}{69000} \cdot e^{\pm j\theta_g}$$

$$\theta_g = 30^\circ \cdot \text{grupo vectorial}$$

$$\theta_g = 30^\circ \cdot 1$$

Corrientes de fase internas de delta:

$$I_{ab} = k(I_1 + I_2)$$

$$I_{bc} = k(a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2)$$

$$I_{ca} = k(a \cdot I_1 + a^2 \cdot I_2)$$

Reemplazo de valores:

$$I_{ab} = 129.017 \angle -11.07$$

$$I_{bc} = 1804.3967 \angle -177.3158$$

$$I_{ca} = 1679.359 \angle 3.7307$$

Corrientes de líneas externas, la que se puede leer en los bornes:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

Reemplazo de valores:

$$I_A = 1554.97 \angle -175.05$$

$$I_B = 1929.957 \angle -178.23$$

$$I_C = 3483.61 \angle 3.188$$

Al pasar la corriente de línea a corriente de fase equivalente visto desde los bornes en el lado delta para compararlo con ATPDraw, nos queda:

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_{AB} = \frac{1554.97 \angle -175.05}{\sqrt{3}} = 897.76 \angle -175.05$$

$$I_{BC} = \frac{1929.957 \angle -178.23}{\sqrt{3}} = 1114.26 \angle -178.23$$

$$I_{CA} = \frac{3483.61 \angle 3.188}{\sqrt{3}} = 2011.26 \angle 3.188$$

3.6.4 PARA EL CASO DE FALLA TRIFASICA

Diseño de **diagrama de secuencia** para una falla trifásica.

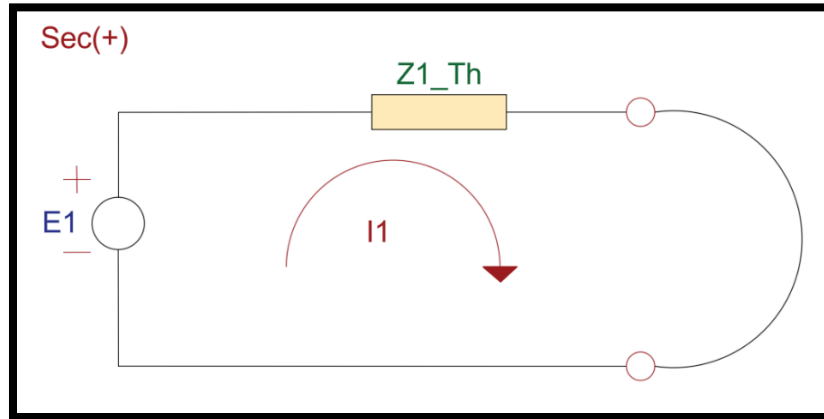


Figura 3.7. Diagrama equivalente de Thevenin para falla trifásica

Fuente: Autores

Como se logra apreciar en el diagrama de secuencia de falla trifásica de la figura 3.7, tenemos un circuito simétrico. Cuando hay una falla trifásica o trifásica a tierra interviene solo la secuencia positiva en el diagrama de secuencia. Entonces la corriente de la secuencia positiva y negativa quedaría de la siguiente forma:

$$I_2 = I_0 = 0$$

La falla trifásica es la que produce una mayor magnitud que otros tipos de fallas, por lo tanto, se utiliza normalmente como referencia para el dimensionamiento de equipos eléctricos.

El diagrama de secuencia para falla trifásica es un circuito sencillo. se aplica la Ley de ohm al circuito equivalente de Thévenin y obtenemos corriente en la secuencia positiva.

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1Th}$$

Ecuación 17 Corriente de secuencia positiva para falla trifásica

Remplazando los valores y calculando, la corriente de la secuencia positiva es:

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1 Th} = \frac{V_{pf}}{Z_1 Th} = \frac{1 \angle 0^\circ pu}{0.125 \angle 90^\circ pu} = 8 \angle -86.81^\circ pu$$

Una vez obtenido la corriente de secuencia positivo, se aplicará el Teorema de Fortescue para calcular la corriente de las fases.

Teorema de Fortescue (S-F)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Considerando que $I_2 = I_0 = 0$

Resolviendo la matriz:

$$I_a = I_1 = 8 \angle -86.81^\circ pu$$

$$I_b = a^2 \cdot I_1 = 8 \angle 153.19^\circ pu$$

$$I_c = a \cdot I_1 = 8 \angle 33.19^\circ pu$$

Como se aprecia en la resolución de la matriz de Fortescue, las magnitudes tanto para la fase a, b y c son iguales.

$$|I_a| = |I_b| = |I_c|$$

Ahora que ya tenemos nuestras corrientes de falla de cada fase en por unidad (pu), las vamos a convertir en valores reales:

$$I_{f_{BT}} = I_{Base_{BT}} \cdot I_a = 1255,10 \cdot 8 \angle -86.81^\circ = 10040,8 \angle -86.81^\circ A$$

$$I_{f_{BT}} = I_{Base_{BT}} \cdot I_b = 1255,10 \cdot 8 \angle 153.19^\circ = 10040,8 \angle 153.19^\circ A$$

$$I_{f_{BT}} = I_{Base_{BT}} \cdot I_c = 1255,10 \cdot 8 \angle 33.19^\circ = 10040,8 \angle 33.19^\circ A$$

3.6.4.1 FALLA REFLEJADA EN DELTA (AT) PARA FALLA TRIFASICA

Al reflejarlo en la delta de alta tensión.

$$I_{AB} = k(I_a)$$

$$I_{BC} = k(I_b)$$

$$I_{CA} = k(I_c)$$

Reemplazo de valores:

$$I_{AB} = 2008.16 \angle - 56.81$$

$$I_{BC} = 2008.16 \angle - 176.81$$

$$I_{CA} = 2008.16 \angle 63.19$$

Corrientes de líneas externas, la que se puede leer en los bornes:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}$$

$$I_B = I_{bc} - I_{ab}$$

$$I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

Reemplazo de valores:

$$I_A = 2008.16 \angle - 86.81^\circ A$$

$$I_B = 2008.16 \angle 153.19^\circ A$$

$$I_C = 2008.16 \angle 33.19^\circ A$$

Al pasar la corriente de línea a corriente de fase equivalente visto desde los bornes en el lado delta para compararlo con ATPDraw, nos queda:

$$I_{f_{AT}}^{(A, fase)} = 2008 \angle - 86.81^\circ A$$

$$I_{f_{AT}}^{(B, fase)} = 2008 \angle 153.19^\circ A$$

$$I_{f_{AT}}^{(C, fase)} = 2008 \angle 33.19^\circ A$$

3.7 CONCLUSION FINAL SOBRE EL MODELO MATEMATICO

En este capítulo el desarrollo modelado permite analizar de manera precisa las corrientes de falla en un transformador trifásico de potencia, considerando el tipo de falla así como el grupo vectorial de conexión que está configurado en el transformador. Las fórmulas presentadas establecen una base sólida para la implementación computacional y la validación mediante herramientas de simulación.

En todo caso, el modelo facilita la comparación del comportamiento de las corrientes reflejadas para distintos grupos vectoriales conectadas en el transformador trifásico, tema central del presente trabajo de titulación.

CAPITULO IV

4 METODOLOGIA Y DESARROLLO DEL MODELO COMPUTACIONAL

4.1 ENFOQUE METODOLOGICO

El trabajo se desarrolla principalmente bajo un enfoque analítico y computacional, debido a que se fundamenta en modelos matemáticos y en el uso de las herramientas de simulación para el análisis de fallas eléctricas en sistemas de potencia. No se realiza ninguna implementación física de equipos, nuestro estudio se centra en el análisis teórico y en la confirmación de resultados mediante programación.

El proceso para resolver los distintos tipos de fallas en el sistema eléctrico de potencia en el transformador se ha implementado uno de los métodos más importante y fiable, que es el Teorema de Fortescue. Que se centra en aplicar el método de componentes simétricas y después implementar formulas en un Software computacional utilizando el lenguaje de programación Python. Este proceso permite analizar de manera clara el comportamiento de las corrientes de falla y su comportamiento en transformadores de potencia con diferentes grupos vectoriales.

4.2 PYTHON PARA CORRIENTES DE FALLA

Para la implementación del modelo computacional se usó el lenguaje de programación Python, gracias a su facilidad y flexibilidad para el manejo de números complejos y su gran capacidad de herramientas en aplicaciones de ingeniería eléctrica. Se empleó la librería NumPy, la cual permite realizar operaciones matriciales y cálculos fasoriales de manera eficiente.

El programa fue calculado de forma ordenado, apartando la definición de los datos, el cálculo de las impedancias, la obtención de corrientes de secuencia y las corrientes reflejadas en el lado de alta tensión del transformador.

4.3 PARAMETROS Y DESCRIPCIONES DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA BAJO ESTUDIO

El sistema que se ha analizado de un transformador trifásico de potencia los datos principales que nos dan el fabricante son:

- Potencia nominal: 30 MVA
- Voltaje en el lado de alta (AT): 69 KV
- Voltaje en el lado de baja (BT): 13.8 KV
- Tipo de conexión: Delta - Estrella con neutro (Dyn)
- La impedancia de cortocircuito Z_{cc} : 12.5%
- Resistencia de puesta a tierra (R_g): 2 Ω
- R_{cc} : 0.69% → Valor hallado mediante los parámetros del fabricante

Para el análisis se considera que el transformador trifásico de potencia trabaja en condiciones normales previamente a la falla y que la impedancia de cortocircuito representa de forma adecuada las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero del sistema que se trabaja. Estas impedancias son impensables para aplicar el método de las componentes simétricas.

Estos parámetros se utilizan como base principal para el cálculo de las corrientes de falla y son definidos al principio en el código Python de la siguiente manera:

```
S_MVA = 30
V_LV = 13.8e3
V_HV = 69e3
Zcc_pu = 0.125
Rg = 2.0
grupo = 5      # Dyn1
f = 60
```

4.4 VALORES BASE E IMPEDANCIA

Los valores base utilizados se obtienen mediante los datos picos del transformador trifásico de potencia. Para asegurar que los cálculos sean lo más precisos posibles, el modelo computacional utiliza el sistema por unidad. Las bases de impedancia y corriente en el lado de baja tensión se calculan mediante las expresiones como se ha hecho en el capítulo III:

$$I.nom_{base13.8KV} = \frac{S.nom}{\sqrt{3} \cdot VLL_{baseLV}}$$

$$Z.base.13.8KV (Estrella) = \frac{V.fase^2}{Snom.1f} = \frac{V.ff^2}{Snom.3f}$$

Estas fórmulas se expresan en Python de la siguiente forma:

```
Zbase_LV = (V_LV/np.sqrt(3))**2 / (S_MVA*1e6/3)
Ibase_LV = S_MVA*1e6 / (np.sqrt(3)*V_LV)
Vf = V_LV / np.sqrt(3)
```

4.5 IMPEDANCIA DE SECUENCIA

Comenzando desde los datos de las pérdidas y de la impedancia de cortocircuito, se calcula la resistencia y reactancia total del transformador. Se dice que las impedancias son las mismas para las secuencias positivas y negativas, pero el tipo de conexión del transformador y la barrera de entrada en el suelo tienen un impacto en la secuencia cero. El modelo considera claramente la influencia del devanado en el lado delta, el cual bloquea la circulación de corrientes de secuencia cero hacia el lado de alta tensión.

En el código, las impedancias se determinan como números complejos, lo que facilita la aplicación fasorial:

```
Z1 = Z2 = Z0 = Rcc + 1j * Xcc
Zg = 3 * Rg
```

4.6 METODO DE COMPONENTES SIMETRICAS EN PYTHON

La secuencia positiva representa el estado normal de la operación del sistema de potencia, mientras que la secuencia negativa aparece cuando existe un desequilibrio entre fases. Y en la secuencia cero representa las corrientes que circulan por el neutro o por tierra, y su presencia depende directamente de cómo está configurado el transformador.

Para la conversión entre corrientes de secuencia y corrientes de fase, se utiliza la matriz de transformación de Fortescue. Este método ayuda a obtener las corrientes de fase desde las componentes de secuencia calculadas para cada tipo de falla analizada.

Teorema de Fortescue

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

En Python, esta relación se añade mediante las operaciones matriciales:

```
def polar(I):
    return abs(I), np.degrees(np.angle(I))

def reflejar_delta(I1, I2):
    Iab = k * (I1 + I2)
    Ibc = k * (a**2 * I1 + a * I2)
    Ica = k * (a * I1 + a**2 * I2)

    IA = Iab - Ica
    IB = Ibc - Iab
    IC = Ica - Ibc

    return IA, IB, IC
```

4.7 CORRIENTES REFLEJADAS EN EL LADO DE ALTA TENSION

Uno de los apartados más relevantes del estudio es la forma como las corrientes de falla se reflejan en el lado de alta tensión, dependiendo del grupo conexión del transformador. Para este objetivo, se define un factor de reflexión que implementa tanto la relación de tensiones como el desfase angular característico de cada grupo Dyn.

El ángulo de desfase se define como:

$$\theta = 30^\circ \cdot grupo$$

Y se añade al modelo mediante un factor complejo:

$$k = (V_{LV} / V_{HV}) * np.exp(1j * \theta)$$

4.8 APLICACIÓN DE LOS DISTINTOS CASOS DE FALLAS

El programa mira los principales tipos de fallas estudiados en el capítulo anterior:

- Falla monofásica a tierra
- Falla bifásica
- Falla bifásica a tierra
- Falla trifásica

Cada tipo de falla se añade en un bloque independiente, usando las expresiones matemáticas anteriormente desarrolladas. Por ejemplo, en el caso de la falla bifásica, se cumple que la corriente de secuencia cero es nula y las corrientes de secuencia positiva y negativa son iguales en magnitud y opuestas en ángulo:

$$I1_{2f} = V_f / (Z1 + Z2)$$

$$I2_{2f} = -I1_{2f}$$

$$I0_{2f} = 0$$

4.9 CODIGO PYTHON COMPLETO

```
import numpy as np

# =====
# DATOS DEL TRANSFORMADOR
# =====
S_MVA = 30
V_LV = 13.8e3
V_HV = 69e3
Zcc_pu = 0.125
Rg = 2.0
grupo = 5      # Dyn1
f = 60

# =====
```

```

# CONSTANTES
# =====
a = np.exp(1j * 2*np.pi/3)
A = np.array([
    [1, 1, 1],
    [1, a**2, a],
    [1, a, a**2]
])

# =====
# BASES
# =====
Zbase_LV = (V_LV/np.sqrt(3))**2 / (S_MVA*1e6/3)
Ibase_LV = S_MVA*1e6 / (np.sqrt(3)*V_LV)
Vf = V_LV / np.sqrt(3)

# =====
# IMPEDANCIAS DEL TRAF0
# =====
Zcc = Zbase_LV * Zcc_pu

P0 = 22e3
Ptot = 230e3
Pcc = Ptot - P0

Rcc = Pcc / (3 * Ibase_LV**2)
Xcc = np.sqrt(Zcc**2 - Rcc**2)

Z1 = Z2 = Z0 = Rcc + 1j * Xcc
Zg = 3 * Rg

# =====
# FACTOR DE REFLEJO A DELTA (Dyn)
# =====
theta = np.deg2rad(30 * grupo)
k = (V_LV / V_HV) * np.exp(1j * theta)

# =====
# FUNCIONES AUXILIARES
# =====
def polar(I):
    return abs(I), np.degrees(np.angle(I))

def reflejar_delta(I1, I2):
    Iab = k * (I1 + I2)
    Ibc = k * (a**2 * I1 + a * I2)
    Ica = k * (a * I1 + a**2 * I2)

    IA = Iab - Ica
    IB = Ibc - Iab
    IC = Ica - Ibc

    return IA, IB, IC

# =====

```

```

# 1) FALLA MONOFÁSICA A TIERRA
# =====
I1 = Vf / (Z1 + Z2 + Z0 + Zg)
I2 = I0 = I1

Ia, Ib, Ic = A @ np.array([I0, I1, I2])

IA, IB, IC = reflejar_delta(I1, I2)

IA /= np.sqrt(3)
IB /= np.sqrt(3)
IC /= np.sqrt(3)

# =====
# 2) FALLA BIFÁSICA
# =====
I1_2f = Vf / (Z1 + Z2)
I2_2f = -I1_2f
I0_2f = 0

Ia2, Ib2, Ic2 = A @ np.array([I0_2f, I1_2f, I2_2f])

IA2, IB2, IC2 = reflejar_delta(I1_2f, I2_2f)

IA2 /= np.sqrt(3)
IB2 /= np.sqrt(3)
IC2 /= np.sqrt(3)

# =====
# 3) FALLA BIFÁSICA A TIERRA
# =====
ZT = Z1 + (Z2 * (Z0 + Zg)) / (Z2 + Z0 + Zg)

I1_2fg = Vf / ZT
I2_2fg = -I1_2fg * (Z0 + Zg) / (Z2 + Z0 + Zg)
I0_2fg = -I1_2fg * Z2 / (Z2 + Z0 + Zg)

Ia2g, Ib2g, Ic2g = A @ np.array([I0_2fg, I1_2fg, I2_2fg])

IA2g, IB2g, IC2g = reflejar_delta(I1_2fg, I2_2fg)

IA2g /= np.sqrt(3)
IB2g /= np.sqrt(3)
IC2g /= np.sqrt(3)

# =====
# 4) FALLA TRIFÁSICA
# =====
I1_3f = Vf / Z1

Ia3, Ib3, Ic3 = A @ np.array([0, I1_3f, 0])

IA3, IB3, IC3 = reflejar_delta(I1_3f, 0)

IA3 /= np.sqrt(3)

```

```

IB3 /= np.sqrt(3)
IC3 /= np.sqrt(3)

# =====
# IMPRESIÓN DE RESULTADOS
# =====
def mostrar(nombre, corrientes):
    print(f"\n--- {nombre} ---")
    for k, I in corrientes.items():
        mag, ang = polar(I)
        print(f"{k}: {mag:10.3f} A ∠ {ang:8.2f}°")

mostrar("MONOFÁSICA A TIERRA - LV", {"Ia": Ia, "Ib": Ib, "Ic": Ic})
mostrar("MONOFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE)", {"IA": IA, "IB": IB,
"IC": IC})

mostrar("BIFÁSICA - LV", {"Ia": Ia2, "Ib": Ib2, "Ic": Ic2})
mostrar("BIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE)", {"IA": IA2, "IB": IB2, "IC":
IC2})

mostrar("BIFÁSICA A TIERRA - LV", {"Ia": Ia2g, "Ib": Ib2g, "Ic": Ic2g})
mostrar("BIFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE)", {"IA": IA2g, "IB": IB2g,
"IC": IC2g})

mostrar("TRIFÁSICA - LV", {"Ia": Ia3, "Ib": Ib3, "Ic": Ic3})
mostrar("TRIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE)", {"IA": IA3, "IB": IB3, "IC":
IC3})

```

4.10 DEMOSTRACION DE LOS RESULTADOS ANALIZADOS EN PYTHON

4.8.1 RESULTADOS EN PYTHON PARA DYN1

```

--- MONOFÁSICA A TIERRA - LV ---
Ia:  3634.464 A ∠  -21.19°
Ib:   0.000 A ∠   86.42°
Ic:   0.000 A ∠   90.00°

--- MONOFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---
IA:  419.672 A ∠    8.81°
IB:  419.672 A ∠ -171.19°
IC:   0.000 A ∠    0.00°

--- BIFÁSICA - LV ---
Ia:   0.000 A ∠    0.00°
Ib:  8695.652 A ∠ -176.82°
Ic:  8695.652 A ∠   3.18°

--- BIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---
IA:  1004.087 A ∠ -146.82°
IB:  1004.087 A ∠ -146.82°
IC:  2008.175 A ∠   33.18°

--- BIFÁSICA A TIERRA - LV ---

```

Ia: 0.000 A \angle 180.00°
 Ib: 9635.505 A \angle -178.24°
 Ic: 7762.399 A \angle 4.94°

--- BIFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 896.325 A \angle -145.06°
 IB: 1112.612 A \angle -148.24°
 IC: 2008.175 A \angle 33.18°

--- TRIFÁSICA - LV ---

Ia: 10040.874 A \angle -86.82°
 Ib: 10040.874 A \angle 153.18°
 Ic: 10040.874 A \angle 33.18°

--- TRIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 2008.175 A \angle -86.82°
 IB: 2008.175 A \angle 153.18°
 IC: 2008.175 A \angle 33.18°

4.8.2 RESULTADOS EN PYTHON PARA DYN5

--- MONOFÁSICA A TIERRA - LV ---

Ia: 3634.464 A \angle -21.19°
 Ib: 0.000 A \angle 86.42°
 Ic: 0.000 A \angle 90.00°

--- MONOFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 419.672 A \angle 128.81°
 IB: 419.672 A \angle -51.19°
 IC: 0.000 A \angle 0.00°

--- BIFÁSICA - LV ---

Ia: 0.000 A \angle 0.00°
 Ib: 8695.652 A \angle -176.82°
 Ic: 8695.652 A \angle 3.18°

--- BIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 1004.087 A \angle -26.82°
 IB: 1004.087 A \angle -26.82°
 IC: 2008.175 A \angle 153.18°

--- BIFÁSICA A TIERRA - LV ---

Ia: 0.000 A \angle 180.00°
 Ib: 9635.505 A \angle -178.24°
 Ic: 7762.399 A \angle 4.94°

--- BIFÁSICA A TIERRA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 896.325 A \angle -25.06°
 IB: 1112.612 A \angle -28.24°
 IC: 2008.175 A \angle 153.18°

--- TRIFÁSICA - LV ---

Ia: 10040.874 A \angle -86.82°
 Ib: 10040.874 A \angle 153.18°
 Ic: 10040.874 A \angle 33.18°

--- TRIFÁSICA - AT (FASE EQUIVALENTE) ---

IA: 2008.175 A \angle 33.18°

IB: 2008.175 A \angle -86.82°
 IC: 2008.175 A \angle 153.18°

El Software Python muestra los resultados en forma fasorial, presentando la magnitud y el ángulo de cada corriente tanto en el lado de baja como en el lado de alta tensión. Esto permite una comparación concisa con los resultados obtenidos mediante simulación en ATPDraw y con los cálculos manuales.

La configuración del código facilita la identificación de las diferencias entre los distintos grupos vectoriales, demostrando cómo el desfase y la conexión del transformador actúa en las corrientes reflejadas.

4.11 COMPARACION DE CORRIENTES DE FALLA DE DOS GRUPOS VECTORIALES MEDIANTE LA SIMULACION PYTHON

a) Corrientes del lado de Baja Tensión (LV)

Tipo de falla	Fase	Dyn1 – Magnitud (A)	Dyn1 – Ángulo (°)	Dyn5 – Magnitud (A)	Dyn5 – Ángulo (°)	Diferencia
Monofásica a tierra	la	3634,46	-21,19	3634,46	-21,19	No hay cambio
	lb	0	90	0	90	
	lc	0	90	0	90	
Bifásica	lb	8695,65	-176,82	8695,65	-176,82	No hay cambio
	lc	8695,65	3,18	8695,65	3,18	
Bifásica a Tierra	lb	9635,51	-178,24	9635,51	-178,24	No hay cambio
	lc	7762,4	4,94	7762,4	4,94	
Trifásica	la	10040,87	-86,82	10040,87	-86,82	No hay cambio
	lb	10040,87	153,18	10040,87	153,18	
	lc	10040,87	33,18	10040,87	33,18	

Tabla 4.1. comparación de corrientes falla para transformadores Dyn1 y Dyn5 (LV)

Fuente: Autores

b) Corrientes reflejadas en el lado de Alta Tensión (HV – fase equivalente)

Tipo de falla	Fase	Dyn1 – Magnitud (A)	Dyn1 – Ángulo (°)	Dyn5 – Magnitud (A)	Dyn5 – Ángulo (°)	Diferencia
Monofásica a tierra	IA	419,67	8,81	419,67	128,81	120°
	IB	419,67	-171,19	419,67	-51,19	120°
Bifásica	IA	1004,09	-146,82	1004,09	-26,82	120°
	IB	1004,09	-146,82	1004,09	-26,82	120°
	IC	2008,18	33,18	2008,18	153,18	120°
Bifásica a Tierra	IA	896,33	-145,06	896,33	-25,06	120°
	IB	1112,61	-148,24	1112,61	-28,24	120°
	IC	2008,18	33,18	2008,18	153,18	120°
Trifásica	IA	2008,18	-86,82	2008,18	33,18	Rotación
	IB	2008,18	153,18	2008,18	-86,82	Rotación
	IC	2008,18	33,18	2008,18	153,18	Rotación

Tabla 4.2. Comparación de corrientes de falla en transformadores Dyn1 y Dyn5 (HV)

Fuente: Autores

Conclusión para ambos cuadrantes comparativo LV-HV

El análisis comparativo de los cuadrantes tanto en el lado de baja como en el lado de alta de las corrientes de falla calculadas mediante el método de Teorema de Fortescue para un transformador de conexión vectorial Dyn1 y Dyn5 demuestra que el cambio del grupo vectorial no modifica las magnitudes de las corrientes de cortocircuito, ni en el lado de baja tensión ni en el lado de alta tensión. Sin embargo, en el lado delta se observa una rotación de ángulos de 120°, aplicada al desplazamiento angular propio del grupo vectorial del transformador. Este comportamiento no altera el nivel de la falla ni los esfuerzos térmicos del equipo, pero resulta peligroso para la correcta referencia angular de los sistemas de protección, especialmente en los relés direccionales, diferenciales y de distancia, donde una compensación incorrecta del grupo de conexión vectorial puede ocasionar errores de operación graves en el sistema eléctrico.

4.12 OBSERVACIONES FINALES DEL CAPITULO

La implementación computacional desarrollada confirma la validez del modelo matemático propuesto y demuestra la utilidad de Python como herramienta de apoyo en el análisis de fallas eléctricas. El programa es fácilmente adaptable para otros niveles de tensión, potencias nominales o configuraciones de transformadores, lo que crea una buena base para trabajos futuros. Además, la automatización de los cálculos reduce significativamente la probabilidad de errores asociados a procedimientos manuales y permite evaluar múltiples escenarios de operación y condiciones de falla de manera rápida y sistemática. Esta flexibilidad facilita la extensión del modelo hacia estudios más complejos, como análisis de sensibilidad de parámetros, comparación entre diferentes esquemas de conexión y evaluación del impacto de impedancias de secuencia en la magnitud de las corrientes de cortocircuito. En este sentido, la herramienta desarrollada no solo valida el enfoque teórico planteado, sino que también se proyecta como un apoyo práctico para aplicaciones académicas y estudios preliminares en sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO V

5 MODELADO Y SUMULACION EN ATP DRAW

En este capítulo se presenta el análisis del comportamiento del sistema eléctrico ante diferentes tipos de fallas, empleando simulaciones realizadas en el software ATPDraw. El estudio se centra en la observación e interpretación de las curvas de corriente obtenidas durante los eventos de falla, sin relacionarlas con cálculos teóricos previos. El objetivo principal es analizar la respuesta del sistema y del transformador ante condiciones anormales de operación, así como evaluar la influencia del grupo vectorial en las formas de onda resultantes.

5.1 MODELADO DEL DIAGRAMA ELECTRICO

El sistema modelado en ATPDraw representa una red trifásica alimentada por una fuente de voltaje de 69 kV a una frecuencia de 60 Hz. Esta fuente energiza un transformador de potencia saturable con relación de transformación 69 kV / 13,8 kV y conexión Dyn1. El lado de alta tensión se encuentra conectado en delta, mientras que el lado de baja tensión está conectado en estrella con neutro puesto a tierra mediante una resistencia.

Para la correcta supervisión del comportamiento del sistema, se incorporaron medidores de corriente y voltaje en ambos lados del transformador. Adicionalmente, se utilizó un divisor de fases (splitter) en la línea de 13,8 kV, correspondiente al lado de baja tensión, lo que permitió realizar de forma controlada los distintos tipos de cortocircuitos analizados esto se puede visualizar en la figura 5.1.

El transformador cuenta con una resistencia de puesta a tierra del neutro de 2Ω , la cual influye directamente en la magnitud de las corrientes de falla a tierra, especialmente en fallas monofásicas y bifásicas a tierra.

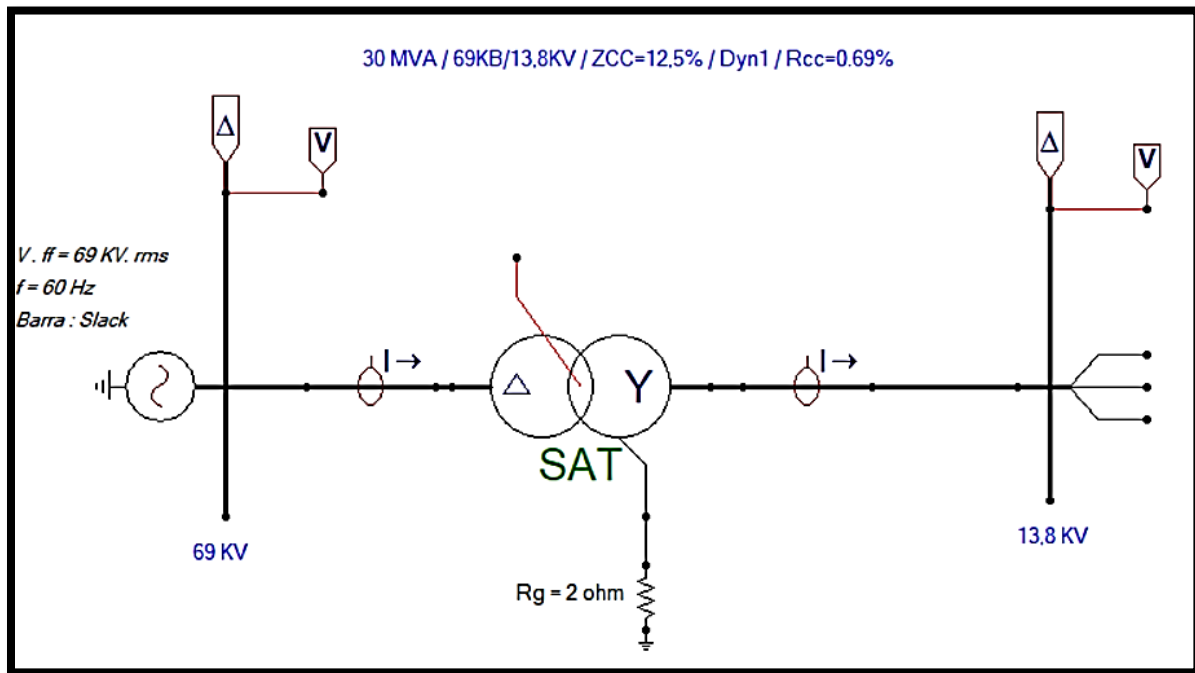


Figura 5.1. Diagrama eléctrico del sistema

Fuente: Autores

5.2 CALCULOS PARA LOS PARAMETROS DEL TRANSFORMADOR

A partir de la resistencia y la reactancia de cortocircuito determinadas en el Capítulo III, se procede a la obtención de los parámetros eléctricos equivalentes del transformador. En particular, dichos valores permiten calcular las resistencias del devanado primario y secundario, r_1 y r_2 , así como las inductancias correspondientes a cada lado del transformador, L_1 y L_2 , las cuales representan el comportamiento inductivo del equipo bajo condiciones de cortocircuito.

$$R_{cc}(\%) = 0.69\%$$

$$R_{cc}(\Omega) \cdot 13.8KV (f. Estrella) = \left(\frac{R_{cc}(\%)}{100} \right) \cdot Z_{base} \cdot 13.8KV (Estrella)$$

$$R. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \left(\frac{0.69}{100}\right) \cdot 6.34 = 0.0437 \Omega$$

$$X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

$$X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \sqrt{12.5^2 - 0.69^2} = 12.48 \%$$

$$X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \left(\frac{X_{cc}(\%)}{100}\right) \cdot Z. base. 13.8KV (Estrella)$$

$$X. cc (\Omega). 13.8KV (f. Estrella) = \left(\frac{12.48}{100}\right) \cdot 6.34 = 0.791 \Omega$$

$$R2. (LV). (f. Estrella) = \frac{R. cc(\Omega). f(Estrella)}{2}$$

$$R2. (LV). (f. Estrella) = \frac{0.0437}{2} = 0.02185 \Omega$$

$$R1. (HV). ff(Delta) = [R2. (LV). (f. Estrella)] \cdot \left(\frac{69}{13.8}\right)^2 \cdot (3)$$

$$R1. (HV). ff(Delta) = 0.02185 \cdot 25 \cdot (3) = 1.638 \Omega$$

$$X2. (LV). (f. Estrella) = \frac{X. cc(\Omega). f(Estrella)}{2}$$

$$X2. (LV). (f. Estrella) = \frac{0.791}{2} = 0.3955 \Omega$$

$$L2. (LV). (f. Estrella) = \frac{X2. (LV). (f. Estrella)}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

$$L2. (LV). (f. Estrella) = \frac{0.3955}{377} = 0.0010 \text{ H} = 1.049 \text{ mH}$$

$$L1. (HV). ff(Delta) = L2. (LV). (f. Estrella) \cdot \left(\frac{69}{13.8}\right)^2 \cdot (3)$$

$$L1. (HV). ff(Delta) = 1.049 \cdot 25 \cdot 3 = 78.67 \text{ mH}$$

Los parámetros eléctricos del transformador utilizados en la simulación son ingresados directamente en el modelo de transformador saturable de ATPDraw que se muestra en la figura 5.2, de acuerdo con las características eléctricas del equipo bajo estudio. Estos parámetros permiten representar de manera adecuada el comportamiento dinámico del transformador durante la ocurrencia de fallas, garantizando resultados consistentes en las curvas de corriente obtenidas en la simulación.

	Prim.	Sec.
U [V]	69000	7967.43
R [ohm]	1.6387	0.02185
L [mH]	78.675	1.049

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	
Secondary	ABC	
Starpoint	ABC	
Sec-N	1	

Figura 5.2. Configuración de parámetros del transformador en ATPDraw

Fuente: Autores

5.3 SIMULACION DE FALLAS

La simulación de fallas se realizó aplicando cortocircuitos directamente en el lado de baja tensión del transformador, utilizando las fases proporcionadas por el divisor de línea. Para

cada tipo de falla se registraron las corrientes de fase equivalentes, tanto en el lado de baja como en el lado de alta tensión.

Las gráficas obtenidas representan las formas de onda de las corrientes de fase en régimen transitorio y permanente, a partir de las cuales se extrajeron los valores eficaces (RMS) máximos para su análisis. Dichas formas de onda permiten observar la evolución temporal de las corrientes desde el instante de ocurrencia de la falla hasta el establecimiento del régimen permanente, incluyendo los valores pico iniciales y el proceso de amortiguamiento asociado a los parámetros del sistema. Adicionalmente, se consideró el desfase angular entre las corrientes de las distintas fases y su variación durante el transitorio, con el fin de caracterizar de manera más completa el comportamiento dinámico del transformador ante cada condición de falla

5.3.1 FALLA MONOFÁSICA EN ATPDRAW

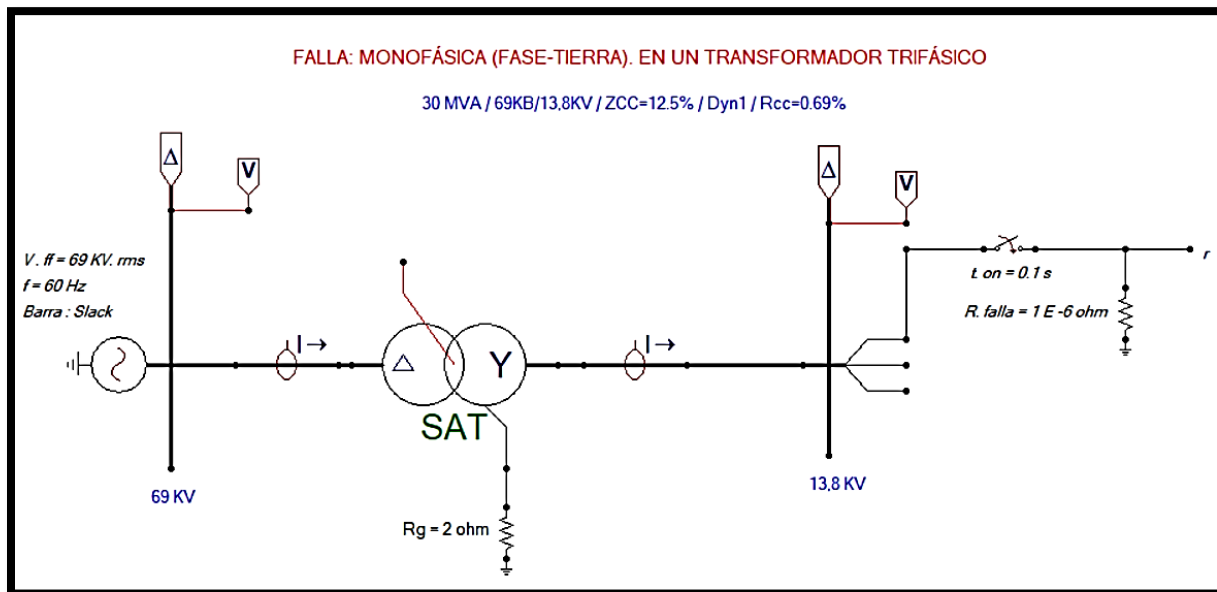


Figura 5.3. Diagrama eléctrico del sistema para una falla monofásica

Fuente: Autores

Como se muestra en la figura 5.3 se cortocircuita una sola línea a tierra con una resistencia despreciable. La conexión se establece de manera que el cortocircuito se aplica en el instante $t = 0.1 \text{ s}$, el cual coincide con un cruce por cero de la de la tensión en las fases involucradas.

5.3.1.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN BAJA (ESTRELLA)

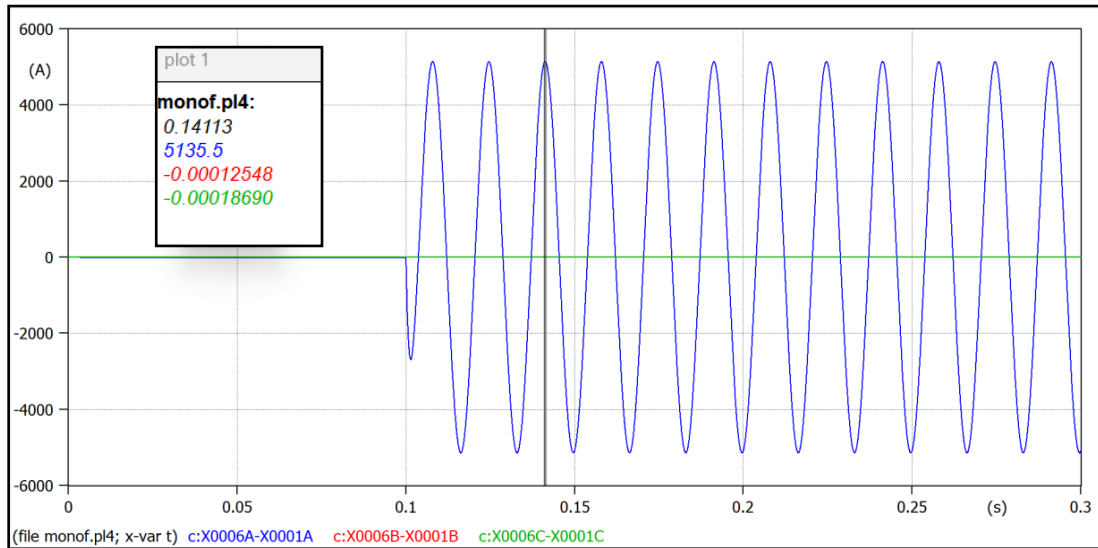


Figura 5.4. Curva de corrientes en BT (Falla monofásica)

Fuente: [Autores]

$$I(\text{azul}) = 3631.34 \text{ A rms}$$

En la figura 5.4 se observa una elevada corriente en la fase afectada del lado de baja tensión, alcanzando un valor eficaz de 3631.34 A. Las otras fases presentan corrientes aproximadas a cero, lo cual es consistente con el tipo de falla analizada.

5.3.1.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA)

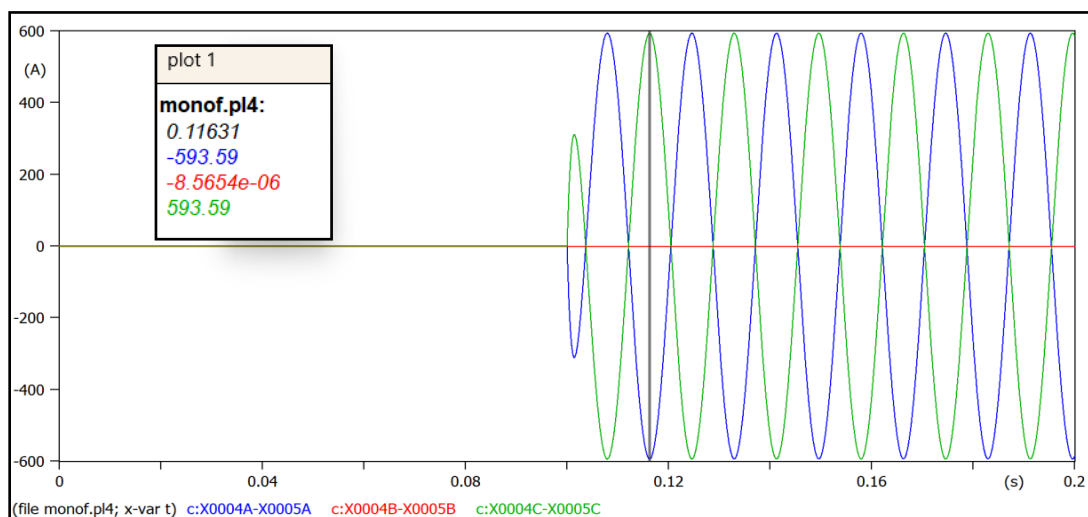


Figura 5.5. Curvas de corrientes en AT para una falla monofásica

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = I(\text{verde}) = 419.73 \text{ A rms}$$

En el lado de alta tensión, debido a la conexión delta del transformador, las corrientes se redistribuyen, como se observa en figura 5.5 dos fases presentan corrientes iguales de 419.73 A RMS, mientras que la tercera fase no conduce corriente significativa. Este comportamiento confirma el efecto de la conexión delta en la circulación de corrientes de secuencia cero.

5.3.2 FALLA BIFÁSICA EN ATP DRAW

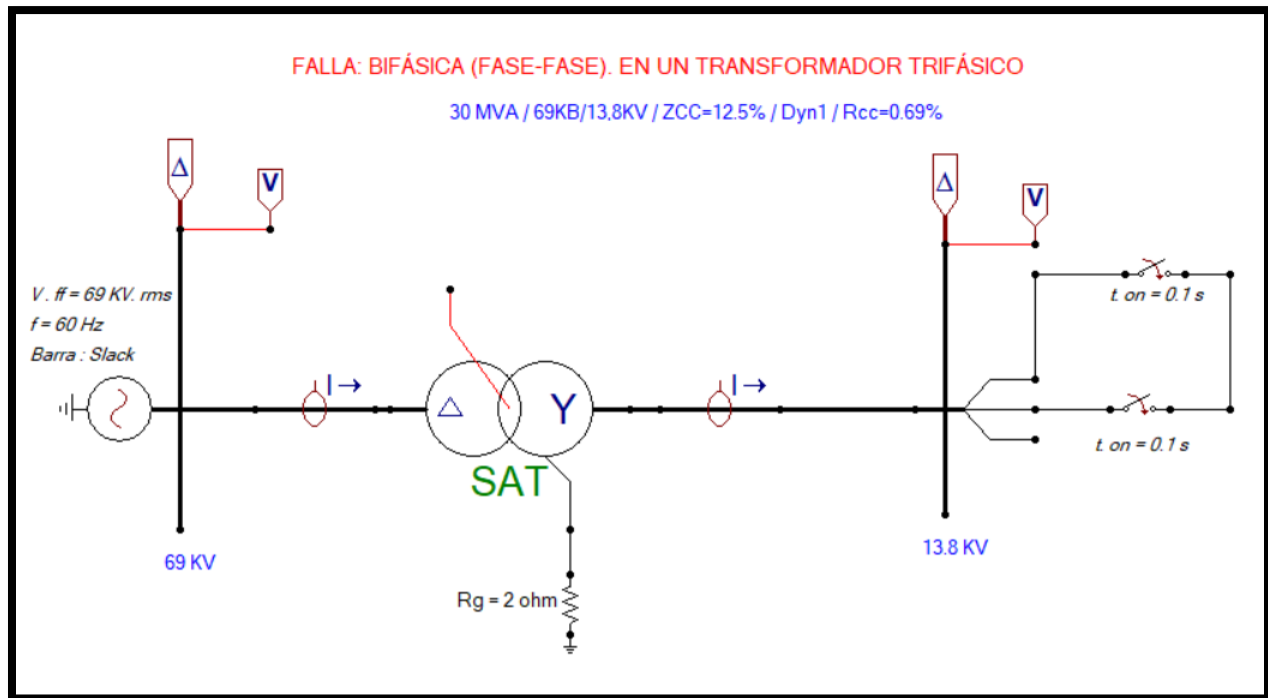


Figura 5.6. Diagrama eléctrico del sistema para una falla bifásica

Fuente: Autores

En la Figura 5.6 se presenta la configuración del *splitter* utilizada para recrear la condición de falla entre dos líneas del sistema trifásico. La conexión se establece de manera que el cortocircuito se aplica en el instante $t = 0.1$ s, el cual coincide con un cruce por cero de la de la tensión en las fases involucradas. Este instante resulta representativo para el análisis del fenómeno transitorio, ya que el momento de iniciación de la falla con respecto al ángulo de la onda sinusoidal influye directamente en la magnitud del componente transitorio de corriente y en el valor del pico inicial alcanzado.

5.3.2.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FASE EN BAJA (ESTRELLA)

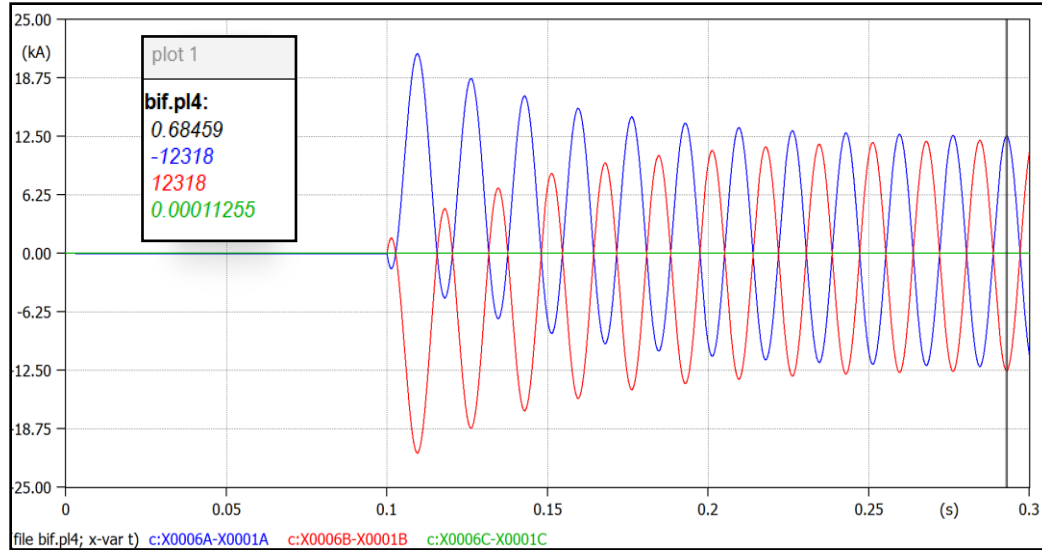


Figura 5.7. Curvas de corrientes en BT para una falla bifásica

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = I(\text{roja}) = 8710.14 \text{ A rms}$$

Para la falla bifásica, las corrientes en el lado de baja tensión alcanzan valores elevados e iguales en las dos fases involucradas, con un valor de 8710.14 A RMS. La tercera fase permanece prácticamente sin corriente.

5.3.2.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA)

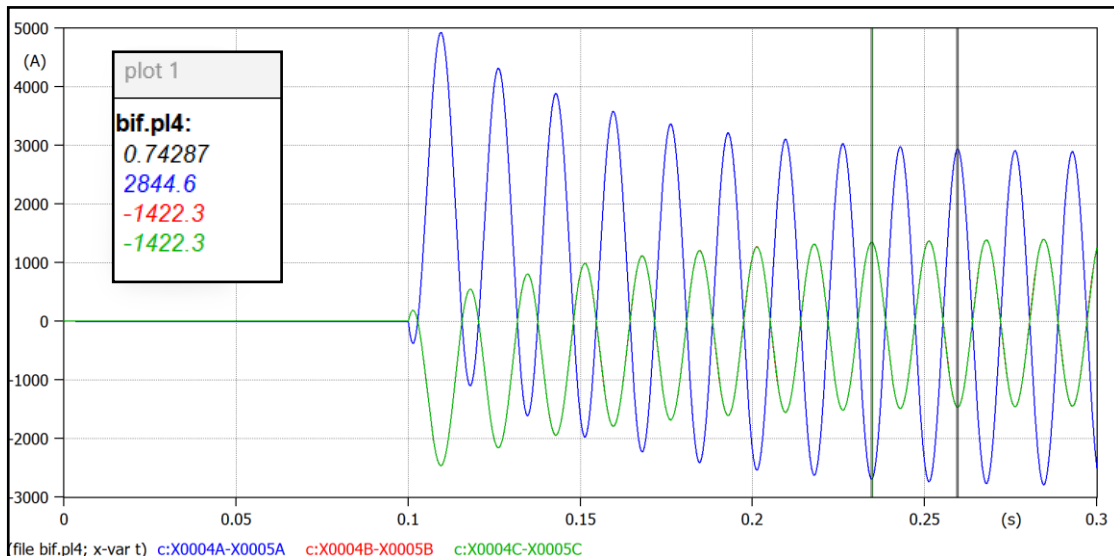


Figura 5.8. Curvas de corrientes en AT para una falla bifásica

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = 2011.43 \text{ A rms}$$

$$I(\text{roja}) = I(\text{verde}) = 1005.71 \text{ A rms}$$

En el lado de alta tensión, se evidencia una asimetría en las corrientes, donde una fase alcanza 2011.43 A RMS y las otras dos presentan valores de 1005.71 A RMS. Este comportamiento se explica por la combinación de corrientes de secuencia positiva y negativa asociadas a este tipo de falla.

5.3.3 FALLA BIFÁSICA A TIERRA EN ATP DRAW

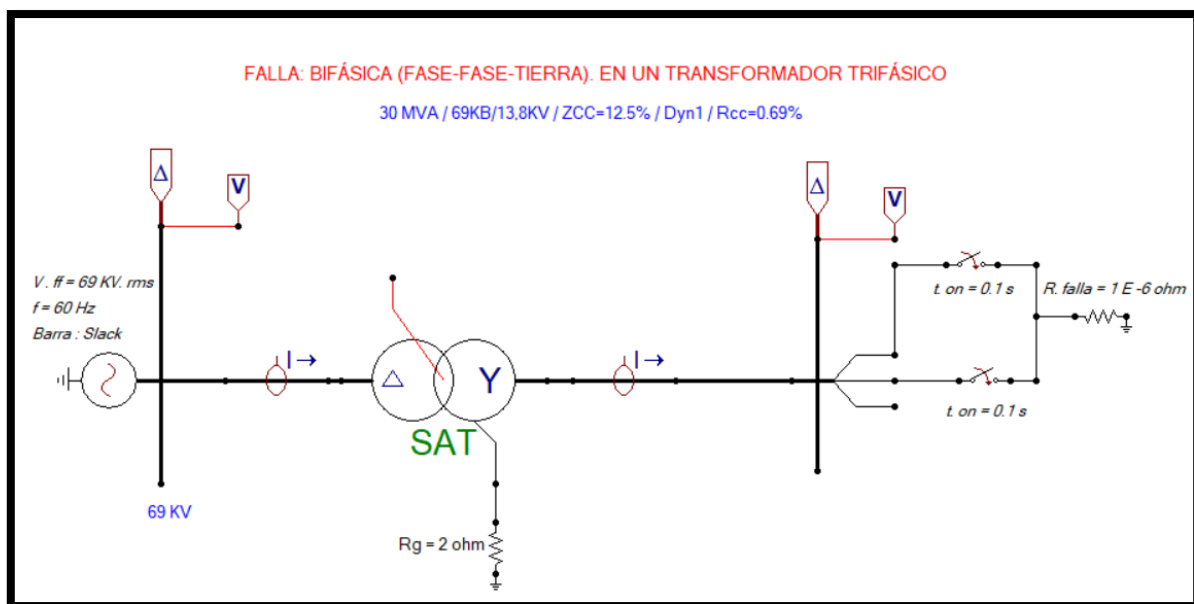


Figura 5.9. Diagrama eléctrico del sistema para una falla bifásica a tierra

Fuente: Autores

En la Figura 5.9 se presenta la configuración del *splitter* utilizada para recrear la condición de falla entre dos líneas a tierra del sistema trifásico con una resistencia de falla muy baja para la simulación. El cortocircuito se aplica en el instante $t = 0.1$ s.

5.3.3.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN BAJA (ESTRELLA)

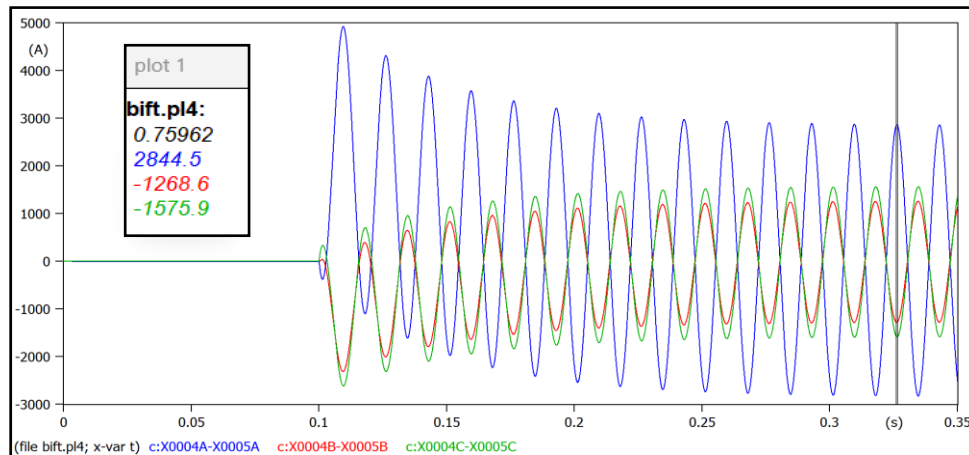


Figura 5.10. Curvas de corrientes en BT para una falla bifásica a tierra

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = 9650.59 \text{ A rms}$$

$$I(\text{roja}) = 7763.32 \text{ A rms}$$

En la falla bifásica a tierra, las corrientes en el lado de baja tensión presentan valores elevados, alcanzando 9650.59 A RMS y 7763.32 A RMS en las fases afectadas. La presencia de la resistencia de puesta a tierra influye directamente en estos valores.

5.3.3.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA)

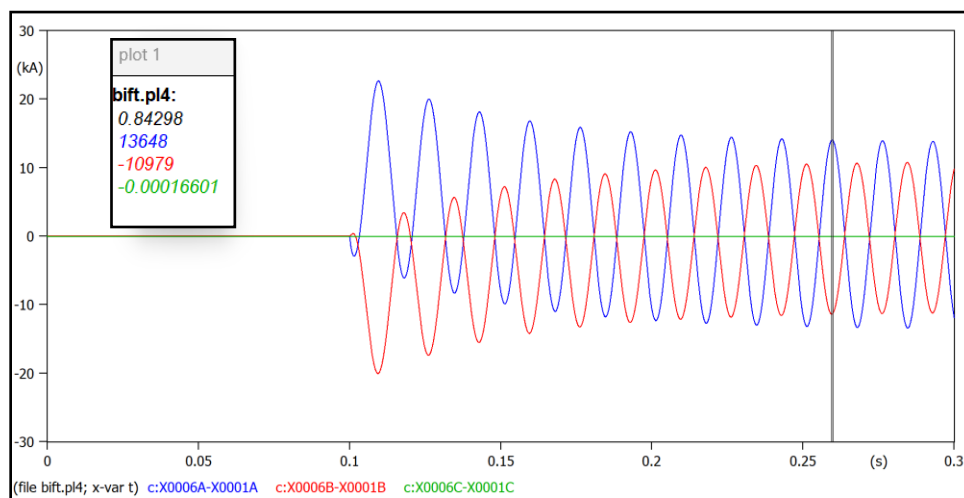


Figura 5.11. Curvas de corrientes en AT para una falla bifásica a tierra

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = 2011.36 \text{ A rms}$$

$$I(\text{roja}) = 896.61 \text{ A rms}$$

$$I(\text{verde}) = 1114.32 \text{ A rms}$$

En el lado de alta tensión, las tres fases conducen corriente, con valores eficaces de 2011.36 A, 896.61 A y 1114.32 A RMS, respectivamente. Este resultado evidencia la circulación de corrientes de secuencia cero dentro del sistema, a pesar de la conexión delta.

5.3.4 FALLA TRIFÁSICA EN ATP DRAW

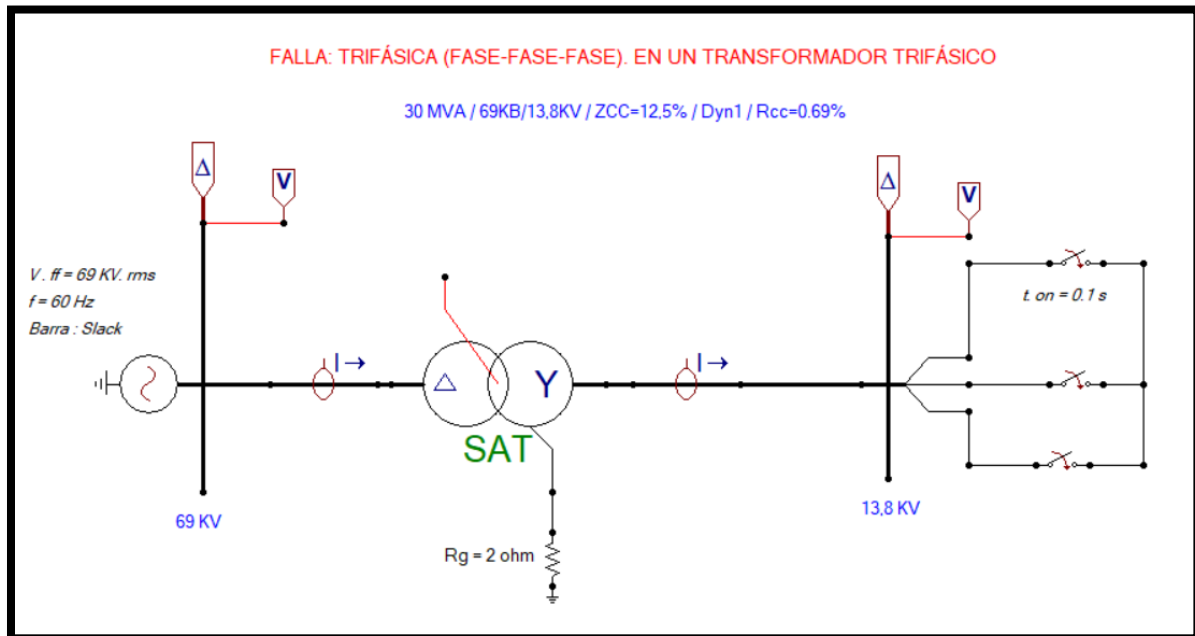


Figura 5.12. Diagrama eléctrico del sistema para una falla trifásica

Fuente: Autores

En la Figura 5.12 se presenta la configuración del *splitter* utilizada para recrear la condición de falla entre tres líneas del sistema. El cortocircuito se aplica en el instante $t = 0.1$ s.

5.3.4.1 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FASE EN BAJA (ESTRELLA)

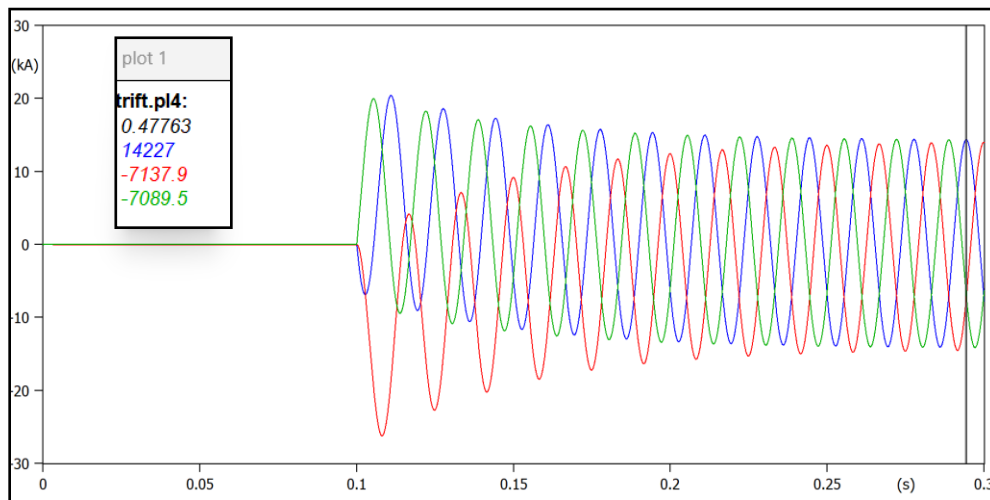


Figura 5.13. Curvas de corrientes en BT para una falla trifásica

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = I(\text{roja}) = I(\text{verde}) = 10060.01 \text{ A rms}$$

trifásica constituye el escenario más severo desde el punto de vista térmico y electrodinámico. En el lado de baja tensión, las corrientes alcanzan valores máximos de 10060,01 A RMS, con las tres fases involucradas.

5.3.4.2 CURVAS DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN ALTA (DELTA)

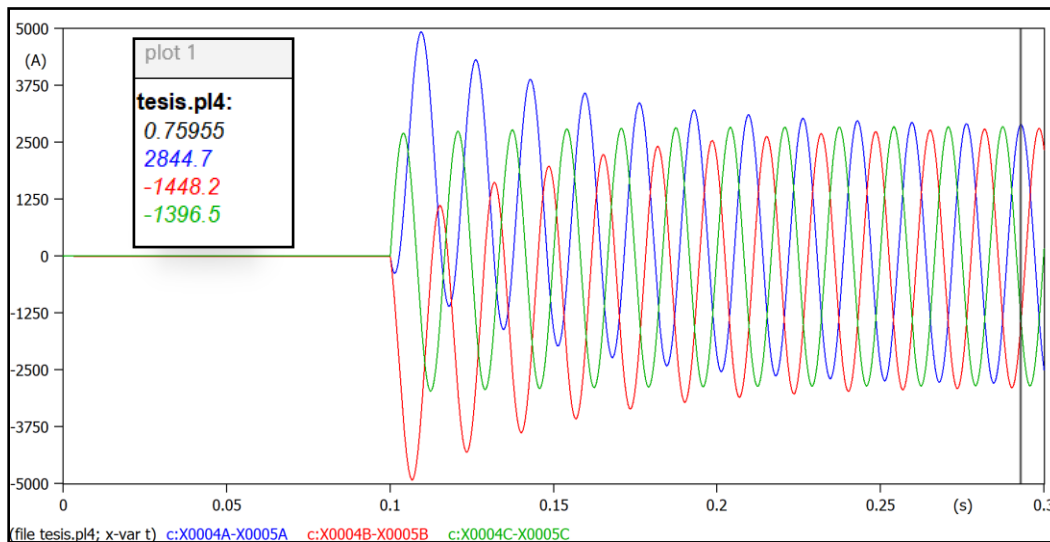


Figura 5.14. Curvas de corrientes en AT para una falla trifásica

Fuente: Autores

$$I(\text{azul}) = I(\text{roja}) = I(\text{verde}) = 2011.01 \text{ A rms}$$

De forma similar, en el lado de alta tensión se registran corrientes elevadas, con un valor máximo de 2011.01 A RMS. Al tratarse de una falla balanceada, las corrientes presentan una distribución más uniforme en comparación con los otros tipos de falla.

5.4 COMPARACION AL CAMBIAR EL GRUPO VECTORIAL

Para analizar la influencia del grupo vectorial en las corrientes de falla, se modificó la conexión del transformador de Dyn1 a Dyn5, manteniendo constantes todos los demás parámetros del sistema. El análisis se realizó para una falla monofásica a tierra, observando las corrientes reflejadas en el lado de alta tensión.

5.4.1.1 CURVA CORRIENTES EN BAJA (ESTRELLA)

Grupo de conexión Dyn1

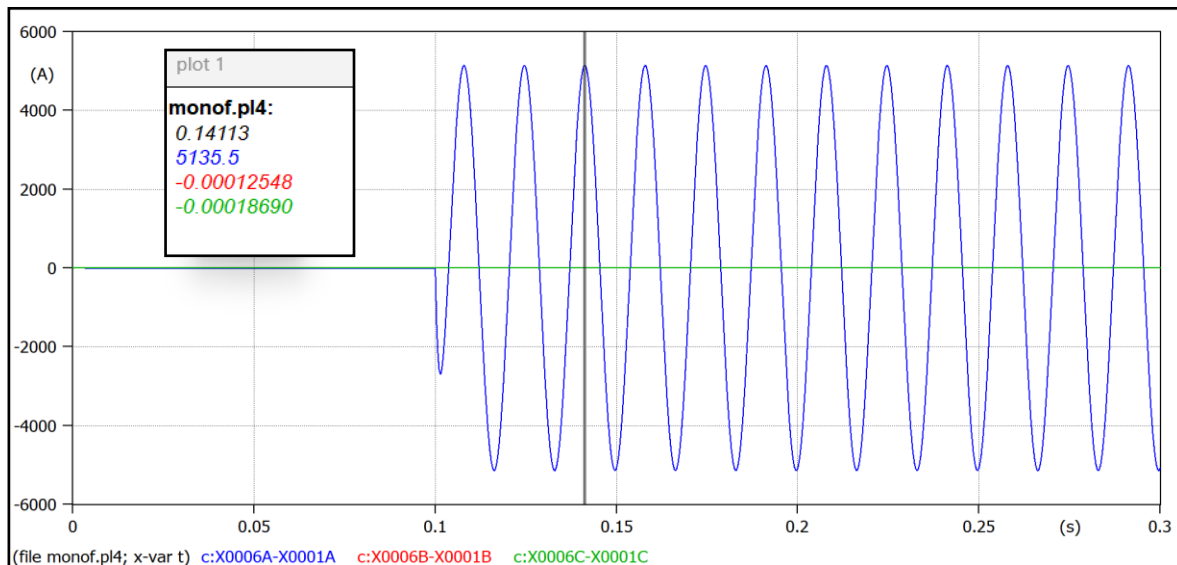


Figura 5.15. Curva de corrientes en BT para una falla monofásica conexión dyn1

Fuente: Autores

Grupo de conexión Dyn5

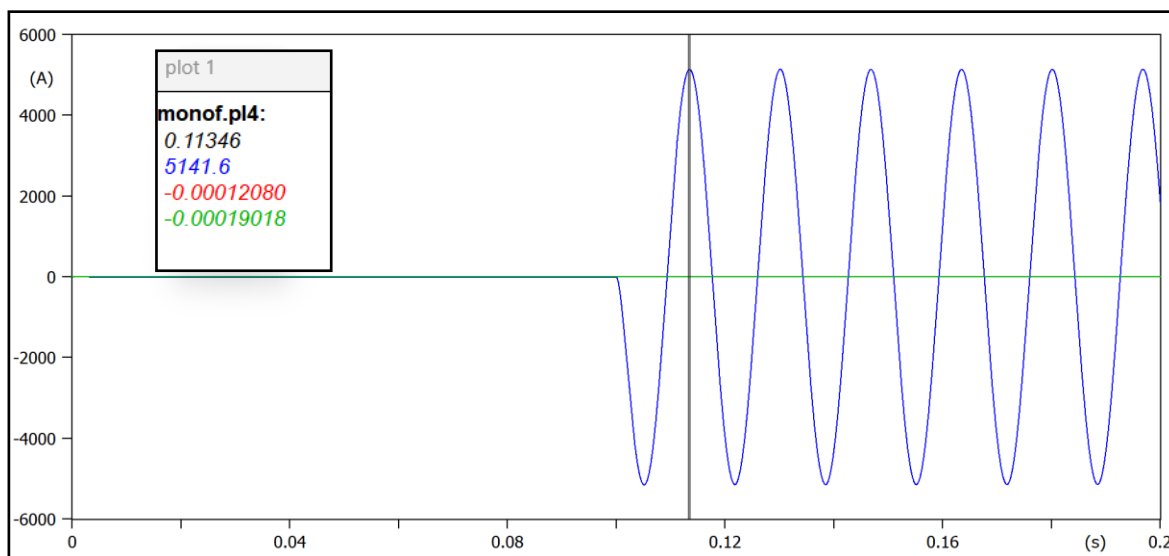


Figura 5.16. Curva de corrientes en BT para una falla monofásica grupo conexión

Fuente: Autores

5.4.1.2 CORRIENTES EN ALTA (DELTA)

Grupo de conexión Dyn1

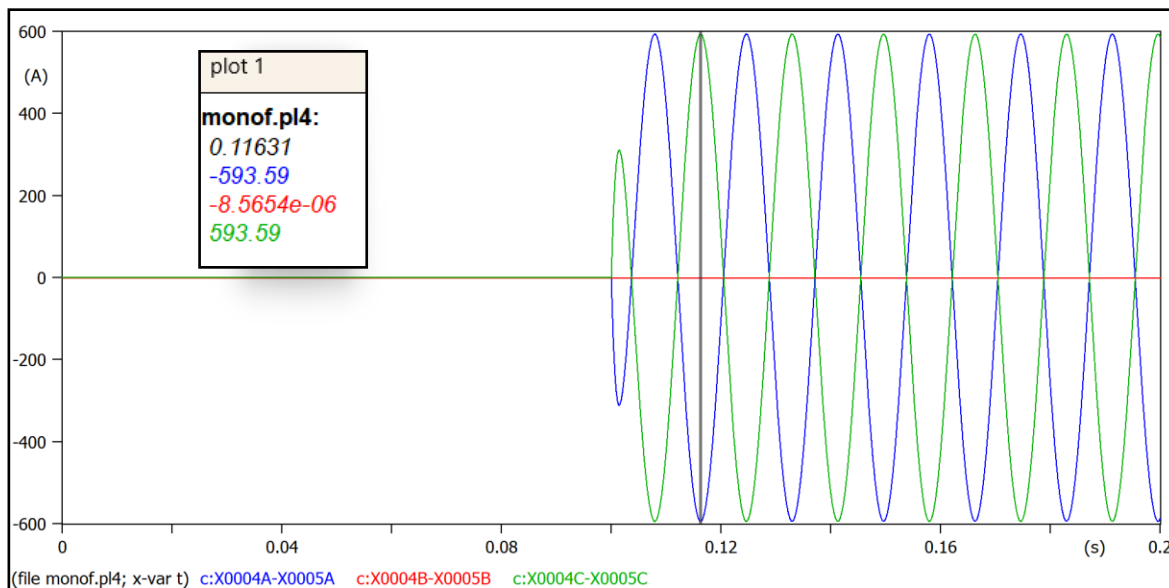


Figura 5.17. Curva de corrientes en AT para una falla monofásica conexión dyn1

Fuente: Autores

Grupo de conexión Dyn5

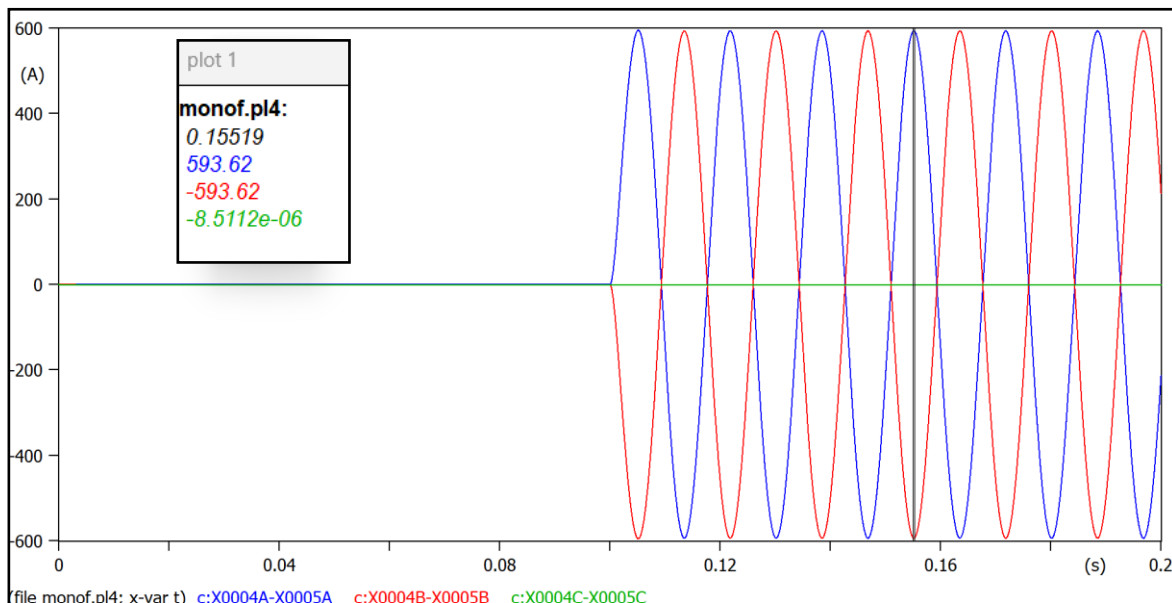


Figura 5.18. Curva de corrientes en AT para una falla monofásica conexión dyn5

Fuente: Autores

A partir de las curvas obtenidas en ATPDraw, se observa que el cambio de Dyn1 a Dyn5 no altera las magnitudes eficaces de las corrientes reflejadas en alta tensión, manteniéndose dos fases conduciendo corriente y una fase prácticamente en cero en ambos casos. Este comportamiento confirma que la conexión delta bloquea la propagación de corrientes de secuencia cero hacia el lado de alta tensión.

La diferencia principal se evidencia en el comportamiento angular de las corrientes. El cambio de grupo vectorial produce una rotación del sistema fasorial, lo que se traduce en un inicio distinto de las formas de onda y en el cambio de la fase que permanece sin corriente. En la graficas de las corrientes de falla en baja, la curva de la figura 5.15 presenta una corriente transitoria más baja que del grupo dyn5 de la figura 5.16 antes de estabilizarse. En el caso Dyn1 de la figura 5.17, una fase específica queda en cero, mientras que en Dyn5 de la figura 5.18, esta condición se desplaza a otra fase.

En conclusión, el grupo vectorial no afecta la severidad de la falla en términos de magnitud de corriente, pero sí influye en el desfase temporal y en la correspondencia de fases, efecto

especialmente relevante en estudios de protección, donde la referencia angular y la secuencia de fases influyen directamente en el desempeño de los esquemas de protección.

5.5 CONCLUSION FINAL DEL CAPITULO

A partir de las simulaciones realizadas en ATPDraw, se pudo analizar de forma clara el comportamiento del sistema ante distintos tipos de fallas eléctricas. Las curvas de corriente obtenidas permiten identificar la magnitud, la distribución y el desfase de las corrientes de fase en cada escenario de falla, tanto en el lado de baja como en el de alta tensión del transformador.

Asimismo, el análisis del cambio de grupo vectorial permitió evidenciar que dicho cambio no afecta la magnitud de las corrientes de falla, pero sí influye en el desfase temporal de las formas de onda, aspecto relevante para el diseño y coordinación de sistemas de protección.

Este capítulo constituye una base fundamental para el análisis comparativo que se desarrollará en capítulos posteriores, donde se contrastarán de manera directa los resultados analíticos y de simulación.

CAPITULO VI

6 COMPARACION FINAL CALCULO ANALITICO CON ATP DRAW

Con el fin de validar los resultados obtenidos mediante el cálculo analítico de corrientes de falla, se realizó una comparación entre los valores calculados en Python, basados en el método de componentes simétricas, y los valores RMS obtenidos a partir de las curvas de corriente simuladas en ATPDraw. La comparación se llevó a cabo para distintos tipos de falla, tanto en el lado de baja tensión como en el lado de alta tensión del transformador.

Tipo de falla	Fase	Python (A RMS)	ATP RMS (A)	Error (%)
Monofásica a tierra-LV	A	3634.46	3631.34	-0.09
	B	0.00	0.00	0.00
	C	0.00	0.00	0.00
Monofásica a tierra-AT	A	419.67	419.73	0.01
	B	419.67	419.73	0.01
	C	0.00	0.00	0.00
Bifásica-LV	A	0.00	0.00	0.00
	B	8695.65	8710.14	0.17
	C	8695.65	8710.14	0.17
Bifásica-AT	A	1004.09	1005.71	0.16
	B	1004.09	1005.71	0.16
	C	2008.18	2011.43	0.16
Bifásica a tierra-LV	A	0.00	0.00	0.00
	B	9635.51	9650.59	0.16
	C	7762.40	7763.32	0.01
Bifásica a tierra-AT	A	896.33	896.61	0.03
	B	1112.61	1114.32	0.15
	C	2008.18	2011.36	0.16
Trifásica-LV	A	10040.87	10060.01	0.19
	B	10040.87	10060.01	0.19
	C	10040.87	10060.01	0.19
Trifásica-AT	A	2008.18	2011.01	0.14
	B	2008.18	2011.01	0.14
	C	2008.18	2011.01	0.14

Tabla 6.1 Comparación magnitudes de corrientes de falla- cálculos Python vs ATPDraw.

Fuente: Autores

La comparación se efectuó considerando únicamente la magnitud eficaz de las corrientes. La evaluación directa de los ángulos de fase no se incluyó en esta etapa, debido a que ATPDraw proporciona señales en el dominio del tiempo y el análisis desarrollado en Python se basa en fasores en régimen permanente. Si bien los ángulos pueden inferirse a partir de las formas de onda mediante un procesamiento adicional, estos dependen de la referencia temporal adoptada, por lo que no resultan directamente comparables en el marco de este estudio.

Los resultados obtenidos muestran una alta concordancia entre ambos métodos, con errores porcentuales inferiores al 0.2 % para todas las condiciones de falla analizadas. Estas diferencias mínimas se atribuyen principalmente a los efectos transitorios iniciales, a la discretización temporal del proceso de simulación y al modelo electromagnético detallado del transformador implementado en ATPDraw, en contraste con el modelo analítico ideal empleado en los cálculos teóricos.

6.1 CONCLUSIONES

- se analizó el comportamiento de las corrientes de falla en un sistema eléctrico de potencia que incorpora un transformador trifásico conectado en configuración Dyn, empleando dos enfoques complementarios: el análisis analítico mediante el método de componentes simétricas implementado en Python y la simulación electromagnética en ATPDraw.
- El modelo matemático desarrollado permitió calcular las corrientes de cortocircuito para distintos tipos de falla, considerando las impedancias del sistema y la resistencia de puesta a tierra del neutro. Este análisis proporcionó una base sólida para comprender la distribución fasorial de las corrientes bajo condiciones de falla.
- Las simulaciones realizadas en ATPDraw permitieron representar el sistema de forma más realista, visualizando las formas de onda de corriente en el dominio del tiempo y posibilitando el análisis del régimen transitorio, los desfases entre fases y la respuesta dinámica del transformador, aspectos que no pueden observarse directamente mediante el método analítico.

- La comparación entre los resultados obtenidos en Python y los valores RMS extraídos de las simulaciones en ATPDraw evidenció una alta concordancia en las magnitudes de corriente para todos los tipos de falla analizados, con errores porcentuales inferiores al 0.2 %, lo que valida el modelo matemático propuesto y confirma la aplicabilidad del método de componentes simétricas para el análisis de cortocircuito en transformadores de potencia. Las pequeñas diferencias observadas se atribuyen a la consideración de fenómenos dinámicos y condiciones reales de operación en ATPDraw, no contemplados en los cálculos teóricos simplificados.
- Del análisis de las curvas de corriente se comprobó que el cambio de grupo vectorial del transformador no modifica la magnitud de las corrientes de falla, pero sí introduce un desplazamiento angular que altera la correspondencia entre fases y el instante temporal de las ondas. Este comportamiento fue verificado al comparar las configuraciones Dyn1 y Dyn5, evidenciando que, aunque la severidad de la falla permanece constante, la interpretación de las mediciones puede variar, lo cual resulta relevante para el análisis de eventos y la correcta coordinación de sistemas de protección eléctrica.
- el trabajo demuestra que la combinación de métodos analíticos y herramientas de simulación proporciona una comprensión más completa del comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia, ya que los cálculos teóricos permiten una estimación rápida y confiable de las corrientes de falla, mientras que las simulaciones complementan el análisis al representar el fenómeno de manera detallada y realista.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda profundizar en el análisis angular de las corrientes de falla mediante la extracción de fasores a partir de las señales temporales obtenidas en ATPDraw, utilizando técnicas de procesamiento digital de señales. Esto permitiría comparar directamente los desfases de fase bajo una referencia común, complementando el análisis de magnitudes RMS desarrollado en este trabajo.
- Para mejorar la representación del comportamiento real del transformador, se sugiere considerar en futuras investigaciones efectos adicionales como la saturación del

núcleo, variaciones de carga y resistencias de arco, los cuales pueden influir en la respuesta dinámica del sistema durante condiciones de falla.

- Se recomienda el uso combinado de herramientas de programación y simulación, como Python y ATPDraw, en el análisis de sistemas eléctricos de potencia, ya que esta metodología facilita la validación cruzada de resultados y proporciona una comprensión más completa de los fenómenos eléctricos analizados.
- Se destaca la utilidad de herramientas basadas en inteligencia artificial como apoyo en el desarrollo de códigos de cálculo en Python, especialmente en la automatización de procedimientos y estructuración de algoritmos. Su uso resulta beneficioso para usuarios que no poseen un dominio avanzado de programación, permitiendo enfocar el análisis en los fundamentos eléctricos sin sustituir el criterio ingenieril ni la interpretación técnica de los resultados.
- se recomienda el uso responsable de herramientas computacionales e inteligencia artificial como complemento al conocimiento teórico, asegurando siempre la validación de los resultados obtenidos mediante principios eléctricos y métodos reconocidos, tal como se realizó en el presente trabajo.

CAPITULO VII

7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] “Transformer Zero Sequence Impedance.” Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.breakerandfuse.com/post/transformer-zero-sequence-impedance>
- [2] Hadi Saadat, *Power System Analysis*. 2010.
- [3] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: IEEE Press, 1995.
- [4] William D. Stevenson Jr., *Elements of Power System Analysis*, 4th edition. 1982.
- [5] “Sistemas eléctricos de potencia: Definición y tipos.” Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://cesienergy.com/sistemas-electricos-de-potencia-sep-definicion-y-partes/>
- [6] A. R. Bergen and V. Vittal, *Power Systems Analysis*, 2nd edition. 2000.
- [7] J. D. Glover *et al.*, “POWER SYSTEM ANALYSIS & DESIGN SIXTH EDITION,” 2017. [Online]. Available: www.cengage.com/highered
- [8] Electric Power Systems Research, “Accurate Calculation of Fault Currents in Transmission Networks,” *Elsevier*, vol. 189, 2020.
- [9] William Stevenson and John Grainger, *ANALISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA STEVENSON JR.* 1996.
- [10] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks,” *Transactions of the AIEE*, vol. 37, pp. 1027–1140, 1918.
- [11] “Las 7 principales causas de fallas en subestaciones eléctricas.” Accessed: Feb. 02, 2026. [Online]. Available: <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/fallas-en-subestaciones-electricas/>
- [12] Y. G. M. Kezunovic, “Power System Fault Analysis: Past, Present, and Future,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 16, no. 4, 2018.
- [13] Thomas Pascual Martinez, *Análisis de la corriente de corto circuito: en el sistema eléctrico de potencia*. Mexico: INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, 2010.
- [14] M. B. R. Das, “Short-Circuit Analysis of Power Systems Considering Transformer Connections,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, 2019.
- [15] A. G.-E. A. Abur, “Short-Circuit Calculations in Modern Power Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, 2018.
- [16] C. I. Ciontea, “The use of symmetrical components in electrical protection,” vol. 8765870, 2019, doi: 10.1109/CPRE.2019.8765870.

- [17] B. C. S. J. Arrillaga, "Sequence Components in Modern Power System Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, 2017.
- [18] R. S. , B. H. J. , K. Thute, " Analysis of faulted power system with fault current limiter using compensation current method," *Electric Power Systems Research*, vol. 234, 110680, Dec. 2024.
- [19] S. J. H. Saadat, "Advanced Fault Analysis Using Symmetrical Components," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier*, vol. 104, 2019.
- [20] M. K. L. Wang, "Sequence Network Modeling for Unbalanced Fault Analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 1, 2020.
- [21] N. Cho, M. Yoon, and S. Choi, "Impact of Transformer Topology on Short-Circuit Analysis in Distribution Systems with Inverter-Based Distributed Generations," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/su14159781.
- [22] R. I. A. Hooshyar, "Effect of Transformer Grounding on Fault Currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, 2017.
- [23] "El transformador eléctrico." Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/corrientes-alternas-con-un-transformador-electrico>
- [24] ING. TEC. EXP.M. Y OO.PP., "TEMA 5.-El transformador. Generalidades," in *TECNOLOGÍA ELECTRICA*. Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://www.uco.es/~el1bumad/docencia/oopp/tema5.pdf>
- [25] "Transformadores trifásicos que son y para que sirven." Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <https://rte.mx/transformador-trifasico-transformadores-trifasicos?srsltid=AfmBOorRnpYa3Cdn3uEmj-ObKQXyk3iVdECjXvX-4cJZzCc3Ty8iLeEX>
- [26] M. Ángel and R. Pozueta, "Máquinas Eléctricas II Este tema se publica bajo Licencia: Crea5ve Commons BY--NC--SA 4.0 Tema 1. Transformadores", Accessed: Jan. 27, 2026. [Online]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- [27] "PROMELSA: ¿Cómo interpretamos el grupo de conexión en transformadores trifásicos de distribución? - Descubre los Últimos Artículos Técnicos | Blog." Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.promelsa.com.pe/blog/post/como-interpretamos-el-grupo-de-conexion-en-transformadores-trifasicos-de-distribucion.html?srsltid=AfmBOor8w687J4fORe3LXbNOf2HzYx9ziA30MP2k8rhDf6ehd9q62ygb>
- [28] E. , et al. Gómez-Luna, "Analysis of three-phase transformer connections and vector groups in power systems.," *IEEE Latin America Transactions*, 2023.

- [29] “IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers IEEE Power and Energy Society Developed by the Transformers Committee,” 2020. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org>
- [30] E. , et al Gómez-Luna, “Analysis of three-phase transformer connections and vector groups in power systems,” *IEEE Latin America Transactions*, 2023.
- [31] S. , B. R. Sahoo and R. Barik, “Impact of transformer vector group on fault current and protection coordination,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024.
- [32] International Electrotechnical Commission, “Power transformers – Part 1: General International Electrotechnical Commission (IEC 60076-1),” 2023.
- [33] Python Software Foundation, “Python for Scientific Computing in Power Systems,” *IEEE Access*, 2022.
- [34] “El poder de Python para la ingeniería eléctrica | Python People.” Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.pythonpeople.nl/the-power-of-python-for-electrical-engineering/>
- [35] “¿Qué es Python? - Explicación del lenguaje Python - AWS.” Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/python/>
- [36] R. , et al. Silva, “Graphical modeling of power systems using ATPDraw ,” *IEEE Latin America Transactions*, 2023.
- [37] “Clase ATPDRAW | PDF | Red eléctrica | Cantidades físicas.” Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/861383492/ClaseATPDRAW>
- [38] H. K. Høidalen, “ATPDraw version 7.0 – User’s Manual,” *SINTEF Energy Research*, 2023.

7.1 ANEXOS

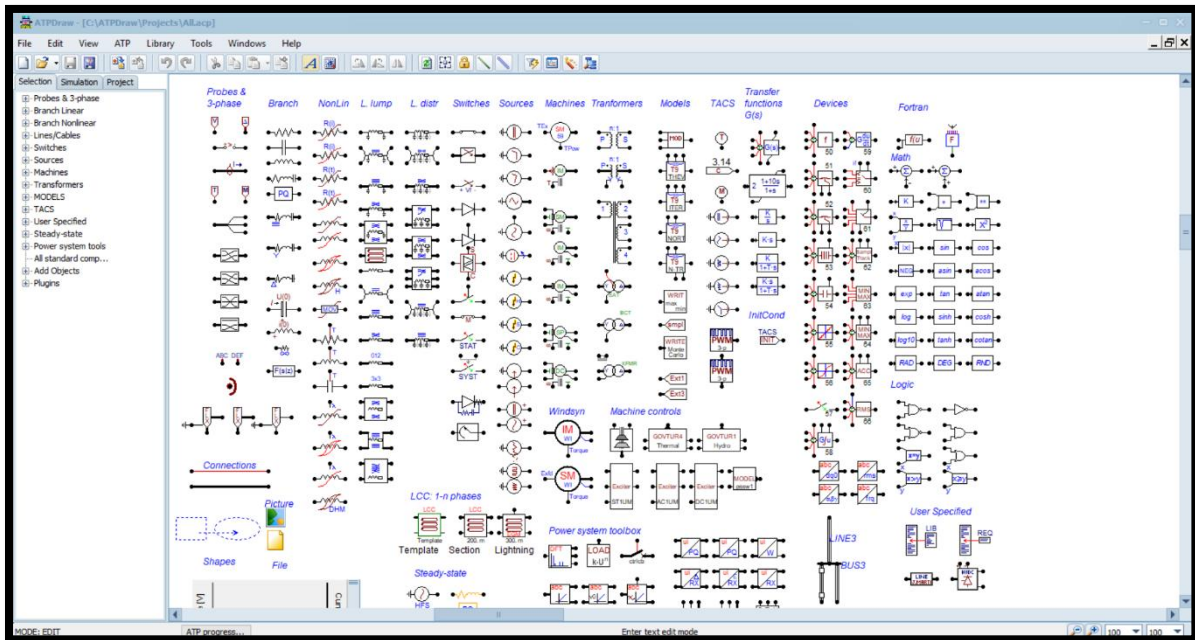


Figura 7.1. Ventana principal de ATPDraw con elementos varios

Fuente: Tomado de ATPDraw

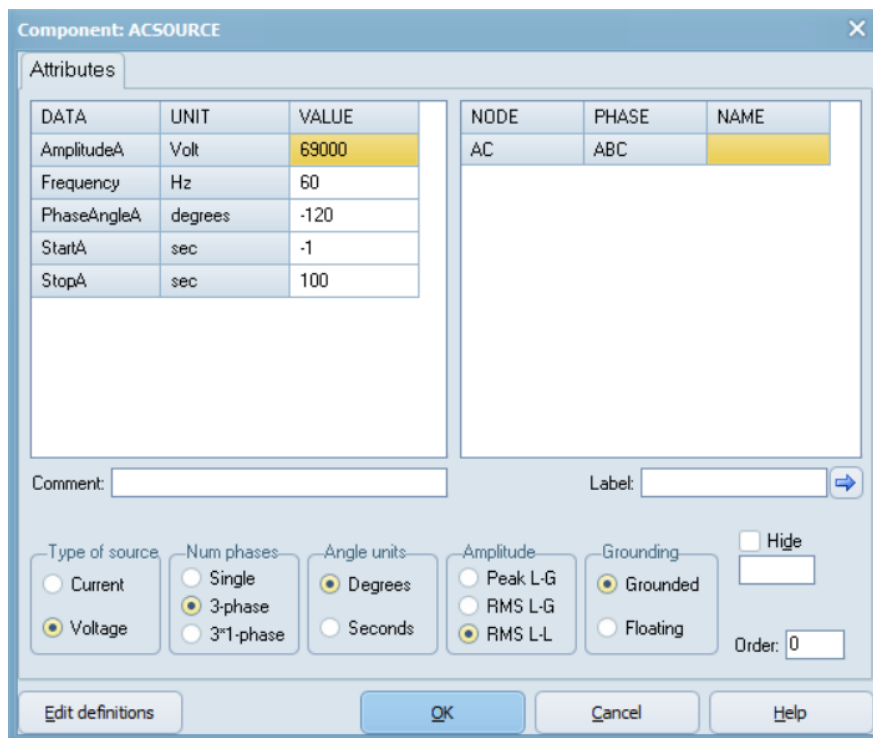


Figura 7.2. Parametros de la fuente para el sistema en atp draw

Fuente: tomado de ATPDraw

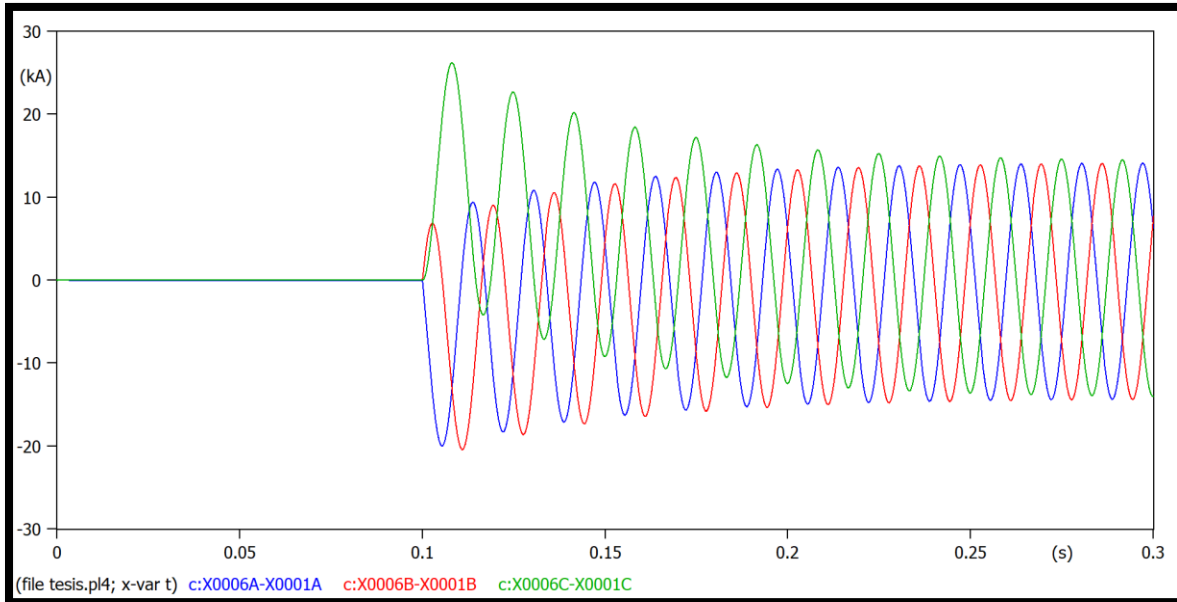


Figura 7.3. Corrientes de falla trifásica en baja(estrella) para un grupo vectorial dyn3

Fuente: Autores

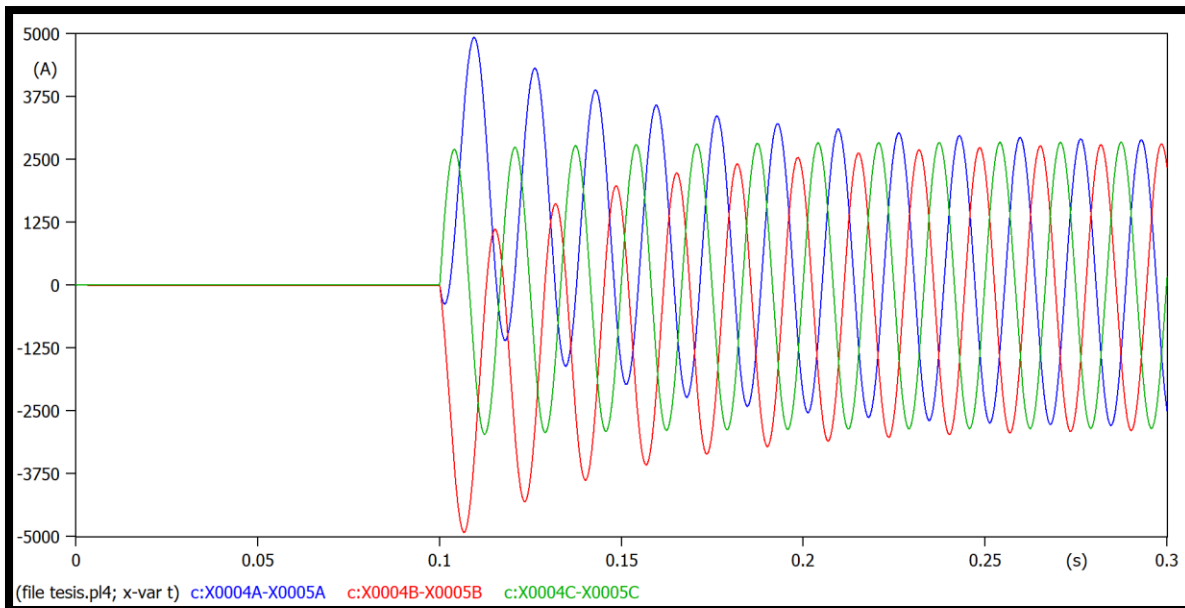


Figura 7.4. Corrientes de falla trifásica en alta(delta) para un grupo vectorial dyn3

Fuente: Autores

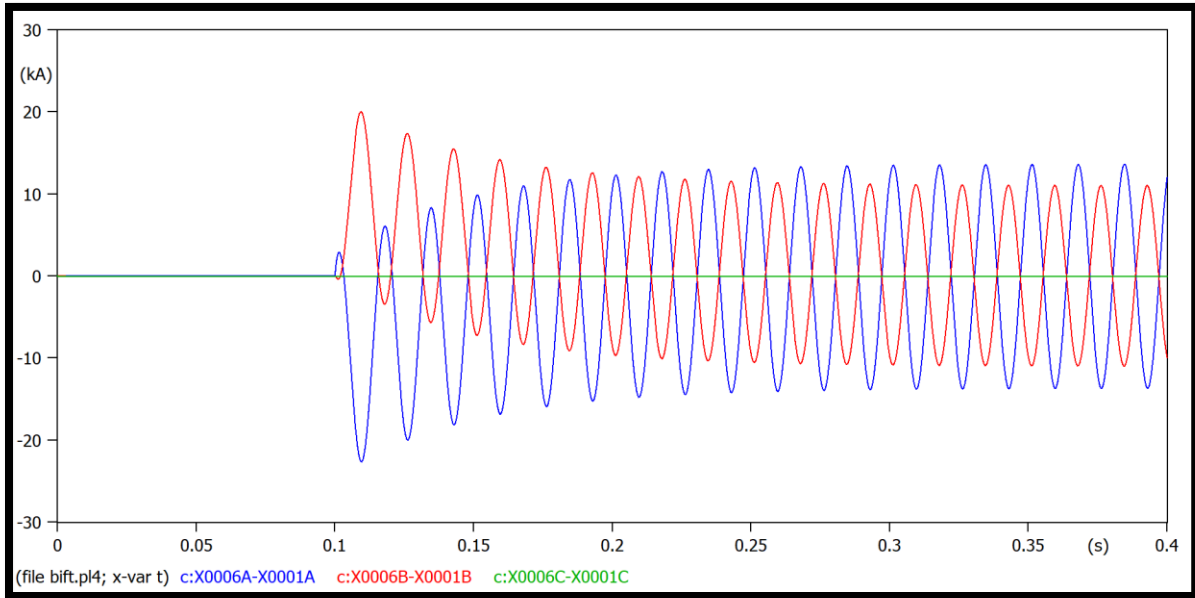


Figura 7.5. Corrientes de falla bifásica a tierra en baja(estrella) para un grupo vectorial dyn7

Fuente: Autores

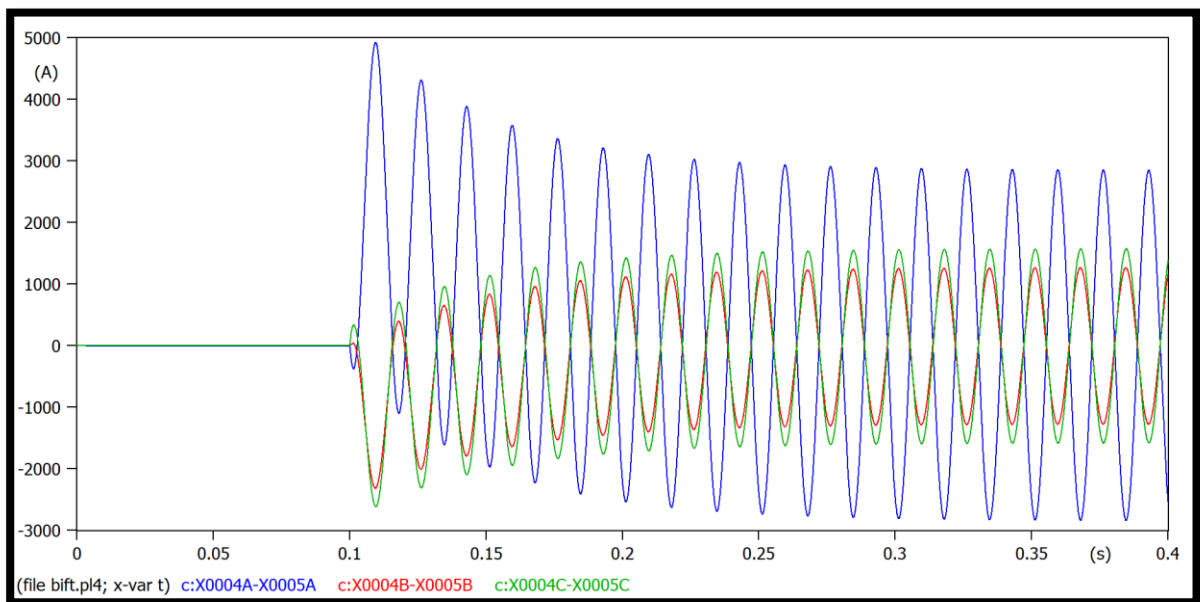


Figura 7.6. Corrientes de falla bifásica a tierra en alta(delta) para un grupo vectorial dyn7

Fuente: Autores

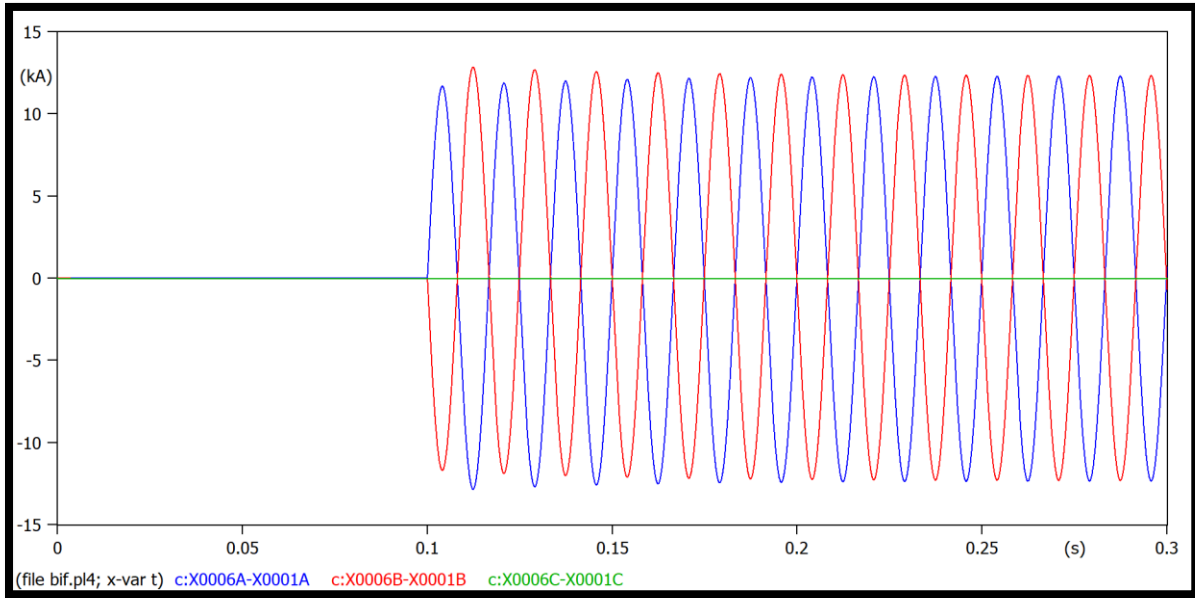


Figura 7.7. Corrientes de falla bifásica en baja(estrella) para un grupo vectorial dyn9

Fuente: Autores

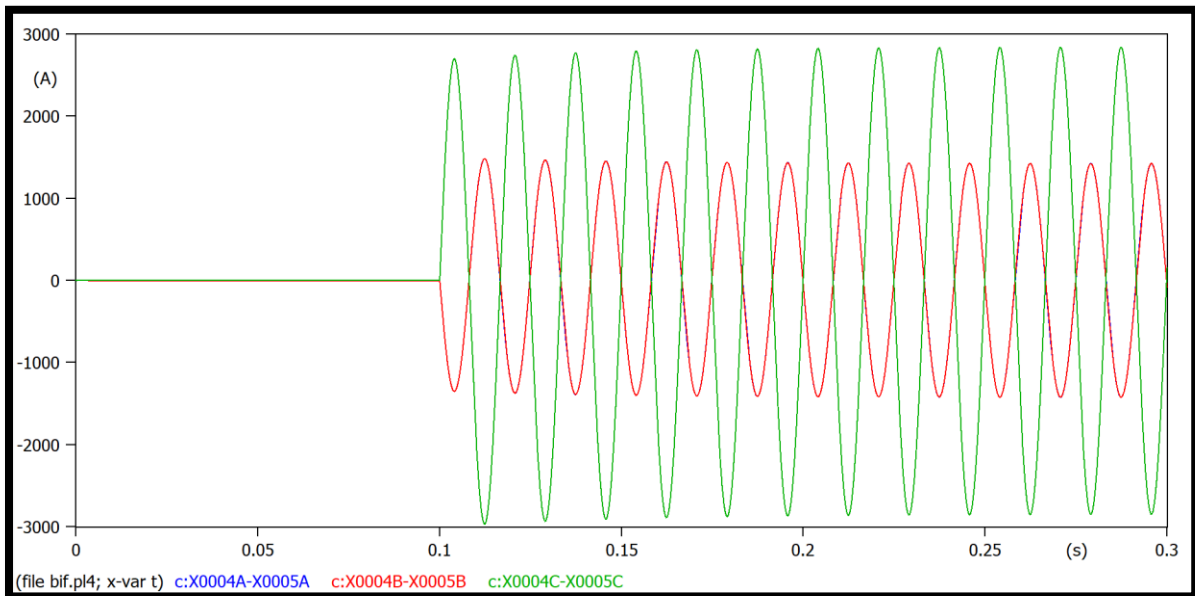


Figura 7.8. Corrientes de falla bifásica en alta(delta) para un grupo vectorial dyn9

Fuente: Autores