

Sizing of a Zig-Zag Type Transformer for Grounding in ELEPCO's Illuchi 1 Generation Plant

Dimensionamiento de un Transformador tipo Zig-Zag para Puesta a Tierra en la Central de Generación Illuchi 1 de ELEPCO

 J.J. Erazo¹

 H.N. Arcos¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
E-mail: joel.erazo@epn.edu.ec; hugo.arcos@epn.edu.ec

Abstract

In this document, the technical-economic study for the specification of a Zig-Zag transformer for grounding of Illuchi I generation power plant, is presented. Starting with the creation of a database with the electrical parameters of the elements that are part of from the power station, a model is implemented in the Power Factory software on which power flows and short circuits are executed. The results obtained are analyzed by a DPL programmed script that decides the electrical parameters needed for the earthing transformer specification Zig-Zag. Then, the behavior of the system is verified with the connection of the Zig-Zag transformer and the system of overcurrent protections in the transmission line Illuchi I - The Calvary with the rest of the ELEPCO system is coordinated. Also, an assessment is made of the costs and benefits associated with the implementation of the grounding system using the Zig-Zag transformer. It is important to set up that a correctly selected and designed earthing system supplies safety and protection both to people and to the elements of power plants.

Index terms— Illuchi I, grounding system, Zig-Zag transformer, technical-economic study, electrical protections.

Resumen

En este documento se presenta el estudio técnico-económico para la especificación de un transformador Zig-Zag para puesta a tierra de la Central de Generación Illuchi I. Partiendo con la creación de una base de datos con los parámetros eléctricos de los elementos que forman parte de la central, se implementa un modelo en el software Power Factory en el que se ejecutan flujos de potencia y cortocircuitos. Los resultados obtenidos se analizan mediante un script programado en DPL que determina los parámetros eléctricos necesarios para la especificación del transformador de puesta a tierra Zig-Zag. Después, se verifica el comportamiento del sistema con la conexión del transformador Zig-Zag en la central y se coordina el sistema de protecciones de sobrecorriente de la línea de transmisión Illuchi I - El Calvario con el resto del sistema de ELEPCO. También, se realiza una valoración de los costos y beneficios asociados a la implementación del sistema de puesta a tierra mediante el transformador Zig-Zag. Es importante establecer que un sistema de puesta a tierra correctamente seleccionado y diseñado brinda seguridad y protección tanto a las personas como a los elementos de las centrales eléctricas.

Palabras clave— Illuchi I, puesta a tierra, transformador Zig-Zag, estudio técnico-económico, protecciones eléctricas.

Recibido: 16-02-2022, Aprobado tras revisión: 08-07-2022

Forma sugerida de citación: Erazo, J.; Arcos, H. (2022). "Dimensionamiento de un Transformador tipo Zig-Zag para Puesta a Tierra en la Central de Generación Illuchi 1 de ELEPCO". Revista Técnica "energía". No. 19, Issue I, Pp. 1-12

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.504>

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

En sus inicios, muchos de los sistemas de potencia eran diseñados y operados con el neutro aislado, es decir, sin una conexión intencional a tierra. Este método era útil especialmente ante fallas ocasionadas por contactos momentáneos de una de las fases a tierra, ante las cuales el sistema podía seguir operando por un determinado tiempo hasta que la falla se despeje por si sola o fuera localizada y reparada, evitando así interrupciones prologadas del servicio. Sin embargo, con la expansión de los sistemas de potencia, tanto en capacidad como en nivel de voltaje, fenómenos de característica transitoria ocasionados por fallas, maniobras y descargas atmosféricas generaban sobrevoltajes recurrentes muy altos que ponían en riesgo el aislamiento de los equipos. Por estos motivos la mayoría de los sistemas eléctricos empezaron a operar conectados sólidamente a tierra o a través de una impedancia, permitiendo despejar automática y selectivamente cada circuito con falla [1].

En la actualidad, existen varios métodos y criterios para la conexión a tierra de un sistema de potencia y cada uno tiene su propio propósito.

De manera general, los sistemas de puesta a tierra cumplen una función importante en cuanto a seguridad y protección, manteniendo los niveles de voltaje a tierra dentro de límites seguros tanto para las personas como para el aislamiento de los equipos. Adicionalmente los sistemas de puesta a tierra proporcionan un flujo de corriente que permite la detección de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra; esta detección inicia el arranque y operación de dispositivos automáticos de protección que aíslan a los elementos y equipos protegidos, prolongando su vida útil [2].

La conexión a tierra de un sistema de potencia considera una gran cantidad de factores tales como: tipo de conexión a tierra, factores de puesta a tierra, relación de impedancias de secuencia, corrientes de cortocircuito, sobrevoltajes, etc., factores que no pueden definirse individualmente debido a su interdependencia. En este contexto, seleccionar y diseñar un método de puesta a tierra que ofrezca un equilibrio en términos técnicos y económicos es una tarea difícil.

En sistemas de potencia antiguos como el de la Central Illuchi I, en donde el neutro no existe, es común la presencia de fenómenos de origen transitorio, estos generalmente son sobrevoltajes con magnitudes superiores al nominal que resultan de una condición resonante establecida entre la reactancia inductiva del sistema y la capacitancia distribuida a tierra durante una falla monofásica [1]. Estas sobretensiones transitorias presentes en las fases sanas son destructivas, ya que causan fallas en el aislamiento en múltiples ubicaciones del sistema y particularmente en los generadores.

Otro problema asociado a la ocurrencia de fallas monofásicas sostenidas es el exagerado tiempo que se emplea para localizar la falla, aspecto que, sin importar el procedimiento que se siga, afecta notablemente a la continuidad del servicio. A esto se suma el hecho de que, si no se puede ubicar la falla antes de que ocurra una segunda falla monofásica, se producirá una falla bifásica [2].

Todo el sistema de protecciones de la red de ELEPCO está coordinada en función de las protecciones de sobrecorriente, de tal forma que al no existir una conexión a tierra que permita el flujo de corrientes de falla las protecciones en la central Illuchi I no operan coordinadamente con el resto del sistema interconectado. En este contexto, cualquier contingencia que ocurra en el nexo eléctrico comprendido entre la subestación Illuchi I y la subestación El Calvario ocasiona la desconexión innecesaria de elementos.

En este artículo se presenta la especificación de un transformador Zig-Zag para la puesta a tierra del sistema eléctrico de la Central Illuchi I. Para el efecto se realiza una modelación en DigSilent Power Factory mediante la cual se obtienen los parámetros eléctricos y características constructivas del transformador, especificaciones que permiten estimar los costos para la implementación de esta solución técnica por parte de la Empresa Eléctrica Provincial de Cotopaxi.

La operación del transformador Zig-Zag permitirá la circulación de corrientes de secuencia cero por sus devanados, posibilitando la coordinación del sistema de protecciones de sobrecorriente, adicionalmente evitará daños en el aislamiento de los equipos dada la reducción en la magnitud de los sobrevoltajes transitorios esperados en fases sanas, evitando la salida innecesaria de elementos del sistema y las pérdidas económicas asociadas a la indisponibilidad de la central.

A continuación, se presentan conceptos, características de funcionamiento y parámetros técnicos de dimensionamiento y selección del transformador Zig-Zag, seguido del procedimiento utilizado para la modelación y determinación de los parámetros del transformador Zig-Zag de puesta a tierra propuesto. Finalmente se detallan y analizan los resultados, luego de lo cual se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2. TRANSFORMADOR DE PUESTA A TIERRA ZIG-ZAG

El transformador de puesta a tierra en Zig-Zag permite convertir un sistema trifásico de tres hilos sin conexión a tierra en un sistema trifásico de cuatro hilos con conexión a tierra. La función principal de un transformador de puesta a tierra es crear un camino de baja impedancia para la corriente de secuencia cero durante una falla a tierra o en condiciones de desbalance de carga, esto con la finalidad de reducir la magnitud de posibles sobrevoltajes.

2.1. Estructura y Conexiones Internas

El transformador de puesta a tierra Zig-Zag está conformado por tres devanados externos (Zig) y tres devanados internos (Zag). Los terminales del transformador que se conectan al sistema trifásico existente pertenecen a los devanados externos. De igual manera, los devanados internos se conectan entre sí para formar el terminal neutro que se conecta directamente o mediante una resistencia a tierra. La Fig. 1 muestra una representación detallada.

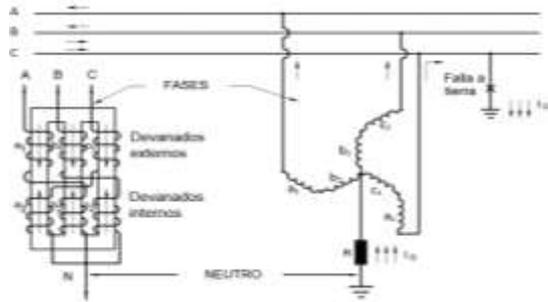


Figura 1: Conexión de devanados en un transformador Zig-Zag

La conexión de los devanados del transformador Zig-Zag es denominada estrella interconectada, puesto que el devanado Zig de una fase está conectado en serie sustractiva con el devanado Zag de la otra fase. De esta forma, cada una de las fases del transformador Zig-Zag está formada por dos devanados idénticos, pero enrollados en dirección opuesta, asegurando una alta impedancia en condiciones normales de operación y una impedancia muy baja cuando se ha producido una falla a tierra.

La Fig. 2 muestra los voltajes en los devanados del transformador, en tanto que en (1) se muestra la equivalencia entre estos voltajes [3].

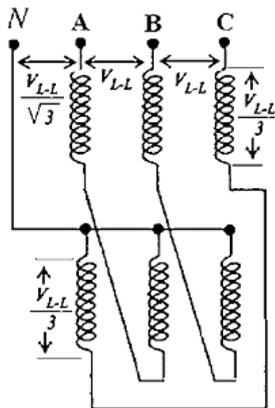


Figura 2: Relación de voltajes en un transformador Zig-Zag [6]

$$V_{Zig} = V_{Zag} = \frac{V_{L-N}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{L-L}}{3} \quad (1)$$

donde V_{Zig} , V_{Zag} son los voltajes en los devanados zig y zag y V_{L-N} , V_{L-L} son los voltajes de fase y línea.

2.2. Funcionamiento

En condiciones normales de operación, con voltaje nominal trifásico balanceado y sin presencia de fallas, por los devanados del transformador de puesta a tierra solo circula una pequeña corriente magnetizante [4], [5].

Cuando ocurre una falla a tierra en cualquiera de las fases del sistema, como se muestra en la Fig. 3, el transformador de puesta a tierra divide la corriente de falla en tres componentes iguales; estas corrientes fluyen en los devanados y están en fase entre sí. En estas condiciones, las corrientes en los dos devanados en la misma rama del núcleo fluyen en direcciones opuestas y los flujos magnéticos creados por estas dos corrientes se opondrán y se neutralizarán.

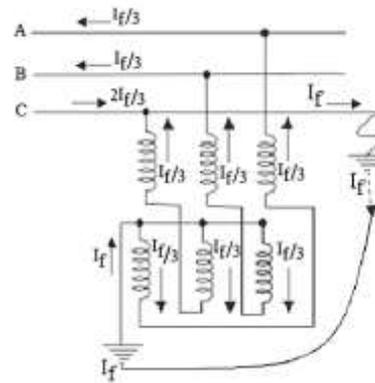


Figura 3: Flujo de corriente durante una falla en la fase 'c'

Al no existir un aumento en el flujo debido a la corriente de falla, no se induce voltaje adicional a través del devanado, de esta manera, se puede concluir que el transformador de conexión a tierra tipo Zig-Zag, mantiene el voltaje nominal en condiciones normales de operación, así como cuando se produce una falla.

2.3. Parámetros Técnicos de un Transformador de Puesta a Tierra Zig-Zag

Para especificar un transformador de puesta a tierra, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

2.3.1 Voltaje en el primario.

El voltaje en el devanado primario es el voltaje nominal del sistema al que se va a conectar el transformador de puesta a tierra, es decir es el voltaje de línea a línea para el cual está diseñado el transformador. Es importante también especificar el nivel de impulso básico (BIL) correspondiente del transformador, característica que le permite soportar sobretensiones de frente rápido.

2.3.2 Corriente continua en el neutro

La corriente continua en el neutro se define como tres veces la corriente de fase o, en otras palabras, la corriente de secuencia cero. Para un sistema equilibrado este valor es cero. Sin embargo, se debe considerar que puede



circular una corriente de fuga a tierra que no es una función simétrica y su valor no debe activar los circuitos de protección. Este valor de corriente se obtiene de las pruebas de cortocircuito realizadas al modelo del sistema en el que se va a instalar el transformador.

2.3.3 Duración de la falla

La corriente de falla determina la capacidad térmica del transformador de puesta a tierra. Este valor de corriente es necesario para calcular el calentamiento durante el tiempo que dura la falla en el sistema y debe determinarse a partir de pruebas de cortocircuito realizadas al modelo del sistema en el que se va a instalar el transformador. Los valores típicos van desde unos cientos de amperios hasta unos pocos miles de amperios, con tiempos de duración expresados en segundos y no en ciclos.

La duración de la falla es un parámetro crítico para el diseño de transformadores, cuando los esquemas de protección utilizan un transformador de puesta a tierra, para las funciones de disparo se especifica una duración de tiempo relativamente corta (5 a 10 segundos). Por otro lado, cuando el transformador de puesta a tierra se utiliza para mostrar una alarma, se requerirá una mayor duración de la corriente de falla por el neutro del transformador.

2.3.4 Capacidad

La capacidad del transformador de puesta a tierra hace referencia a la potencia aparente trifásica. Esta potencia se calcula como se expresa en (2) [6].

$$S_x = \frac{V_{L-N} \times I_N}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

donde S_x es la capacidad del transformador e I_N es la corriente que circula por el neutro en condición de falla.

Cada devanado del transformador transporta un tercio de la corriente total que circula por el neutro y tiene un voltaje inferior al de fase, por lo que la potencia se reduce en un factor de raíz de tres.

Generalmente, para los transformadores de puesta a tierra se usa una clasificación de tiempo de 10 segundos a 1 minuto, aunque se pueden especificar otras clasificaciones como las sugeridas en la Norma AIEE para "Dispositivos de puesta a tierra neutra" [7]. Por esta razón, su tamaño y costo son menores que los de un transformador de servicio continuo de igual capacidad.

Al aplicar un factor de reducción K a la capacidad nominal de corto plazo del transformador de puesta a tierra, como se indica en (3), se obtiene una capacidad reducida que puede usarse para una estimación de precio.

Se sugiere una capacidad continua del 3% para una unidad con una clasificación de tiempo de 10 segundos.

$$S_k = S_x \times K \quad (3)$$

donde S_k es la capacidad trifásica reducida del transformador de puesta a tierra, S_x es la capacidad dimensionada de operación en presencia de falla y K es el factor de reducción para estimar el costo del transformador

2.3.5 Impedancia

La impedancia del transformador debe asegurar que los voltajes en las fases sanas se encuentren dentro de los límites de sobretensión temporal del transformador y de los equipos asociados; también se puede seleccionar la impedancia del transformador de puesta a tierra para limitar las corrientes de fallas a tierra.

Esta impedancia relaciona las magnitudes de voltaje y corriente presentes en el transformador cuando ocurre una falla a tierra y se determina a partir de estudios técnicos realizados en el modelo del sistema en conjunto con las expresiones (4) y (5), con una tolerancia de $\pm 2.5\%$ a casi un $\pm 10\%$ [8].

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{L-L}}{I_f} - Z_1 - Z_2 \quad (4)$$

$$Z_0 = \sqrt{(R_0 + 3 \cdot R_n)^2 + (X_0 + 3 \cdot X_n)^2} \quad (5)$$

donde I_f es la corriente de falla monofásica que circula por el neutro, Z_1, Z_2 son las impedancias de secuencia positiva y negativa, R_0 es la resistencia de secuencia cero, R_n es la resistencia de puesta a tierra conectada al neutro del transformador, X_0 es la reactancia de secuencia cero y X_n es la reactancia de puesta a tierra conectada al neutro del transformador.

2.3.6 Protecciones del transformador Zig-Zag

Al conectar un transformador de puesta a tierra Zig-Zag en un sistema aislado, se debe considerar la siguiente filosofía de protecciones:

- El sistema debe estar protegido ante cualquier falla producida en el transformador Zig-Zag.
- Es necesario una protección de respaldo que actúe cuando la protección primaria no pueda despejar la falla a tierra.
- La protección debe estar configurada de manera selectiva para evitar cortes innecesarios.

Cuando el transformador de puesta a tierra es la única fuente de tierra del sistema, siempre debe estar energizado. Es preferible que el transformador esté conectado directamente a la barra principal de un sistema de alimentación, sin interruptores o fusibles, para evitar que quede fuera de servicio inadvertidamente por la operación de los dispositivos que intervienen. De esta forma, el transformador se considera parte de la barra y está protegido por el relé de protección de la barra. Sin embargo, el transformador también puede ser energizado a través de un interruptor de alimentación dedicado.

El esquema de protección eléctrica para el transformador de puesta a tierra Zig-Zag está conformado por relés instantáneos de sobrecorriente conectados en delta y la protección de respaldo se proporciona mediante un relé de sobrecorriente temporizado conectado a un transformador de corriente en el neutro del transformador Zig-Zag.

La Fig. 4 muestra el esquema de protecciones de los generadores, transformadores de potencia y transformador Zig-Zag [9]–[14].

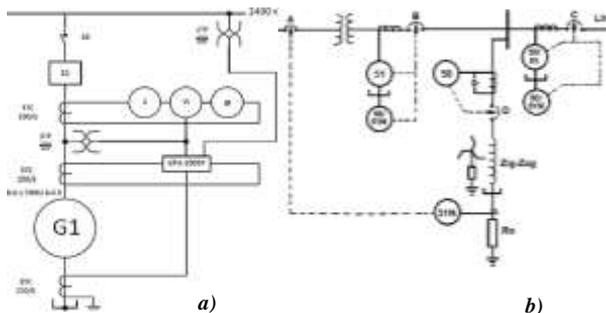


Figura 4: Esquema de protección: a) Generadores, b) Transformadores y Zig-Zag.

3. MODELACIÓN

3.1. Modelación de la Central Illuchi I

La Central Illuchi I está formada por 4 generadores en conexión estrella que generan un total de 5 MVA a un nivel de voltaje de 2.4 kV, este voltaje se eleva hasta 22 kV mediante 3 transformadores con conexión delta-estrella y una potencia de 1.75 KVA cada uno. La central se conecta con la subestación El Calvario a través de una línea de transmisión de tres hilos con una longitud de 9.5 km aproximadamente.

Los datos técnicos y eléctricos de la Central Illuchi I permiten modelar sus elementos en el software de análisis de sistemas de potencia Power Factory [9], [11], [15]–[18]. El modelo con todos los elementos que forman parte de la central se ilustra en la Fig. 5.

3.2. Punto de Conexión del Transformador Zig-Zag

El punto de conexión del transformador se lo establece en la barra de 22 kV de la subestación de elevación Illuchi I. En este punto, cuando una falla a tierra ocurre en la línea, por el neutro del transformador Zig-Zag circula una corriente de magnitud $3 \cdot I_0$ que permite la operación del relé de sobrecorriente y la apertura de todos los interruptores asociados a la línea.

La Fig. 6 muestra el diagrama unifilar simplificado de la Central Illuchi I con el transformador Zig-Zag conectado a la barra de 22 kV. A partir de este unifilar se desarrollan los diagramas respectivos de secuencias positiva, negativa y cero de tal manera que se pueda visualizar la configuración del sistema para cada secuencia de red al incluir el transformador Zig-Zag.

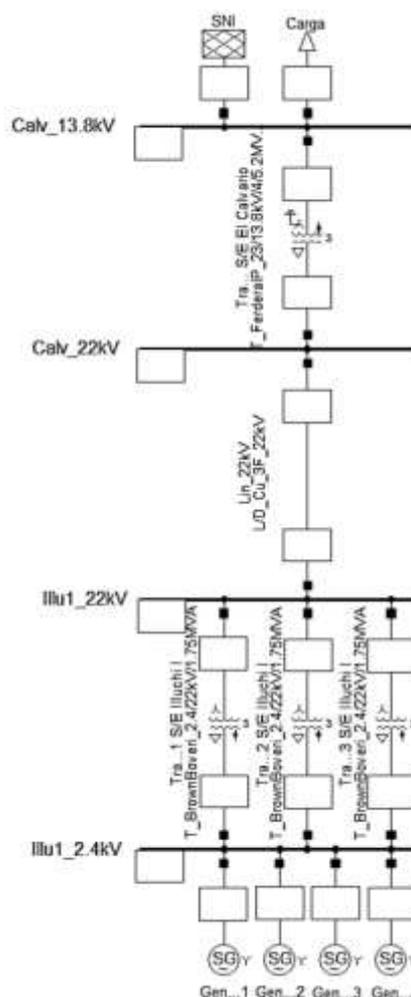


Figura 5: Modelo de la Central Illuchi I en Power Factory

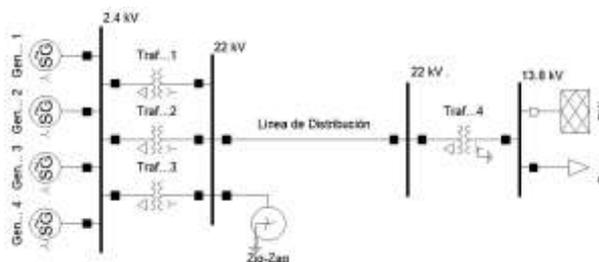


Figura 6: Unifilar de la Central Illuchi I con el transformador Zig-Zag

El diagrama de secuencia de la Fig. 7 muestra que el transformador de puesta a tierra es el único que tiene una conexión a tierra a través del neutro, de tal manera que la impedancia de secuencia cero se puede calcular estableciendo la corriente de falla a tierra máxima que circulará por el neutro y calculando las impedancias de secuencia positiva y negativa del sistema en el punto de conexión del transformador, como se expresa en (4) y (5).

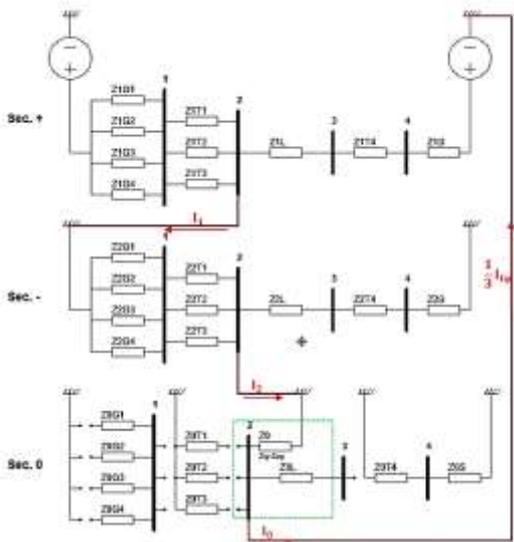


Figura 7: Conexión de las redes de secuencia de la Central Illuchi I cuando ocurre una falla monofásica en la barra 2 de 22kV

3.3. Modelación de transformador Zig-Zag

Para modelar el transformador Zig-Zag en Power Factory es necesario determinar sus parámetros eléctricos y en especial la impedancia de secuencia cero. Esta impedancia en particular relaciona muchos parámetros que influyen de manera directa e indirecta como son: el factor de puesta a tierra, la corriente máxima de falla, la resistencia externa de puesta a tierra conectada al neutro del transformador y las relaciones de impedancias en el punto de conexión. Por este motivo, se desarrolla un script en DPL que interactúa directamente con los elementos del modelo de la central Illuchi I y permite calcular los parámetros eléctricos del transformador Zig-Zag.

3.3.1. Estructura del script

La Fig. 8 muestra la estructura general del script programado en DPL, el cual relaciona entradas, salidas, intercambio de datos, objetos y las funciones creadas para calcular los parámetros eléctricos del transformador Zig-Zag que se muestra en la Fig. 9.



Figura 8: Diagrama general del script en DPL para calcular los parámetros eléctricos del transformador Zig-Zag

3.3.2. Configuración del script

La Fig. 10 muestra la configuración utilizada en el script. Se observa que el 60% de la corriente de falla trifásica se toma como valor mínimo y el factor de falla a tierra de referencia se configura con 1.3, ya que su valor básicamente dependerá del nivel de sobrevoltaje que se desee en las fases sanas durante la falla a tierra.

- Script\ZigZag_Z5ec0:

Name	Order	Type	Object modified	Object modified by
F_SCC	-1000000		10/12/2020 15:14:58	Joel Errazo
F_TZZ	-1000000		14/12/2020 12:27:35	Joel Errazo
F_ZXR	-1000000		17/12/2020 18:02:42	Joel Errazo
F_IJZ	-1000000		17/12/2020 18:21:35	Joel Errazo
F_WRITE	-1000000		17/12/2020 20:15:19	Joel Errazo
F_OUT	-1000000		17/12/2020 20:30:34	Joel Errazo
SCC	-1000000		21/1/2021 13:55:49	Joel Errazo
RES			16/12/2020 12:00:54	Joel Errazo
RES1			16/12/2020 11:43:54	Joel Errazo
RES2			11/12/2020 20:19:12	Joel Errazo

Figura 9: Funciones y objetos complementarios del Script

La corriente de falla máxima se asigna en función de la máxima corriente que los generadores pueden aportar durante una falla, de esta manera al considerar una corriente de falla máxima de 800 A en el punto de conexión del transformador, los generadores aportan un máximo del 120% de su corriente nominal.

Name: ZigZag_Z5ec0

General Selection: [v] [d]

Input parameters:

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	double	PorcentajeF3	60	%	Porcentaje de la corriente trifásica q...
2	double	FactorFT	1.3	-	Factor de falla a tierra de referencia...
3	double	Tolerancia	0.0001	-	Tolerancia de cálculos e iteraciones...
4	double	CorrienteFmax	800	A	Corriente de falla monofásica máxima...
5	int	FFSimetrico	1	-	Permite calcular los FFT iguales para...
6	double	ResPT	0.2	ohms	Resistencia de la malla de puesta a t...
7	int	TestOut	1	-	Muestra los cálculos en cada iteraci...

Figura 10: Condiciones iniciales usadas para determinar los parámetros eléctricos del transformador Zig-Zag

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Ejecución del Script

El script para el cálculo de los parámetros eléctricos del transformador Zig-Zag realiza los cálculos considerando los siguientes escenarios:

- Con transformador de puesta a tierra Zig-Zag
- Con transformador de puesta tierra Zig-Zag y resistencia de puesta tierra

Una vez ejecutado el script se muestra el reporte de la Fig. 11 en la ventana de salida de Power Factory. Esta muestra los parámetros eléctricos del sistema con y sin la conexión del transformador Zig-Zag, de esta forma se pueden comparar los parámetros eléctricos, verificar el funcionamiento y los cambios que produce el transformador de puesta a tierra en el modelo de la central Illuchi I. A continuación, se analizan los resultados obtenidos.

Escuela Politécnica Nacional													Joel Josué Erazo Monar			
Transformador ZigZag													Central Illuchi I			
Resultados en la barra de conexión del Transformador ZigZag: → Illul_22kV													https://www.linkedin.com/in/joel-erazo/			
Estado	Barra	Fase	U nominal [kV]	V fase [kV]	FFT	Sk" Potencia [MVA]	Ik" I falla [kA]	Secuencia+ R1 [ohm]	X1	Secuencia- R2 [ohm]	X2	Secuencia0 R0 [ohm]	X0	Realación X0/X1 R0/X1 R0/X0 [-]		
UGround	Illul_22kV	A	22.000	00.000	0.000	0.014	0.001	2.60	12.40	3.48	12.94	12.48	-37586.62	3032.09	1.01	0.00
		B	22.000	24.210	1.733	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	3.10	37.11	2.99	0.25	0.08
		C	22.000	24.214	1.733	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	3.10	37.11	2.99	0.25	0.08
+ZigZag	Illul_22kV	A	22.000	00.000	0.000	8.435	0.664	2.60	12.40	3.48	12.94	3.10	37.11	2.99	0.25	0.08
		B	22.000	18.031	1.276	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	3.10	37.11	2.99	0.25	0.08
		C	22.000	16.727	1.214	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	3.10	37.11	2.99	0.25	0.08
ZZ+Rext	Illul_22kV	A	22.000	00.000	0.000	10.161	0.800	2.60	12.40	3.48	12.94	5.30	25.81	2.08	0.43	0.21
		B	22.000	16.414	1.156	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	5.30	25.81	2.08	0.43	0.21
		C	22.000	15.930	1.154	0.000	0.000	2.60	12.40	3.48	12.94	5.30	25.81	2.08	0.43	0.21

Parámetros eléctricos del Transformador ZigZag: → ZigZag													Resistencia de P.T: 0.20 ohm			
Estado	Elemento	Fase	U nominal [kV]	3*I0 Ineutro [A]	Sx Potencia [MVA]	Tiempo de Falla [Seg]	Sk Potencia [kVA]	Inc Icontinuo [A]	Impedancia R [ohm /fase]	X	Z%	R ext [ohm]	X/R	Realación X/R [-]		
+ZigZag	ZigZag	ABC	22.00	664.72	4.87	10.00	146.09	19.92	3.090	37.078	1.123	0.000	12.00			
ZZ+Rext	ZigZag	ABC	22.00	800.55	5.87	10.00	176.00	24.00	2.149	25.794	0.941	1.047	12.00			

Figura 11: Reporte generado por el script con los parámetros eléctricos del transformador considerando factor de falla simétrico.

4.1.1. Sin transformador Zig-Zag

Con la finalidad de conocer el comportamiento inicial del sistema aislado ante una falla a tierra, el reporte de la Fig. 11 muestra el estado “UGround” para hacer referencia que los cálculos fueron realizados sin considerar la conexión del transformador Zig-Zag.

Al producirse la falla a tierra en la fase “a” de la barra de 22 kV de la subestación Illuchi I, los voltajes de fase a tierra en las fases sanas “b” y “c” incrementan su magnitud en un factor de 1.73 dando como resultado un valor de 24.21 kV, valores superiores al voltaje de línea de 22 kV. También se puede observar que la corriente de falla monofásica tiene un valor de cero ya que no existe una conexión a tierra; esto se evidencia con más claridad al ver el elevado valor de la impedancia de secuencia cero.

4.1.2. Con transformador Zig-Zag

El reporte de la Fig. 11 también muestra el estado “+ZigZag” que indica el comportamiento y los parámetros eléctricos del sistema con la conexión del transformador Zig-Zag.

Al considerar el valor de corriente inicial recomendado por [2] del 60% de la falla trifásica, se puede observar que los sobrevoltajes en las fases sanas “b” y “c” se reducen considerablemente, teniendo un factor de falla máximo de alrededor 1.28 para una corriente de falla monofásica de 664 A.

Por otro lado, se puede apreciar que el valor de la impedancia de secuencia cero se ha reducido considerablemente, dando como resultado una reactancia de 37.11 Ω y una resistencia de 3.10 Ω que corresponden a los valores de impedancia de secuencia cero del transformador Zig-Zag. También se observa que las impedancias de secuencia positiva y negativa no han cambiado su valor por la presencia del transformador y que las relaciones entre reactancias y resistencias de secuencia están dentro de los límites recomendados en [2], [19], [20].

4.1.3. Con transformador Zig-Zag y resistencia de puesta a tierra

El estado “ZZ+Rext” del reporte de la Fig. 11 muestra los cálculos realizados por el script cuando se considera la conexión del transformador Zig-Zag puesto a tierra a través de una resistencia conectada en el neutro.

Al considerar la resistencia de puesta a tierra de 1.047 Ω calculada por el script, los sobrevoltajes se reducen aún más, especialmente en la fase “b” con una magnitud de 16 kV y un factor de falla de 1.16.

4.2. Operación del Transformador Zig-Zag ante Fallas a Tierra en la barra de 22kV

Al producirse una falla monofásica en la barra de 22kV de la subestación Illuchi I (ver Fig. 12b) en cada uno de los devanados del transformador Zig-Zag circula una corriente de secuencia cero de 267 A.



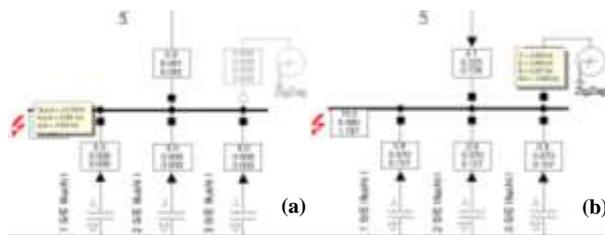


Figura 12: Falla monofásica en la barra de 22kV: (a) Sin transformador Zig-Zag. (b) Con transformador Zig-Zag

Las Fig. 13a y Fig. 13b muestran la influencia del transformador Zig-Zag al producirse la falla. Se puede observar que con la conexión del transformador de puesta a tierra el sobrevoltaje producido por la falla desciende de 1.9 a 1.2 p.u. aproximadamente en las fases sanas.

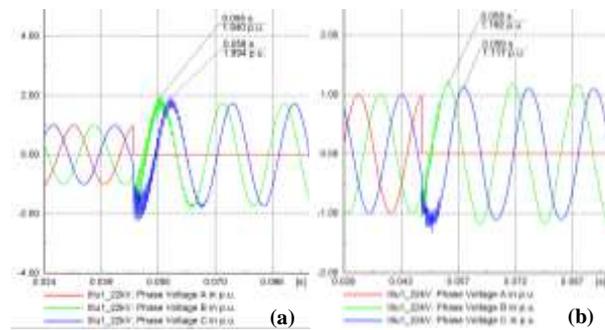


Figura 13: Voltajes de fase en p.u. durante una falla monofásica: (a) Sin transformador Zig-Zag. (b) Con el transformador Zig-Zag

4.3. Operación del Transformador Zig-Zag ante Fallas a Tierra en la Línea de Transmisión

Para una falla monofásica al 50% de la línea como muestra en la Fig. 14, el transformador Zig-Zag opera con corrientes de secuencia en los devanados del transformador Zig-Zag de 205 A.

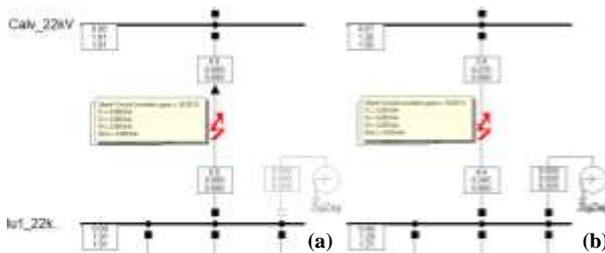


Figura 14: Falla monofásica al 50% de la línea: (a) Sin transformador Zig-Zag. (b) Con transformador Zig-Zag

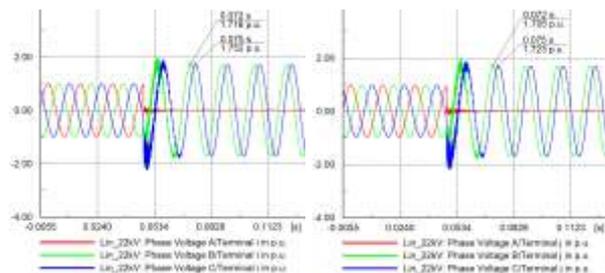


Figura 15: Voltajes de fase en p.u. durante una falla monofásica en la línea de transmisión sin transformador Zig-Zag

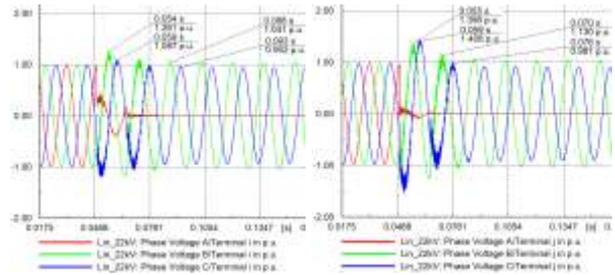


Figura 16: Voltajes de fase en p.u. durante una falla monofásica en la línea de transmisión con transformador Zig-Zag

La comparación de los voltajes presentados en la Fig. 15 y Fig. 16 evidencia de forma clara la reducción de los sobrevoltajes ante una falla a tierra, en el caso del sistema aislado los voltajes de fases sanas bordean el 1.73 p.u., en tanto que en el sistema puesto a tierra a través de un transformador Zig-Zag los sobrevoltajes se reducen a valores del orden de 1.2 p.u.

4.4. Coordinación de Protección de Sobrecorriente

4.4.1. Corrientes de ajuste para los generadores

La corriente de ajuste para la protección 51P de los generadores 1 y 2 se establece como el 110% de la corriente nominal de la máquina. Para este caso, en el que la corriente nominal es de 210 A, el 110% es 231 A.

Para el ajuste de la protección 51P de los generadores 3 y 4 se emplea un 110% de la corriente nominal que corresponde a 462 A. Las protecciones de sobrecorriente instantáneas 50P se ajustan con una corriente aproximada de 300% de la corriente nominal. Para las protecciones de los generadores 1, 2 y 3, 4 las corrientes de ajuste instantáneo son de 630 A y 1260 A respectivamente. Estos valores también se los puede definir como la relación porcentual entre la corriente simétrica de falla mínima cuando se produce una falla en el punto más alejado de la línea.

4.4.2. Corrientes de ajuste para los transformadores

Para el ajuste de la protección de sobrecorriente 51P de un transformador de potencia, se considera que el valor de corriente a ser programado debe ser mayor que la corriente de magnetización y la corriente de sobrecarga. El ajuste de la protección temporizada se define en 150% de la corriente nominal del transformador de potencia, en este caso dado que la corriente nominal es de 420 A, el 150% corresponde a 630 A.

La protección de sobrecorriente instantánea 50P se configura con una corriente de ajuste de 1,403 A que corresponde a la máxima corriente simétrica de falla externa producida.

4.4.3. Corrientes de ajuste para la línea de transmisión

En función de las corrientes de falla obtenidas en las pruebas de cortocircuitos, la corriente mínima de falla necesaria para el ajuste de la protección 51P no es mayor

que la de demanda máxima, por tal motivo, se realiza el ajuste sumando a la corriente de demanda máxima un porcentaje adicional, valor que resulta en 200 A. Así mismo, la corriente de ajuste para la protección 51N es la mínima corriente de falla 3Io, cuyo valor es 100 A.

La protección de sobrecorriente 50P se ajusta con la corriente máxima de cortocircuito producida al generar una falla al 80% de la línea, este valor corresponde a 500 A. Del mismo modo, la protección 50N se ajusta con la máxima corriente de falla 3Io, cuyo valor es 800 A.

La Fig. 17 muestran las curvas configuradas en las protecciones de sobrecorriente correspondientes de los generadores y transformadores.

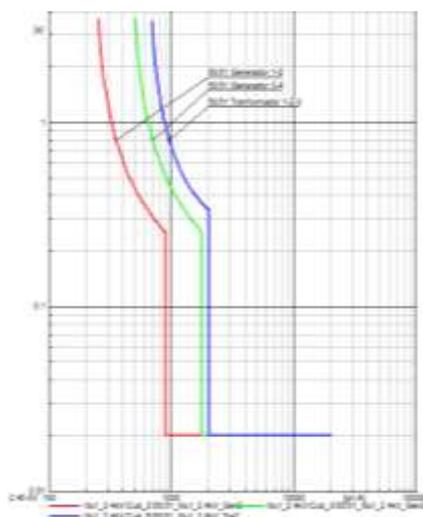


Figura 17: Curvas de las protecciones 50/51 configuradas para las protecciones de los generadores y transformadores.

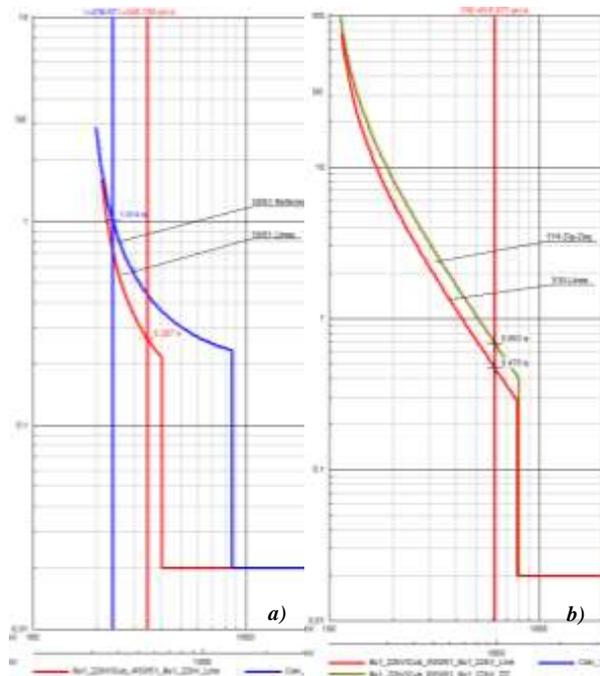


Figura 18: Curvas de ajuste configuradas para la línea y el transformador Zig-Zag: a) 50/51, b) 50N/51N

La Fig. 18 muestra las curvas configuradas para la línea de transmisión y el transformador Zig-Zag; además, muestra el tiempo de operación cuando se produce una falla al 50% de la línea.

4.5. Especificación Técnica del Transformador Zig-Zag

La especificación técnica hace referencia a las partes básicas del transformador: tanque principal, partes activas, terminales, sistemas de enfriamiento, accesorios, sistemas y equipos de conservación de aceite, protección, control y monitoreo; y, cualquier otro componente para su correcto funcionamiento y su futura construcción.

Para definir las especificaciones técnicas y los requerimientos del transformador, es necesario incluir estándares internacionales y estándares nacionales; por tal razón, se toma como referencia principal los estándares: IEC 60071-1, IEC 60071-2, IEC 60076-1, IEC 60076-2, IEC 60076-3, IEC 60076-5, IEC 60076-8, IEC 60137.

Con los datos obtenidos por el script y la guía referencial de las normas enumeradas, se realiza la especificación técnica del transformador Zig-Zag que se muestra en la Fig. 19.

4.6. Evaluación de Costos - Beneficios

4.6.1. Costos

El valor referencial de la inversión inicial del proyecto considera tanto costos fijos como variables dentro de los cuales constan: el transformador Zig-Zag, la resistencia de puesta a tierra, la malla de puesta a tierra, los equipos de maniobra, la obra civil, la mano de obra, etc.

El precio del transformador Zig-Zag se lo estima en base a la potencia continua de operación con un incremento del 20% por las características especiales de fabricación. El precio de los equipos y servicios adicionales se cotiza de acuerdo con el valor promedio en el mercado [21], [22].

4.6.2. Beneficios

La justificación técnica y económica del proyecto de puesta a tierra de Central Illuchi I mediante un transformador Zig-Zag se define considerando las siguientes ventajas:

- Ventaja técnica: reducir los niveles de sobrevoltajes, corrientes de falla e incrementar la vida útil de los elementos y equipos de la Central. Adicionalmente, permitirá la coordinación del sistema de protecciones y evitará la salida innecesaria de elementos de la red.
- Ventaja económica: representará un ahorro en el mantenimiento de los equipos y reducirá los tiempos de indisponibilidad de la Central.



#	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	REQUERIMIENTO
1 DATOS GENERALES			
	Fabricante	-	
	Tipo de transformador	-	Zig-Zag
	País de fabricación	-	
	Normas de fabricación	-	IEEE Std. 32 / IEC60076
2 CONDICIONES DE INSTALACIÓN			
	Ubicación	-	S/E Illuchi I
	Lugar de instalación	-	Exterior
	Altitud	m.s.n.m	3370
	Zona sísmica	-	< 0.3 g
	Temperatura máxima	°C	22
	Temperatura mínima	°C	8
	Humedad relativa	%	80
	Grado de contaminación	-	Leve - nivel I
	Viento máximo	km/h	12.7
3 DATOS NOMINALES			
	Potencia nominal de operación continua	kVA	250
	Número de fases	-	3
	Frecuencia nominal	Hz	60
	Conexión de los devanados	-	Zig-Zag
	Requerimiento de devanado secundario	-	No
	Voltaje nominal de servicio (Un)	kV	22
	Voltaje Fase-Tierra	kV	12.7
	Voltaje máximo de equipamiento (Um)	kV	24
	Voltaje soportado a frecuencia industrial, I _{min}	kV	66
	Voltaje soportado a un impulso tipo rayo 1,2/50	kV	165
	Número de terminales	-	4
	Corriente de operación continua por fase	A	8
	Corriente de operación continua por el neutro	A	24
	Corriente de falla/fase (corta duración - 10 seg.)	A	270
	Corriente de falla/neutro (corta duración - 10 seg.)	A	800
	Tiempo de falla	seg.	10
	Impedancia de secuencia cero	Ω/fase	25
4 LÍMITE DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA			
	Aceite	°C	60
	Devanados / Devanados punto más caliente	°C	65 / < 75
5 PINTURA Y PROTECCIÓN			
	Color de la pintura	-	RAL 600
	Espesor de la pintura	µm	30
	Tratamiento anticorrosivo para partes no pintadas	-	Si
6 ACCESORIOS DEL TANQUE			
	Válvulas de drenaje y filtrado	-	Si
	Válvulas para muestreo de aceite de tanque	-	Si
	Válvulas de aislamiento de radiador	-	Si
	Relé buchholz	-	Si
	Válvulas de seguridad	-	Si
	Soporte para pararrayos	-	Si
	Cáncamos de izaje	-	Si
	Terminal de puesta a tierra del tanque	-	Si
	Ruedas orientadas a 90°	-	Si
	Desecador de sílicagel	-	Si
	Indicador de nivel de aceite	-	Si
	Indicador de temperatura	-	Si
	Indicador de temperatura de devanados	-	Si
	Dispositivo para liberar presión	-	Si
	Tanque de expansión de aceite dieléctrico	-	Si
7 PLACA CARACTERÍSTICA			
	Tipo de transformador	-	Si
	Nombre del fabricante	-	Si
	Número de serie	-	Si
	Año de fabricación	-	Si
	Número de fases	-	Si
	Enfriamiento	-	Si
	Clase de aislamiento	-	Si
	Nivel de aislamiento	-	Si
	Potencia de servicio continuo	kVA	Si
	Voltaje nominal	kV	Si
	Corriente continua por el neutro	A	Si
	Elevación de temperatura en el Cobre	°C	Si
	Potencia de servicio de corta duración	kVA	Si
	Tiempo de operación	seg.	Si
	Corriente de corta duración por el neutro	A	Si
	Temperatura máxima de corta operación	°C	Si
	Impedancia de secuencia cero	ohm/fase	Si
	Volumen de aceite	ltr.	Si
	Peso del aceite	Kg	Si
	Peso total	Kg	Si
	Normas de fabricación	-	Si
	Conexión	-	Si
8 PRUEBAS			
	Pruebas de rutina (IEC 60076-1)	-	Si
	Prueba de incremento de temperatura (IEC 60076-2)	-	Si
	Pruebas dieléctricas (IEC 60076-3)	-	Si
	Pruebas de cortocircuito (IEC 60076-5)	-	Si
	Medida de la impedancia de secuencia cero	-	Si
	Medida de aislamiento entre devanado y tierra	-	Si

Figura 19: Especificación y requerimientos para la fabricación del transformador de puesta tierra Zig-Zag



En la central Illuchi I la energía real no producida por fallas es del 2.39%; una disminución del 0.5% en la ocurrencia de fallas, representaría un ahorro referencial anual de 15,000.00 dólares; así mismo, una disminución del 10% en el tiempo de restablecimiento del servicio de la central produciría un ahorro referencial anual de 25,000.00 dólares; en conjunto por la operación del transformador Zig-Zag se podría ahorrar un total de 40,000.00 dólares anuales [10], [23], [17], [24].

4.6.3. Índices de rentabilidad

Los índices de rentabilidad reflejan la viabilidad de un proyecto, en este contexto se realiza el cálculo del valor presente neto, la tasa interna de retorno y la relación costo beneficio tomando como referencia un tiempo de 20 años y una tasa de interés del 10%.

Para el cálculo del valor presente neto, los beneficios anuales son traídos a valor presente lo que da como resultado 340,542.55 dólares, valor al que se debe restar la inversión inicial de 74,900.00 dólares, dando como resultado un valor presente neto de 265,642.55 dólares.

Una vez determinados los valores de inversión y los beneficios anuales del proyecto, se procede a calcular la tasa interna de retorno (TIR) y la relación costo beneficio dentro del tiempo determinado de 20 años, estos valores corresponden al 53% y al 4.55 respectivamente.

Por último, se determina el periodo de recuperación del capital, el cual cuantifica el valor de la inversión inicial total del proyecto siendo este de 2.2 años.

La Tabla 1 muestra los indicadores de rentabilidad calculados para este caso en particular.

Tabla 1: Indicadores de Rentabilidad

DESCRIPCIÓN	INDICADOR	
Valor Presente	VP	\$ 340,542.55
Valor Presente Neto	VPN	\$ 265,642.55
Tasa Interna de Retorno	TIR	53%
Índice de Rentabilidad	B/C	\$ 4.55
Periodo de Recuperación del Capital	RC	2.2
		años

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El transformador de puesta a tierra en Zig-Zag es una opción adecuada para colocar a tierra sistemas aislados, ya sea directamente o a través de una resistencia de puesta a tierra. Esto se debe a que cada fase del transformador Zig-Zag tiene dos devanados idénticos que se enrollan en direcciones opuestas para dar una alta impedancia a las corrientes de fase normales y una baja impedancia a las corrientes de falla a tierra. La baja impedancia de secuencia cero del transformador Zig-Zag se traduce en una alta capacidad de soportar corrientes de falla, haciendo de este método eficiente y robusto.

La modelación del sistema en Power Factory, el estudio de cortocircuitos y la automatización de los cálculos mediante un script programado en lenguaje DPL, permitió relacionar un conjunto de parámetros y límites preestablecidos y así obtener como resultado los parámetros eléctricos del transformador de puesta a tierra Zig-Zag.

El transformador Zig-Zag operará únicamente cuando existan grandes desbalances ocasionados por fallas a tierra. En condiciones de operación normal, el transformador de puesta a tierra solamente toma la corriente necesaria para su magnetización.

Con la conexión del transformador de puesta a tierra se logrará reducir los sobrevoltajes transitorios producidos por las fallas a tierra desde valores del orden de 1.7 p.u. a 1.2 p.u., de esta manera se extenderá la vida útil del aislamiento de los elementos y las máquinas.

La máxima corriente de falla que puede circular por el neutro del transformador Zig-Zag se puede especificar desde las condiciones iniciales de cálculo en el script, de esta manera se reducen también las corrientes que circulan en el punto de falla y en los demás equipos primarios del sistema.

El esquema de protecciones del transformador debe tener una configuración de operación separada, para que una falla en el transformador de puesta a tierra no impida la operación de la central. De esta manera, se reducen los costos por indisponibilidad, ya que el transformador de puesta a tierra tiene una construcción especial y su reparación o fabricación requieren más tiempo que un transformador convencional.

El nuevo ajuste del sistema de protecciones de sobrecorriente y su respectiva coordinación aseguran mejor selectividad y sensibilidad ante diferentes eventos y tipos de falla que ocurran tanto en las barras como en la línea de transmisión.

El cálculo de los índices financieros muestra que el valor presente neto (VPN) es positivo, la tasa interna de retorno (TIR) es mayor que la tasa activa de interés considerada del 10% y la relación beneficio/costo es mayor que uno, por lo que el proyecto sería viable bajo las condiciones estipuladas en los cálculos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. B. Griscom, "Grounding of Power System Neutrals," in *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 5th ed., ABB Power T&D Company Inc., Ed. Raleigh, North Carolina: Electric System Technology Institute, 1997, p. 643.
- [2] S. G. Zipse Donald W., "System Grounding," in *IEEE std 142, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, 3 Park Avenue, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007, pp. 4, 5.
- [3] E. R. Detjen and K. R. Shah, "Grounding Transformer Applications and Associated Protection Schemes," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, 1992.
- [4] T. A. Short, "Grounding Transformers," in *Electric Power Distribution Handbook*, C. PRESS, Ed. 2004, pp. 90, Chapter 4.
- [5] K. R. Hameed, "Zig-Zag Grounding Transformer Modeling For Zero-Sequence Impedance Calculation Using Finite Element Method," *Eng. Sci.*, vol. 8, pp. 63–87, 2015.
- [6] IEEE C62.92.4-1991, *Guide for the Applications in Electrical Utility Systems*. 1991, pp. 1–31.
- [7] J. E. Hobson and R. L. Witzke, "Power Transformers and Reactors," in *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 5th ed., ABB Power T&D Company Inc., Ed. Raleigh, North Carolina, pp. 120, Table 12.
- [8] IEC 60076-8, *Power transformers – Part 8: Application Guide*.
- [9] J. Coronel and Y. Rivas, "Modelación de la C.H. Illuchi I," in *Análisis Técnico Económico de la Conveniencia de Cambio del Sistema Aislado de Tierra a un Sistema Puesto a Tierra en la C.H. Illuchi I*, 2008, pp. 53, Fig.2.18.
- [10] M. F. Freire Calero, "Estudio Técnico Económico de la Implementación del Centro de Control de las Centrales Hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2 de ELEPCO S.A.," *Escuela Politécnica Nacional*, 2007.
- [11] J. A. Esparza Gualli and W. P. Olalla Trujillo, "Metodología para la Calidad de Servicio Técnico de la Empresa Eléctrica Cotopaxi," 2001.
- [12] J. Erazo and H. Arcos, "Estudio Técnico Económico para el Diseño y Dimensionamiento de un Transformador Tipo ZigZag para Puesta a Tierra en la Central de Generación Illuchi 1 de ELEPCO," *Escuela Politécnica Nacional*, 2021.
- [13] ABB, *Unidad de Protección de Generadores GPU2000R*.
- [14] ABB, *TPU2000R Unidad de Protección de Transformadores*.
- [15] D. Correa Masache, "Modelación y Simulación del Grupo de Generación de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1," 2007.
- [16] W. Gallo Pérez and L. Guamangallo Panchi, "Análisis de Cargabilidad del Sistema de Subtransmisión a Nivel de 69kV Considerando la Incorporación Masiva de las Cocinas de Inducción para la Demanda Proyectada al año 2020, en la Zona Centro Norte de ELEPCO S.A.," 2015.



- [17] ELEPCO, “Plan General de Negocios, Expansión e Inversión,” Latacunga, 2019.
- [18] C. W. Aguirre Cárdenas, “Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica Utilizando el Software Power Factory 13.1 de DigSilent,” 2008. .
- [19] IEC-60071, “Insulation Coordination,” 2018.
- [20] CFE L0000-06, “Coordinación de Aislamiento,” 2019, pp. 7–8, Figure 1, 2.
- [21] Siemens Perú, “Lista de Precios 2020,” pp. 12–137, 2020.
- [22] NEC, “Índice de Precios de la Construcción,” 2021. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/indice-de-precios-de-la-construccion/>.
- [23] CENACE, “Informe Anual 2020,” Quito, 2020.
- [24] ELEPCO, “Rendición de Cuentas 2019,” Latacunga, 2019.



Joel Erazo Monar. - Nació en Los Ríos en 1996. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2021. Actualmente brinda sus servicios profesionales como operador de la subestación eléctrica El Inga de 500/230/138 kV. Sus áreas de interés están relacionadas con la modelación, control y operación de sistemas eléctricos de potencia, así como las Energías Alternativas y la Movilidad Eléctrica.



Hugo Arcos Martínez. - Nació en Quito en 1972. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan en 2003. Ha desarrollado su carrera profesional en diversas instituciones del Sector Eléctrico Ecuatoriano y actualmente se desempeña como Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Modelación en Sistemas Eléctricos de Potencia, Estudios de Transitorios Electromagnéticos y Electromecánicos; y Confiabilidad de SEP.