

Estudio del Sistema de protección de una línea de transmisión del Sistema Interconectado Nacional de la ANDE

Juan Insfran, Matias Aguilar, Mario Arévalo

Universidad del Cono Sur de las Américas, ANDE

Paraguay

● RESUMEN

El fundamento principal de esta investigación se basa en la implementación de mejoras al sistema de protección actual de las líneas de transmisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN), mediante un diagnóstico realizado a través del análisis de sus componentes y equipos, generando la optimización del tiempo y de los recursos disponibles de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), como también mejorar los tiempos de restablecimiento y aumentar la calidad del servicio brindado obteniendo de esta manera selectividad y rapidez en la protección. Tomando como datos de referencia los registros de las protecciones de las líneas a ser estudiadas del SIN del Paraguay proporcionada por la ANDE y de esta manera hacer el estudio correspondiente para desarrollar el diagnóstico tanto de la selectividad, seguridad y velocidad de las protecciones de la línea a ser estudiada.

Es por eso que en este estudio se abordará el análisis de las protecciones implementadas en la línea de transmisión del SIN de la ANDE, junto con el análisis de las fallas y el despeje de las mismas. Se analizarán los impactos técnicos y económicos referentes a la implementación de ciertas funciones de protecciones. Por esos motivos es que este estudio permite obtener selectividad y coordinación de las protecciones de la línea a ser protegida a fin de hacer frente a las fallas que puedan ocurrir dentro de la línea como también deberá ser lo suficientemente sensible para aislar la línea bajo falla, siempre que sea posible deberá proveer respaldo remoto a los equipos adyacentes al proyecto y adecuada coordinación con los dispositivos de protección de los mismos.

● PALABRAS CLAVES

Sistema de protección, Sistema Interconectado Nacional, Selectividad, Línea de Transmisión, Coordinación de las prote

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión son componentes importantes de los sistemas eléctricos de potencia. En ocasiones puede producirse una falla en las líneas de transmisión ya sea por factores ambientales como también fallas en los equipos, sobrecargas, cortocircuitos, entre otros. Existen principalmente dos pasos necesarios que la ANDE debe hacer con respecto a este fallo.

El primer paso es la protección, que aísla la falla del resto de la red eléctrica lo antes posible, para garantizar la seguridad del personal, minimizar los daños y evitar problemas de estabilidad del sistema eléctrico.

El segundo paso es la localización de la falla, que identifica la ubicación exacta de la misma, para minimizar el tiempo de búsqueda y reducir el tiempo total de interrupción.

El proyecto plantea como situación de investigación el análisis del sistema de protección actual de las líneas de transmisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN) mediante un diagnóstico realizado a través del análisis de sus componentes asociados.

El fundamento principal de esta investigación se basa en la implementación de mejoras al sistema de protección actual de las líneas de transmisión del SIN mediante un diagnóstico realizado a través del análisis de sus componentes y equipos, generando la optimización del tiempo y de los recursos disponibles de la ANDE, como también mejorar los tiempos de restablecimiento y aumentar la calidad del servicio brindado obteniendo de esta manera selectividad y rapidez en la protección

2. SISTEMA DE PROTECCIÓN

Los sistemas de protección en los sistemas eléctricos de potencia son mecanismos utilizados dedicados a detectar fallas en los elementos protegidos de los sistemas eléctricos de potencia. Su función es detectar y minimizar las consecuencias de estos fallos y/o malfuncionamientos evitando la destrucción parcial o total de los equipos o de las instalaciones dado que los sistemas eléctricos de potencia funcionan en diferentes estados en donde pueden producirse diferentes escenarios de fallas.

2.1. OBJETIVO DE LA PROTECCIÓN

- Proteger efectivamente a las personas y los equipos.
- Reducir la influencia de las fallas sobre las líneas y los equipos.
- Cubrir de manera ininterrumpida el Sistema de Potencia (SP), estableciendo vigilancia el 100% del tiempo.
- Detectar condiciones de falla monitoreando continuamente las variables del SEP (I, V, P, f, Z).

La (figura 1) muestra el proceso que sigue la señal de falla desde que es detectada por los transformadores de medida hasta que se produce el aislamiento de la falla y los equipos que intervienen.[1]

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

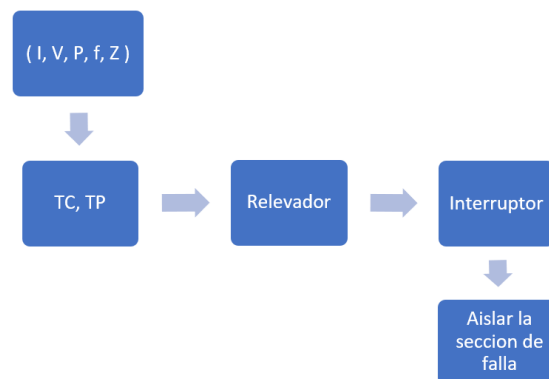


Figura 1- Proceso de la señal de falla y los equipos que intervienen

2.2. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las líneas son los elementos del sistema eléctrico que interconectan dos o más subestaciones como también son el punto de unión entre las diferentes partes del sistema de potencia por lo tanto están sometidos permanentemente a las fallas como son los cortocircuitos entre fases y a tierra y las consecuencias de los fenómenos meteorológicos, por tal razón es importante su protección en donde una protección de línea debe garantizar que se eliminen todos los defectos tan rápido como sea posible, a la vez que se cierre una sola sección, de la menor longitud posible para no afectar la continuidad del servicio de las otras zonas

Equipos asociados a la línea de transmisión:

- Relé IED(Intelligent electronic device)
- Transformadores corrientes TC's
- Transformadores tensión TP's
- Interruptores

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

3. DIAGNÓSTICO

3.1. Ajuste de las protecciones de la LT VHA-LIM del SIN de la ANDE

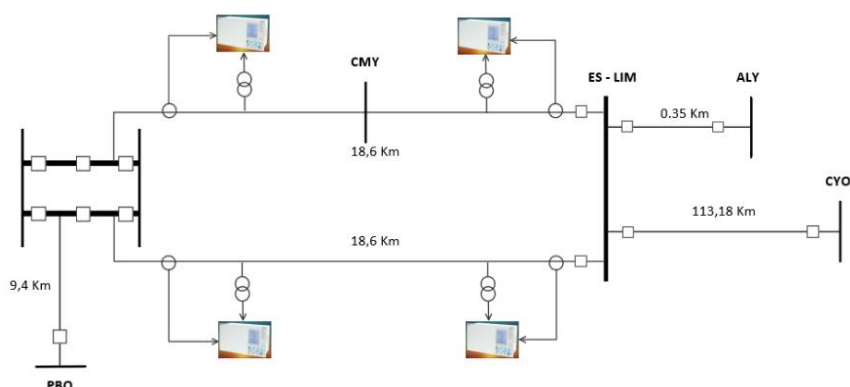


Figura 2-Diagrama de un sistema de protección típico

Tiene como fin describir y analizar los distintos componentes que conforman el sistema de protección que fueron implementados para esta línea en estudio ES-VHA a ES-LIM, a fin de resaltar la importancia de ellas para el despeje de las fallas.

Estos sistemas de protección deben de estar diseñados para identificar la ubicación de fallas y aislar solo la sección con falla. El desafío clave para la protección de la línea de transmisión radica en detectar y aislar de manera confiable las fallas que comprometen la seguridad del sistema.

Cualquier falla, si no se detecta y se aísla rápidamente, se convertirá en una cascada de perturbaciones en todo el sistema, lo que provocará interrupciones generalizadas en un sistema estrechamente interconectado que opera cerca de sus límites por ende los factores más detallados para la protección de la línea de transmisión abordan directamente la confiabilidad y la seguridad para una aplicación específica, es por eso que el sistema de protección seleccionado debe proporcionar redundancia para limitar el impacto de la falla del dispositivo y protección de respaldo para garantizar la confiabilidad. Para el despeje correcto de la falla es necesario que el relé y el conjunto de elementos que conforma el sistema de protección cumplan con los requerimientos fundamentales de la filosofía de protección, tales como confiabilidad, velocidad, selectividad, seguridad, sensibilidad y simplicidad, de manera de que las fallas ocurridas dentro del sistema tengan una mínima duración desconectando una sección mínima del circuito para aislar la falla y garantizar la continuidad del suministro eléctrico.

3.2. Funciones de protecciones aplicadas

Las funciones de protección aplicadas en este proyecto son seleccionadas conforme a las variables eléctricas disponibles y más efectivas a la hora de discriminar condición normal de operación VS condición de falla, teniendo en cuenta la filosofía utilizada en ANDE a lo largo de los años. Las simulaciones de cortocircuito contemplan la configuración de red utilizada por mayor tiempo.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Se utiliza el concepto de protección primaria y secundaria en el terminal con relés idénticos y ajustados con las mismas funciones de protección y configuración. Estos relés operarán sin temporización adicional para fallas internas a la línea a ser protegida. [2]

A continuación, se contempla los ajustes de las funciones de protección de los relés que se describen a seguir:

COD	DESCRIPCIÓN
87L	Protección diferencial porcentual
21/21N	Protección de distancia
50HS	Switch Onto Fault
FF	Fuse Failure
RFLO	Localizador de falla
PTOC 51/67	Sobrecorriente de fase direccional
51N/67N	Función de sobrecorriente residual
50Stub	Stub protection
59	Overvoltage Protection
27	Undervoltage Protection
79	Reconexión Automática
25	Sincronismo
94	Tripping Logic
85	schm POTT (21)
85	schm POTT (67N)

Tabla 1-funciones aplicadas

4. ANÁLISIS DE LAS FALLAS EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

No importa como un sistema fue proyectado y construido, siempre ocurrirán fallas en el sistema eléctrico, y esas fallas pueden representar riesgos a la propiedad y/o a la vida. Es poco práctico poder evitar las consecuencias de eventos naturales y accidentes físicos; como fallas del equipo, o mala operación debido a errores humanos. Muchas de estas fallas resultan de: descuidos, conexiones accidentales o descargas entre conductores de fase o de fase a tierra.

4.1. Causa de las fallas comunes en las LTs

Las líneas de transmisión están expuestas a las acciones de la intemperie, descargas atmosféricas incendios, objetos, vegetales, animales y errores humanos o los propios defectos que conforma el sistema de protección, ya seas relés, transformadores de medida, cableados, dispositivos de interruptores de potencia y elementos auxiliares.

- **Condiciones climáticas:** Las condiciones meteorológicas son una de las causas de los fallos del sistema eléctrico que no se pueden evitar. Incluyen los rayos, la lluvia, la nieve y otras condiciones.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- Errores humanos: Otra causa de los fallos eléctricos es el error humano. Los cálculos inexactos conducen a una selección incorrecta de los dispositivos y equipos eléctricos, como los relés y los disyuntores. Además, los retrasos en los programas de mantenimiento también pueden afectar al rendimiento de los equipos, lo que lleva a reducir su rendimiento.
- Fallas de equipos: El rendimiento de los equipos eléctricos suele reducirse con la edad. Además, suelen producirse fallos de aislamiento. Esta reducción del rendimiento y el mal funcionamiento pueden provocar fallos de cortocircuito en el sistema. Lo que lleva a que fluya una corriente anormal a través de las líneas hacia los equipos, lo que los daña aún más.

4.1 Tipos de fallas

Las fallas eléctricas en los sistemas de potencia trifásicos se clasifican principalmente en cinco tipos, a saber, fallos de circuito abierto, sobrecarga, subtensión, sobretensión y de cortocircuito. Además, estos fallos pueden clasificarse en

- Fallas simétricas: La falla simétrica es una falla que afecta a las tres fases por igual, hace que fluya una corriente anormal en las líneas con la misma magnitud, pero diferente ángulo de fase con un desplazamiento de 120 grados. También se denomina fallo trifásico equilibrado.
- Fallas asimétricas El fallo asimétrico es un fallo que no afecta a las tres fases por igual. Hay tres tipos diferentes de fallos asimétricos que pueden producirse en el sistema eléctrico. Se describen a continuación.
 - Fallo monofásico a tierra (F-T): El fallo monofásico a tierra es un fallo que tiene lugar entre cualquier fase del sistema y tierra. Es el tipo de fallo más común que se produce en el sistema eléctrico, produce principalmente por la alta tensión transitoria inducida por rayos, ramas de árboles y caídas de árboles.
 - Fallo de fase a fase (F-F): El fallo de fase a fase es un cortocircuito que se produce entre dos fases cualesquiera del sistema.
 - Fallo fase - fase a tierra (F-F-T) :El fallo de fase a tierra tiene lugar entre dos fases cualesquiera del sistema y tierra. Es el segundo fallo más común en el sistema eléctrico, con un 6%.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

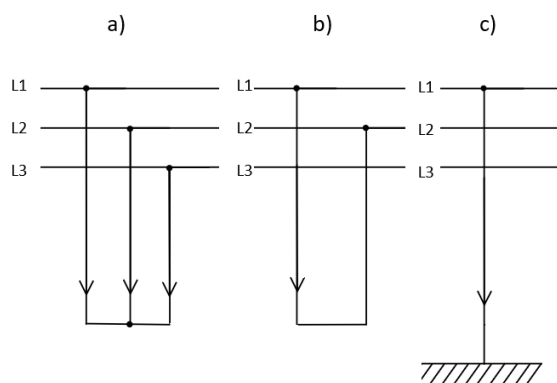


Figura 3- ejemplo de falla en el SEP

4.2 Consecuencias de las fallas al SEP

Cada tipo de falla afecta al funcionamiento del sistema eléctrico de forma diferente, algunos fallos son graves y pueden provocar un apagón. Otras pueden dañar un equipo, etc.

A continuación, se describe las consecuencias de las fallas mencionada:

- El flujo de corriente anormal: cuando se produce una falla de cortocircuito, crea un camino de muy baja impedancia para el flujo de corriente. Esta corriente de falla puede llegar a ser 10 veces superior a la corriente normal, lo que puede dañar el aislamiento de un equipo.
- Pérdida de equipos: debido a la alta corriente que pasa al equipo, podría dañarlo. Podría quemar el aislamiento y los devanados de los motores y transformadores, lo que conduce a un funcionamiento inadecuado de los equipos.
- Fuera de servicio del SEP protegido: aplicando un sistema de protección bien diseñado para despejar la falla, da como resultado la pérdida de los componentes protegidos. Dado que la zona en la que se produce la falla estará aislada, los componentes de esa zona se pierden y, con suerte, no se dañan. La pérdida de los componentes conduce a otros varios problemas en el sistema de energía, por lo que debilita el sistema.
- Problemas de estabilidad del sistema de energía: un sistema de energía está diseñado para involucrar el intercambio de energía entre los generadores y las cargas. Una falla interrumpe esta operación, por lo que el sistema eléctrico se vuelve inestable al cambiar los parámetros del sistema y la capacidad de transmisión de energía.
- Peligro para el personal: las fallas también ponen en peligro al personal ya que pueden causar choques a los trabajadores, estos choques difieren en su severidad. Dependiendo de la

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**

magnitud de la corriente y la tensión en el lugar de la avería. Puede causar la muerte en algunos casos

- Una falla que se produce en un lugar no sólo afecta en el lugar ocurrido, sino también a las zonas interconectadas cercanas. Estos circuitos interconectados cercanos también contribuyen a la corriente de fallo si no se cuenta con un buen sistema de protección.
- Incendios eléctricos: las fallas de cortocircuito provocan enormes chispas y fognazos, que a su vez ionizan el aire entre los conductores, lo que a veces provoca incendios.

4.3 Impacto técnico que tiene la implementación de las funciones de protección a las líneas de transmisión.

4.3.1 50HS Switch Onto Fault

La protección SOFT se utiliza para disparar una línea de transmisión cuando este cierra bajo una condición de falla. Proporciona una actuación de alta velocidad para el despeje de las fallas, por lo que implementar esta función en la protección de línea es fundamental para los casos que se citan a continuación [3].

- Después del mantenimiento de la línea de transmisión o de la bahía de línea en el patio de maniobras, es probable que el personal no elimine la puesta a tierra portátil. Para tal condición, se requiere un elemento de protección de muy alta velocidad para despejar la falla sin depender del disparo asistido por piloto o la lógica de comunicación entre relés.
- Errores humanos en la observación de una falla existente.

4.3.2 FF Fuse Failure

La función de supervisión de falla de fusible monitorea continuamente los circuitos de tensión CA entre los transformadores de potencial y el relé. Se pueden utilizar diferentes medidas para bloquear el funcionamiento no deseado de la protección de funciones dependientes de la tensión, como la función de verificación de sincronismo, protección de subtensión, protección de distancia y desbloquear las funciones de protección contra sobreintensidad, en caso de fallas en el circuitos secundarios de tensión CA[4]

4.3.3 RFLO Localizador de falla

Esta función permite que, en caso de presentarse fallas, este proporcione la ubicación de la falla en relación con la longitud total de la línea a proteger.

Esta información de la distancia a la falla es muy importante para aquellos involucrados en el funcionamiento y mantenimiento.

- Identificación de puntos débiles cuyo aislamiento puede fallar en el futuro, tras la aparición de fallos transitorios o despejados automáticamente.

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**

- La información fiable sobre la ubicación de la falta disminuye en gran medida el tiempo sin actividad de las líneas protegidas y aumenta la disponibilidad de las líneas del sistema eléctrico. [5]

4.3.4 50 Stub Stub protection

En topologías de interruptores múltiples como interruptor y medio, interruptor doble/doble barra o arreglos en anillo, que son típicos en las subestaciones de transmisión y subtransmisión.

- La protección de distancia principal permanece inoperativa para fallas entre dos conjuntos de transformadores de corriente cuando el equipo de potencia asociado (línea o transformador) se desconecta por mantenimiento, ya que los transformadores de tensión estarán en la sección desconectada.
- Una falla que ocurre entre el par de CT y el interruptor de desconexión sólo puede eliminarse después de un retardo de tiempo predefinido por la protección de respaldo de las líneas adyacentes principales, lo que puede comprometer seriamente la estabilidad del sistema de energía.
- La protección de ramal es una función de protección independiente que se requiere para abordar fallas en la sección de ramal cuando el interruptor de desconexión está abierto.
- Los interruptores automáticos correspondientes se pueden disparar sin demora, ya que la Protección Stub puede operar como una función de protección de la unidad según el principio diferencial [6]

5. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

En esta investigación se tomó como objeto de estudio al sistema de protección de la línea de transmisión del Sistema Interconectado Nacional de la ANDE, referente a **ES-LIM MEMORIA DE CÁLCULO DE AJUSTES DE LOS IEDS RED 670 ABB - LT 220 KV VHA-LIM**, se analizaron todos los equipos asociados para su posterior análisis e interpretación de datos.

Con el Estudio del Sistema de protección de una línea de transmisión, serán beneficiados en forma directa, la ANDE junto con los usuarios, ya que el objeto de estudio conlleva al análisis del sistema actual de protección una línea de la cual se formularán propuestas de mejoras para proteger los equipos asociados como también mejorar los tiempos de restablecimiento aumentando la calidad del servicio brindado y garantizando un funcionamiento confiable y seguro de la línea de transmisión.

Como se pretende recabar datos, analizarlos y finalmente formular propuestas de mejoras para el sistema de protección de una línea de transmisión del SIN teniendo en cuenta la factibilidad de la aplicación en un caso práctico y de esta forma dejar un precedente para análisis posteriores de las demás protecciones de las líneas de transmisión del SIN.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

● **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Castaño, S., *Protección de Sistemas Eléctricos*, José Samuel Ramírez Castaño, 2003, pag. 65.
- [2] ES-VHA MEMORIA DE CÁLCULO DE AJUSTES DE LOS IEDS RED 670 ABB - LT 220 KV VHA-LIM, Administración Nacional de Electricidad (ANDE). Departamento de Estudios Eléctricos-GT/DEL2 - Sección Estudios de Protecciones, Paraguay, 2020, pág. 9.
- [3] Switch on to Fault (SOTF). Hussnain, S., (2022, 02). <https://www.linkedin.com/pulse/switch-fault-sotf-shafqat-hussnain/>
- [4] Fuse failure supervision, ABB, (2022, 02), https://library.e.abb.com/public/c1256d32004634bac1256e16006e88c8/1MRK580034-BEN_en_FUSE__Fuse_failure_supervision.pdf, paginas:1-3.
- [5] TPU D500 Product Manual (1st ed.) Efacec, Portugal, (2016) pág. 229.
- [6] Stub protection., ABB, (2022, 04), https://library.e.abb.com/public/c1256d32004634bac1256e16006e818b/1MRK580022-BEN_en_STUB__Stub_protection.pdf, paginas:1-2.