



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE PROTECCIONES PARA LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN

Autor: Alfredo María de Ojeda Olloqui

Director: Julio Rafael Portillo García

Madrid, septiembre 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
"DISEÑO DE PROTECCIONES PARA LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA  
TENSIÓN"

la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Alfredo María Ojeda Olloqui    Fecha: 2-9-2022

NIF: 73411535C



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Rafael Portillo García    Fecha:

# ÍNDICE

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Criterios de protección del Sistema Eléctrico Peninsular Español .....</b>	<b>3</b>
1.1 Fundamentos de protección.....	3
1.2 Principios de medida .....	7
1.3 Normativa de aplicación .....	9
<b>Capítulo 2. Líneas de alta tensión .....</b>	<b>10</b>
2.1 Generalidades.....	10
2.1.1 Definición y parámetros .....	10
2.1.2 Circuito equivalente .....	11
2.1.3 Características y datos de partida .....	12
2.2 Línea aérea.....	14
2.2.1 Conductor .....	14
2.2.2 Cables de puesta a tierra .....	14
2.2.3 Aisladores .....	15
2.3 Línea subterránea .....	16
2.3.1 Partes del cable .....	16
2.3.2 Terminales .....	18
2.3.3 Cables de fibra óptica .....	19
2.3.4 Cables de puesta a tierra .....	19
<b>Capítulo 3. Descripción de las funciones de protección .....</b>	<b>20</b>
3.1 Funciones de protección más comunes .....	20
3.2 Protección de distancia.....	22
3.2.1 Definición.....	22
3.2.2 Principios de funcionamiento.....	22
3.2.3 Actuación del relé.....	23
3.2.4 Relación entre la tensión del relé y el SIR .....	24
3.2.5 Zonas de protección .....	24
3.3 Protección diferencial de línea .....	26
3.3.1 Definición.....	26
3.3.2 Principios de funcionamiento.....	26

3.3.3 Discriminador de faltas.....	29
<b>Capítulo 4. Análisis de las faltas.....</b>	<b>30</b>
4.1 Introducción.....	30
4.2 Cortocircuitos.....	30
4.2.1 Definición.....	30
4.2.2 Tipos de cortocircuito.....	31
4.3 Método de las componentes simétricas .....	33
4.4 Consecuencias de los cortocircuitos.....	35
4.5 Criterios de eliminación .....	35
<b>Capítulo 5. Diseño de una protección con relé SEL-411L.....</b>	<b>37</b>
5.1 Relé SEL-411L.....	37
5.2 Diseño de la protección de distancia.....	41
5.2.1 Introducción .....	41
5.2.2 Funciones.....	41
5.3 Diseño de la protección diferencial de línea .....	48
5.3.1 Instrucción .....	48
5.3.2 Funciones.....	48
5.3.3 Elementos diferenciales .....	52
<b>Capítulo 6. Objetivos de Desarrollo Sostenible .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica Intensidad-Tiempo de un sistema con selectividad de tiempo.....	5
Figura 2. Gráfica Intensidad tiempo de un sistema unitario.....	5
Figura 3. Gráfica Tiempo-Carga para distintos tipos de faltas [1] .....	6
Figura 4. Zonas de una protección de distancia [2].....	7
Figura 5. Circuitos equivalentes de una línea de transmisión [1].....	12
Figura 6. Componentes de los cables subterráneos [7] .....	17
Figura 7. Terminal premoldeado de composite [7] .....	18
Figura 8. Diagrama unifilar línea de alta tensión .....	21
Figura 9. Curvas características de protección de distancia .....	23
Figura 10. Circuito equivalente de línea con relé.....	24
Figura 11. Zonas de protección de distancia [9].....	25
Figura 12. Funcionamiento de protección diferencial [3] .....	26
Figura 13. Gráfica de polarización de doble pendiente [1] .....	27
Figura 14. Característica de operación de discriminador de faltas [10] .....	29
Figura 15. Cortocircuito monofásico.....	31
Figura 16. Cortocircuito bifásico sin conexión a tierra .....	31
Figura 17. Cortocircuito bifásico con conexión a tierra .....	32
Figura 18. Cortocircuito trifásico .....	32
Figura 19. Descomposición de un sistema en componentes simétricas [12] .....	33
Figura 20. Diagrama funcional relé SEL-411L [13] .....	37
Figura 21. Esquema de teleprotección POTT.....	39
Figura 22. Esquema de teleprotección PUTT.....	39
Figura 23. Zonas de protección en SEL-411L [13].....	41
Figura 24. Limitador de resistencia de un relé .....	45
Figura 25. Característica de operación AlphaPlane [13].....	49
Figura 26. Diagrama lógico de algoritmo de detección de falta externas SEL-411L ....	50
Figura 27. Línea con transformadores con protección 87L .....	51
Figura 28. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características conductor 337-AL1 (Gull) [5] .....	14
Tabla 2. Características cable OPGW [5].....	15
Tabla 3. Características aislador de vidrio [5].....	15
Tabla 4. Características cable de fibra óptica .....	19
Tabla 5. Corrientes de falta según tipo de cortocircuito.....	34
Tabla 6. Esquemas de teleprotección y sus funciones SEL-411L.....	40
Tabla 7. Ajustes zonas direccionalidad SEL-411L .....	42
Tabla 8. Ajustes elementos direccionales de tierra SEL-411L .....	42
Tabla 9. Ajustes de detección de transitorios SEL-411L .....	43
Tabla 10. Ajustes elementos mho de distancia a tierra SEL-411L .....	44
Tabla 11. Mejoras de la resistencia adaptativa [13] .....	45
Tabla 12. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia a tierra SEL-411L (I) .....	45
Tabla 13. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia a tierra SEL-411L (II) .....	46
Tabla 14. Ajustes elementos mho de distancia de fase SEL-411L .....	46
Tabla 15. Direccionalidad elementos de alta velocidad .....	47
Tabla 16. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia de fase SEL-411L .....	47
Tabla 17. Ajustes de los elementos diferenciales de fase .....	52
Tabla 18. Ajustes de los elementos diferenciales de secuencia negativa .....	52
Tabla 19. Ajustes de los elementos diferenciales de secuencia neutra .....	52

# INTRODUCCIÓN

Este proyecto consiste en el diseño de las protecciones para dos líneas de alta tensión de 220 kV: una línea aérea y una línea subterránea. Para la línea aérea se utilizará una protección de distancia (21 código ANSI), y para la subterránea una protección diferencial de línea (87L código ANSI). Para ello se empleará el relé SEL-411L, de Schweitzer Engineering Laboratories, que incluye ambas funciones de protección, además de otras características y tecnologías.

En este documento se incluye, además del desarrollo de las protecciones con el relé SEL-411L, una introducción a los criterios de protección del sistema eléctrico, una descripción y análisis de las líneas de alta tensión a proteger, una descripción del funcionamiento de ambas funciones de protección, y un análisis de las principales faltas que sufren las líneas eléctricas. Por último, también se explican los objetivos de desarrollo sostenible que están alineados con este trabajo.

Una protección adecuada del sistema es clave para el correcto funcionamiento de la red eléctrica. En el caso de las líneas de alta tensión, que se utilizan para el transporte de la energía eléctrica, una correcta protección asegura un suministro eléctrico de calidad. Para conseguir esto, tiene que procurarse que las interrupciones y desconexiones del sistema sean las mínimas y de la menor duración posible. Es con este objetivo con el que se diseñan unas protecciones estables, selectivas, rápidas y sensibles.

## INTRODUCTION

This project consists of the design of the protections for two 220 kV high voltage lines: an overhead line and an underground line. Distance protection (21 ANSI code) will be used for the overhead line and line differential protection (87L ANSI code) for the underground line. The SEL-411L relay from Schweitzer Engineering Laboratories will be used for this purpose, which includes both protection functions, in addition to other features and technologies.

This document includes, in addition to the development of the protections with the SEL-411L relay, an introduction to the protection criteria of the electrical system, a description and analysis of the high-voltage lines to be protected, a description of the operation of both protection functions, and an analysis of the main faults suffered by the electrical lines. Finally, the sustainable development objectives that are aligned with this work are also explained.

Adequate system protection is key to the proper functioning of the power grid. In the case of high-voltage lines, which are used to transport electrical energy, proper protection ensures the quality of the power supply. To achieve this, it must be ensured that system interruptions and disconnections are kept to a minimum and of the shortest possible duration. It is with this objective in mind that stable, selective, fast and sensitive protections are designed.



# 1. CRITERIOS DE PROTECCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO PENINSULAR ESPAÑOL

## 1.1. FUNDAMENTOS DE PROTECCIÓN

El sistema de protección es un elemento muy importante para el funcionamiento de un sistema eléctrico. Su actuación ante perturbaciones en la red condiciona la calidad del suministro y la estabilidad del sistema eléctrico.

Muchos de los elementos de un sistema eléctrico tienen un alto coste, y su instalación supone una gran inversión, por lo que, para rentabilizar dicha inversión, el sistema debe utilizarse al máximo dentro de sus limitaciones de seguridad. Sin embargo, lo más importante es que el sistema funcione de forma segura en todo momento. Siempre se van a producir fallos en el sistema eléctrico que pueden representar un gran riesgo, por lo tanto, la provisión de una protección adecuada que detecte y desconecte elementos del sistema en caso de fallo es una parte fundamental del diseño del sistema eléctrico.

Con el objetivo de completar los requisitos de protección con la velocidad adecuada para las distintas configuraciones y condiciones de operación de los sistemas, se han desarrollado numerosos tipos de relés con diferentes funciones. En algunos casos, simplemente observan la magnitud de la corriente, pero en otros miden la impedancia o la potencia de la línea. Frecuentemente, los relés miden funciones complejas de las magnitudes que sólo pueden ser expresadas mediante métodos matemáticos o gráficos.

Por otra parte, para limitar la parte del sistema eléctrico que se desconecta cuando ocurre un fallo, la protección se divide en zonas. Las distintas zonas suelen superponerse para que ninguna parte del sistema quede sin protección.

### Fiabilidad

La fiabilidad de un sistema de protección es muy importante, y depende de los siguientes factores [1]:

- Diseño. El diseño del sistema asegurará que este opere correctamente bajo todas las condiciones requeridas. Además, deben tenerse en cuenta la frecuencia y la duración de los fallos que puedan producirse y todos los parámetros relevantes del tipo de protección utilizada.
- Ajustes. Las características de los sistemas eléctricos cambian con el tiempo debido a cambios en la carga, localización, o cantidad de generación. Por eso, los valores de ajuste de los relés deben ser revisados para comprobar que siguen siendo apropiados para el sistema.
- Instalación. La complejidad de las interconexiones de muchos sistemas y su relación con el resto del sistema pueden dificultar la instalación. Es necesario realizar pruebas in situ en el momento de la instalación para probar la corrección de las conexiones.
- Deterioro. Debido al funcionamiento continuo y a las condiciones ambientales los equipos se pueden deteriorar impidiendo así el correcto funcionamiento del sistema. Es importante comprobar periódicamente el funcionamiento de los relés, aunque, en la actualidad, la mayoría de los relés tienen sistemas que comunican si existe algún fallo.
- Rendimiento. El rendimiento de los sistemas de protección se evalúa estadísticamente. Para ello cada fallo del sistema se clasifica como incidente, y sólo aquellos que se han solucionado mediante las desconexiones apropiadas se clasifican como "correctos". De esta forma se calcula el porcentaje de rendimiento del sistema.

### Selectividad

Cuando se produce un fallo, el sistema de protección debe disparar los disyuntores necesarios para aislar el defecto y que no afecte al resto de la línea. Esto se consigue mediante dos métodos distintos:

- Selectividad de tiempo. Los dispositivos de protección están dispuestos de forma escalonada y sólo actúan los correspondientes a la zona defectuosa.

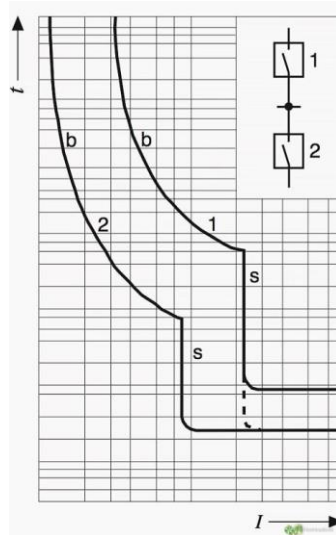


Figura 1. Gráfica Intensidad-Tiempo de un sistema con selectividad de tiempo

- Sistemas unitarios. Responden sólo a fallos que ocurren en una zona claramente definida. Este método es más rápido ya que no incluye graduación de tiempo, y la velocidad de actuación no depende de la gravedad del fallo. Un ejemplo de esto sería la protección diferencial.

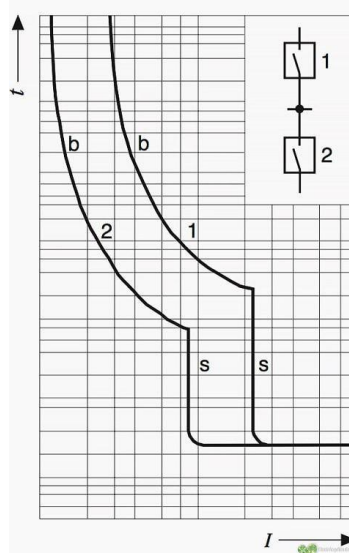


Figura 2. Gráfica Intensidad tiempo de un sistema unitario

### Estabilidad

La estabilidad está relacionada con los sistemas unitarios de protección y se refiere a la capacidad del sistema para no verse afectado por condiciones externas a la zona protegida.

## Velocidad

El objetivo de los sistemas de protección es aislar los fallos en la red eléctrica lo más rápido posible, ya que el daño causado es proporcional al tiempo que permanece el fallo. Cuanto menor es el tiempo que puede durar el fallo, mayor es la carga que soporta el sistema. En la figura se observa la relación entre el tiempo de eliminación de la falta y la carga del sistema para distintos tipos de fallos.

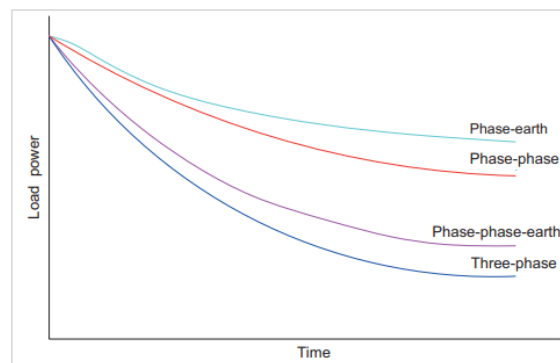


Figura 3. Gráfica Tiempo-Carga para distintos tipos de faltas [1]

## Sensibilidad

La sensibilidad es el nivel mínimo de tensión, corriente o potencia, para que funcionen los relés de protección. Los relés son más sensibles cuanto menores sean sus parámetros de funcionamiento.

## 1.2. PRINCIPIOS DE MEDIDA

En este proyecto se van a estudiar las protecciones de líneas de alta tensión, tanto aéreas como subterráneas. Los principales principios de medida empleados en los dispositivos de protección de las líneas son los siguientes [2]:

- Medida de la distancia desde el punto de la falta hasta la protección (protección de distancia). El tiempo de actuación de la protección presenta una característica escalonada dependiendo de la zona en la que ocurra la falta.

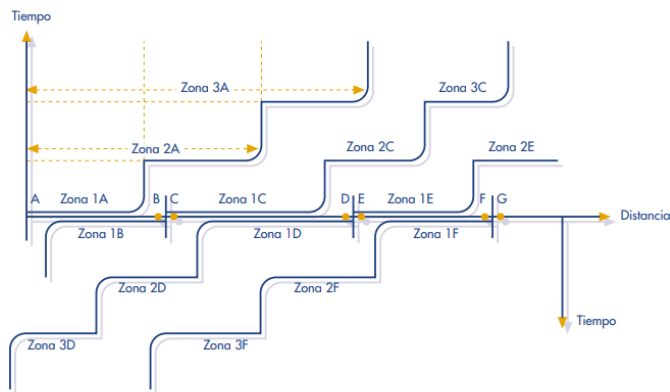


Figura 4. Zonas de una protección de distancia [2]

- Medida del valor de la intensidad desde el punto de protección hacia la falta, y control de su dirección (protección de sobreintensidad). El tiempo de actuación de la protección en este caso es inversamente proporcional al valor de la intensidad.
- Medida del desfase entre las intensidades a ambos lados de la línea (protección de comparación de fase). Las protecciones de cada extremo de la línea comparan las fases de las intensidades de ambos extremos y detectan si el desfase entre ambas es superior al límite de la tolerancia. Pueden realizarse tres comparaciones independientes (una por fase) o sólo una comparación de una magnitud que sea combinación lineal de las intensidades de fase.
- Medida del valor de la suma de intensidades que confluyen en la línea (protección diferencial). Se solían utilizar para líneas muy cortas, pero gracias a los avances en las comunicaciones de banda ancha se pueden utilizar para líneas más largas.

En la Red Eléctrica Española, el objetivo es la desconexión de los extremos de la línea en la que se encuentra la falta en el menor tiempo posible. Dependiendo de este valor del tiempo, existen dos tipos de protecciones:

- a) Sin enlace. No instantáneas en el 100% de la línea.
  - Protección de distancia
  - Protección de sobreintensidad direccional
  - Protección de sobreintensidad no direccional
- b) Con enlace. Instantáneas.
  - Protección unitaria. Compara las magnitudes eléctricas en un extremo de la línea con respecto a las del otro.
    - o Comparación de fase
    - o Diferencial longitudinal
  - Protección no unitaria. Su funcionamiento depende sólo de las magnitudes medidas en un extremo de la línea.
    - o En subalcance
      - Con teledisparo
      - Permisivo
      - Con aceleración
    - o En sobrealcance
      - Permisivo
      - A bloqueo
      - A desbloqueo
  - Comparación direccional

### **1.3.       NORMATIVA DE APLICACIÓN**

- Real Decreto 223/2008 de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-LAT 01 a 09.
- Real Decreto 337/2014, de 9 de mayo, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión y sus Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-RAT 01 a 23.
- Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- Real Decreto 1110/2007, de 24 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento unificado de puntos de medida del sistema eléctrico.
- Normas UNE y cualquier otra reglamentación nacional, autonómica o local vigente que fuera de aplicación.

## 2. LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

### 2.1. GENERALIDADES

#### 2.1.1. DEFINICIÓN Y PARÁMETROS

Las líneas eléctricas son los elementos básicos que constituyen las redes eléctricas, cuya función es el transporte de la energía eléctrica entre dos puntos. Su funcionamiento viene caracterizado por cuatro parámetros fundamentales (resistencia, inductancia, capacidad y conductancia) que permiten modelar una línea mediante un circuito eléctrico [3].

- **Resistencia.** La resistencia de un conductor es la relación entre la potencia de pérdidas ( $P_p$ ) cuando circula una corriente  $I$  por él y el cuadrado de dicha corriente.

$$R = \frac{P_p}{I^2}$$

En conductores con una sección uniforme y pequeña en relación con su longitud, la resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a la sección,

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Siendo  $\rho$  la resistividad que depende de las características del material conductor. En el caso del aluminio a una temperatura ambiente de 20°C:  $\rho = 0.028 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

- **Inductancia.** Una corriente eléctrica circulando por un conductor crea un campo magnético circular alrededor del conductor. Si la corriente es variable en el tiempo, el campo creado también lo será e inducirá una tensión:

$$v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$$

$\phi(t)$  es el flujo inducido en el conductor, y es proporcional a la corriente con un coeficiente de proporcionalidad llamado coeficiente de inducción ( $L$ ).

$$L = \frac{\phi(t)}{i(t)}$$



- **Capacidad.** Es la relación entre la carga que circula por el conductor y su tensión:

$$C = \frac{q}{v}$$

- **Conductancia.** En las líneas existen pérdidas debido a que los aisladores de los conductores no son perfectos y pasa algo de corriente a través de ellos. La conductancia de aislamiento se define como:

$$G = \frac{I_p}{V}$$

Siendo  $I_p$  la corriente de fuga, y  $V$  la tensión entre el conductor y tierra.

La conductancia de aislamiento varía con factores como la humedad del ambiente, el número de aisladores, la condición de estos... En la mayoría de los casos suele ser despreciable.

Otro fenómeno que puede producir pérdidas en los conductores es el efecto corona, que consiste en la ionización del aire que rodea los conductores de alta tensión. Si la distancia entre los conductores es muy pequeña, puede llegar a producirse un arco entre ellos, pero, en el caso de las líneas de alta tensión, esta distancia es suficientemente grande como para que esto no ocurra.

Ambos fenómenos provocan pequeñas pérdidas de potencia activa en los conductores.

### 2.1.2. CIRCUITO EQUIVALENTE

Una línea aérea se representa mediante su circuito equivalente en  $\pi$  o en T.  $Z$  es la impedancia total de la línea, mientras que,  $Y$  es la admitancia total, y  $L$  su longitud.

$$Z = (R + jX) * L$$

$$Y = (G + jB) * L$$

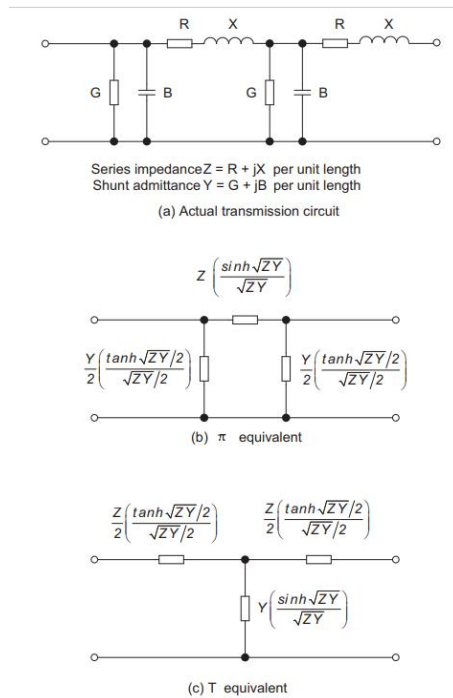


Figura 5. Circuitos equivalentes de una línea de transmisión [1]

En líneas cortas se puede ignorar la admitancia, lo que simplifica en gran medida los cálculos para el circuito equivalente.

### 2.1.3. CARACTERÍSTICAS Y DATOS DE PARTIDA

Las líneas de alta tensión son aquellas cuya tensión nominal es superior a 1 kV. En España, las líneas de alta tensión se clasifican en cuatro categorías [4]:

- Categoría especial: tensión nominal igual o superior a 220 kV
- Primera categoría: tensión nominal superior a 66 kV e inferior a 220 kV
- Segunda categoría: tensión nominal superior a 30 kV e inferior a 66 kV
- Tercera categoría: tensión nominal superior a 1 kV e inferior a 30 kV

Los elementos que compongan las líneas eléctricas aéreas de alta tensión que formen parte de la Red Eléctrica deberán alcanzar los siguientes objetivos recogidos en el Reglamento sobre condiciones técnicas y de seguridad en las líneas de Alta Tensión [5]:

- Garantizar la seguridad de las personas y las instalaciones.

- Cumplir las condiciones medioambientales exigibles.
- Garantizar la calidad del suministro.
- Conseguir mayor homogeneidad en las redes de distribución eléctrica

Además, los datos de partida básicos para diseñar una línea eléctrica de alta tensión son los siguientes:

- Tensión de la línea.
- Potencia a transportar
- Número de circuitos
- Origen y final de la línea

Con estos datos de partida se podrán determinar el tipo de conductor, el número de conductores por fase, el cable de tierra y fibra óptica, el tipo de aislamiento y la temperatura de diseño.

## 2.2. LÍNEA AÉREA

### 2.2.1. CONDUCTOR

La línea que se va a proteger es una línea aérea de 220 kV y de más de 20 km de longitud. El conductor utilizado será de aluminio con alma de acero galvanizado y del tipo 337-AL1, cuyas principales características son las siguientes:

Designación Código / Código antiguo	Sección mm <sup>2</sup>		Equiv en Cobre (mm <sup>2</sup> )	Diámetro mm		Composición				Carga de Rotura (daN)	Resist. eléctrica c.c. a 20°C (Ω/km)	Masa Kg /km	Módulo elasticidad daN/m <sup>2</sup>	Coef. de dilatación lineal (°C <sup>-1</sup> x10 <sup>-6</sup> )
						Alambres de aluminio		Alambres de acero						
	Aluminio	Total		Acero	Total	Nº	Diámetro (mm)	Nº	Diámetro (mm)					
337-AL1 / 44-ST1A LA 380 (Gull)	337,3	381,0	212	8,46	25,38	54	2,82	7	2,82	10650	0,0857	1275	6900	19,3

Tabla 1. Características conductor 337-AL1 (Gull) [5]

El conductor está compuesto de varios alambres de aluminio del mismo diámetro nominal y de uno o varios alambres de acero galvanizado. Los alambres van cableados en capas concéntricas; todos los alambres del alma son de acero y todas las capas exteriores son de alambre de aluminio. Los alambres de acero galvanizado cumplirán todos los requisitos indicados en la norma UNE EN 50189 con el grado y la clase de recubrimiento designado ST1A [6].

### 2.2.2. CABLES DE PUESTA A TIERRA

El cable de tierra será del tipo OPGW. Este cable estará formado por un núcleo óptico central dentro del cual se encontrarán las fibras ópticas. El espacio entre las fibras se rellenará de un componente antihumedad compatible con las fibras. Además, sobre el tubo central se cablearán una o dos capas de alambres de acero recubierto de aluminio. Las características mecánicas y eléctricas de los cables normalizados se muestran en la siguiente tabla:

CABLES OPGW Icc 17 kA/0,3 s	
Número de fibras	48
Diámetro exterior del cable (mm)	≤ 13,9
Diámetro alambres capa/s exterior/es (mm)	> 2,73
RTS Resistencia a la tracción asignada (daN)	> 5.500
MAT Máxima tensión admisible (daN)	> 2.000
Masa calculada (kg/km)	< 600
Módulo de elasticidad (daN/mm <sup>2</sup> )	9.000 < m < 14.000
Coefficiente de dilatación térmica (x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	14 < c < 18
Radio de curvatura (mm)	< 800
Resistencia a 20 °C en corriente continua (Ω / km )	< 0,45
Temperatura admisible de operación (°C)	de -30 a +70
Mínima corriente de cortocircuito para 0,3 s (kA)	17
Temperatura de cortocircuito en aluminio (I <sup>2</sup> .t)(°C)	de +40 a + 210

Tabla 2. Características cable OPGW [5]

### 2.2.3. AISLADORES

Los aisladores utilizados para las líneas de alta tensión serán de vidrio del tipo caperuza y vástago cuyas características tomarán como referencia la norma EDE LNE003 “Aisladores de vidrio para cadenas de líneas aéreas de AT, de tensión superior a 30 kV”.

Las principales características de este tipo de aisladores son las siguientes:

Características Aislador de Vidrio U100 BS		
Denominación		U100 BS
Carga de rotura mecánica	(kN)	100
Diámetro máximo nominal de la parte aislante	D (mm)	255
Paso nominal	P (mm)	127 (0,03P+0,3)
Línea de fuga nominal	(mm)	295
Norma de acoplamiento según CEI 120	d1	16*
<b>Tensión soportada a impulso tipo Rayo</b>		
1 aislador	kV	100
<b>Tensión soportada a frecuencia industrial bajo lluvia</b>		
Cadena corta normalizada (5 aisladores)	kV	380
1 aislador	kV	40
<b>Tensión de perforación en aceite</b>		
Cadena corta normalizada (5 aisladores)	kV	165
1 aislador	kV	130

Tabla 3. Características aislador de vidrio [5]

### **2.3. LÍNEA SUBTERRÁNEA**

Los cables utilizados en las líneas subterráneas tendrán conductores de aluminio y estarán aisladas con materiales adecuados a las condiciones de instalación y explotación. Los conductores utilizados serán los siguientes [7]:

- Cables de 132kV de XLPE 1x1200mm<sup>2</sup> Al con pantalla de 120mm<sup>2</sup> Cu.

#### **2.3.1. PARTES DEL CABLE**

- Conductor. Será un conductor de aluminio segmentado o Milliken con obturación longitudinal. Los conductores segmentados están compuestos por varios cables en forma de segmentos ensamblados que forman un núcleo cilíndrico. El conductor se divide en varios segmentos (entre 4 y 7) que se separan unos de otros mediante cinta aislante. En la imagen se observa la estructura de este tipo de conductores.

El comportamiento del conductor se caracteriza por dos fenómenos:

- Efecto skin o pelicular. Es la concentración del flujo de corriente eléctrica en la periferia del conductor. Aumenta en proporción a la sección del conductor utilizada
- Efecto de proximidad. Se produce debido a la poca distancia entre fases del conductor. Cuando el diámetro del conductor es mucho más grande que la separación entre las fases, la corriente eléctrica tiende a concentrarse en las superficies orientadas al conductor. Los cables de estas superficies tienen una inductancia menor que los cables que están más lejos, y la corriente tiende a circular por los cables con menor inductancia.

El efecto de proximidad es más débil que el efecto skin, y disminuye rápidamente cuando los cables se alejan unos de otros. En los conductores con estructura tipo Milliken ambos efectos perjudiciales disminuyen notablemente.

- Semiconductor interior. Formado por una capa de compuesto semiconductor extruido dispuesto sobre el conductor. De esta forma se consigue uniformar el campo eléctrico a nivel de conductor y se asegura que presente una superficie lisa al aislamiento. De forma opcional, se dispondrá una cinta semiconductor de empaquetamiento sobre el conductor sobre la que se forma la capa de compuesto semiconductor, evitando de esta forma la penetración en el interior de la cuerda del compuesto extruido.
- Aislamiento. Está compuesto de XLPE y debe soportar el campo eléctrico bajo condiciones de funcionamiento nominal y transitorio.
- Semiconductor exterior. Capa de semiconductor extruido que se coloca sobre el sobre el aislamiento y que permite la transición progresiva de un medio aislante, donde el campo eléctrico no es nulo, a un medio conductor, en el que el campo eléctrico es nulo.
- Material obturante. Material absorbente de la humedad para evitar la propagación de agua entre los alambres de la pantalla.
- Pantalla metálica. Es necesaria para tensiones altas. Su función es anular el campo eléctrico fuera del cable, y actúa como el segundo electrodo del condensador formado por el cable.
- Cubierta exterior. Cubierta exterior de poliolefina (PE) tipo ST7 con lámina de aluminio longitudinalmente solapada y adherida a su cara interna para garantizar la estanqueidad radial. Aísla la pantalla metálica y la protege de la corrosión. También contribuye a la protección mecánica de la línea.

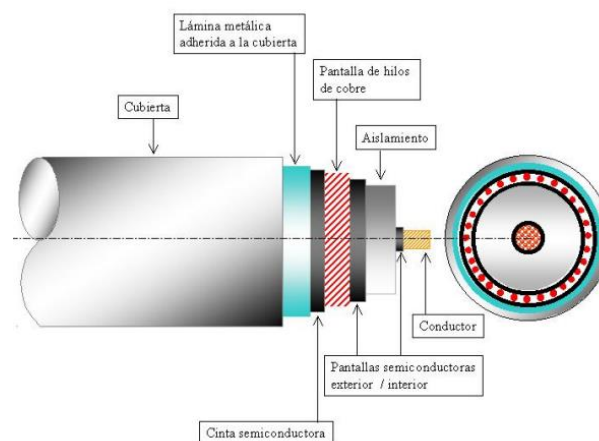


Figura 6. Componentes de los cables subterráneos [7]

### 2.3.2. TERMINALES

Los terminales se instalan en el extremo de los cables para garantizar la conexión eléctrica correcta entre el cable y otras partes de la red, manteniendo el aislamiento hasta el punto de conexión. No deben limitar la capacidad de transporte de los cables y deben soportar las mismas corrientes de cortocircuito que el cable sobre el que se van a instalar. Tienen una parte mecánica, que conecta el conductor y la pantalla del cable al terminal; y una parte eléctrica, que permite soportar el gradiente eléctrico en la parte central del terminal. Existen tres tipos de terminales:

- Terminales de exterior.
- Terminales GIS.
- Terminales inmersos en aceite.

Los terminales de exterior están diseñados para instalarse en el exterior de subestaciones y apoyos cuando los cables subterráneos se van a conectar a líneas aéreas, y son los que se van a utilizar. Serán premoldeados con aisladores de material composite, ya que la línea es de más de 45 kV.

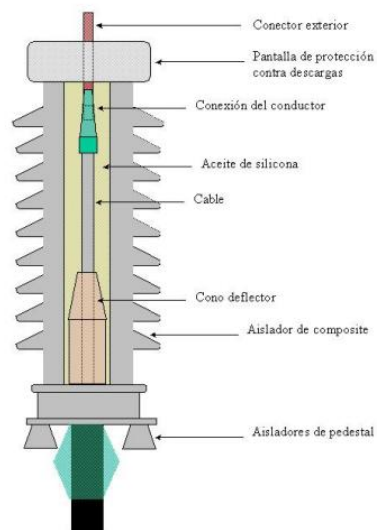


Figura 7. Terminal premoldeado de composite [7]



### 2.3.3. CABLES DE FIBRA ÓPTICA

Las comunicaciones en la línea subterránea se realizarán mediante fibra óptica tendida conjuntamente con el cable. Las líneas con cable subterráneo no pueden soportar comunicaciones mediante ondas portadoras a causa de la elevada capacidad de este tipo de cables.

El cable de fibra óptica estará formado por una cubierta interior de material termoplástico dieléctrico, sobre el que se pondrá una protección antirroedores también dieléctrica. El conjunto estará rodeado por una cubierta exterior de material termoplástico ignífugo. Las características del cable se muestran en la siguiente tabla:

Número de fibras	48
Diámetro exterior del cable (mm)	≤ 18
Resistencia a la tracción máxima (daN)	≥ 1.000
Masa (kg/km)	≤ 300
Radio de curvatura (mm)	≤ 300
Disposición de tubos	4 tubos de 12 fibras
Humedad relativa	Mínima: 65% hasta 55°C
Margen de Temperatura	-20°C a +70°C
Tipos de Fibra (norma de referencia)	Monomodo convencional (ITU-T G.652.D)

Tabla 4. Características cable de fibra óptica

### 2.3.4. CABLES DE PUESTA A TIERRA

Los cables de puesta a tierra estarán formados por un conductor de cobre con aislamiento XLPE y cubierta de poliolefina. La sección del conductor debe ser igual o mayor que la sección de la pantalla a la que se conectan. En este caso la sección mínima del conductor de cobre de puesta a tierra serán 120 mm<sup>2</sup>. Estos cables cumplirán las condiciones de la Norma UNE-HD-603.

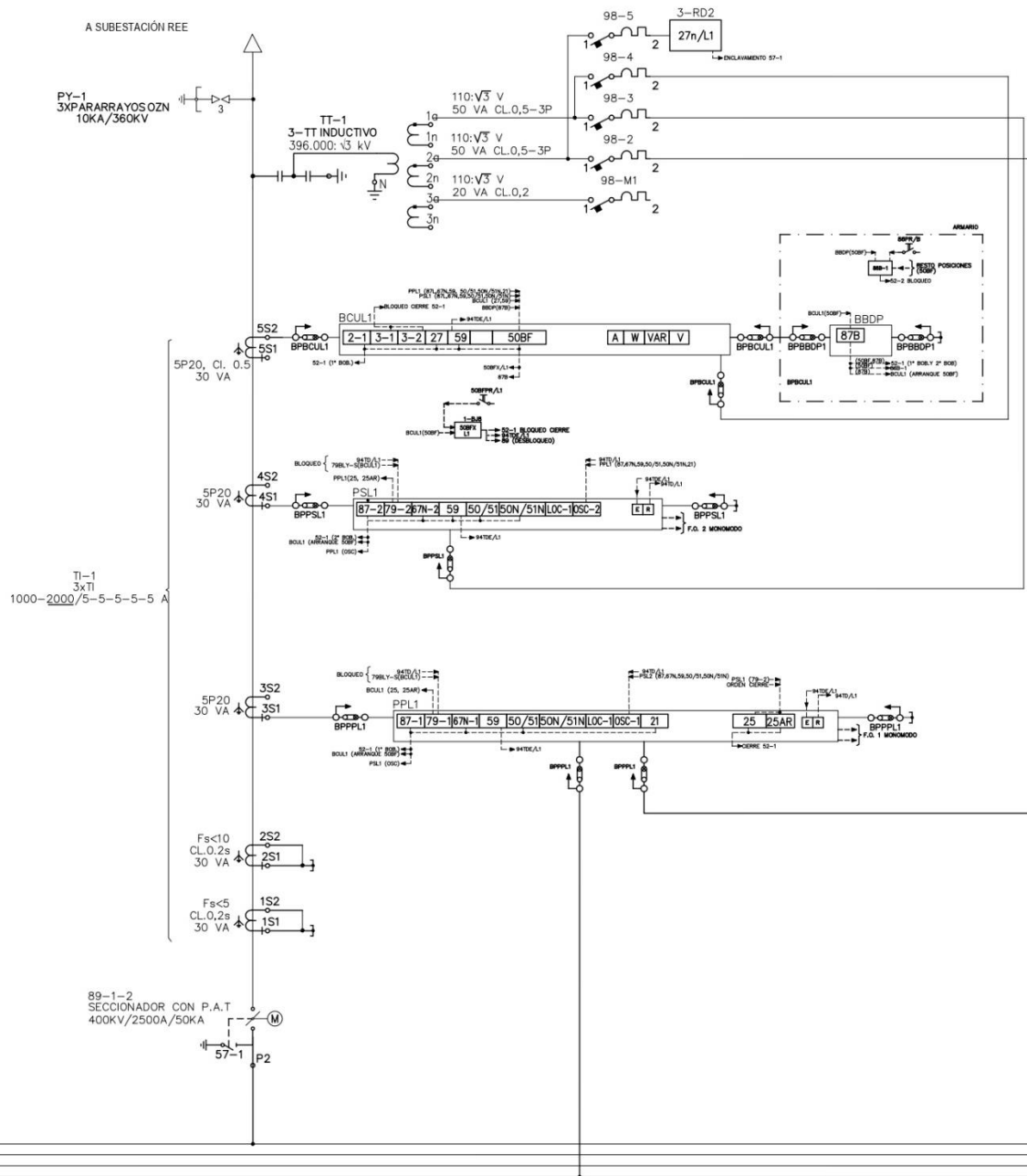
### 3. DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROTECCIÓN

#### 3.1. FUNCIONES DE PROTECCIONES MÁS COMUNES

En este apartado se definen las principales funciones de protección que contienen los relés que se utilizan para proteger líneas de alta tensión.

- Protección de distancia (21): funciona cuando al admitancia, impedancia o reactancia del circuito disminuyen o aumentan a unos límites preestablecidos.
- Comprobación de sincronismo (25): funciona cuando dos circuitos de alterna están dentro de los límites deseados de tensión, frecuencia o ángulo de fase, lo cual permite o causa la puesta en paralelo de estos circuitos.
- Protección direccional de potencia (32): funciona sobre un valor deseado de potencia en una dirección dada o sobre la inversión de potencia como por ejemplo, la resultante del retroceso del arco en los circuitos de ánodo o cátodo de un rectificador de potencia.
- Protección de sobreintensidad (50): funciona instantáneamente con un valor excesivo de velocidad de aumento de intensidad.
- Protección de sobreintensidad temporizada (51): tiene una característica de tiempo inverso o de tiempo fijo que funciona cuando la intensidad de un circuito de c.a. sobrepasa un valor dado.
- Protección de sobretensión (59): funciona con un valor dado de sobretensión.
- Protección diferencial (87): funciona sobre un porcentaje o ángulo de fase u otra diferencia cuantitativa de dos intensidades o algunas otras cantidades eléctricas.

El diagrama unifilar de la siguiente figura representa una línea eléctrica de alta tensión de la Red Eléctrica Española con sus protecciones.



BARRAS 400 kV, 2000 A, 50 kA  
 TENSION MEDIDA  
 TENSION PROTECCION  
 TENSION SINCRONISMO

Figura 8. Diagrama unifilar línea de alta tensión

## **3.2. PROTECCIÓN DE DISTANCIA (21)**

### **3.2.1. DEFINICIÓN**

Las protecciones de distancia son las más utilizadas en la protección de líneas de transporte de alta tensión. Son un sistema de protección no unitario, cuya principal ventaja es que su cobertura de fallos del circuito protegido es prácticamente independiente de las variaciones de impedancia de la fuente. Es relativamente sencilla de aplicar y actúa rápido para fallos localizados dentro de la zona protegida.

### **3.2.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO**

Los relés de distancia son capaces de medir la impedancia de una línea, que es proporcional a la longitud de esta, hasta un determinado punto llamado punto de alcance. El principio básico de la protección de distancia consiste en medir la tensión y la corriente, y calcular su cociente en el punto en el que se encuentra el relé. Si la impedancia medida es menor que la impedancia en el punto de alcance, quiere decir que existe un fallo en la línea entre el relé y el punto de alcance.

A partir de este cociente, también se puede representar la característica de operación de la protección en un diagrama R-X, en el que en el eje X se representa la parte real (resistencia), y en el eje Y se representa la parte imaginaria (reactancia).

La impedancia vista por la protección es mayor en condiciones de operación que cuando ocurre una falta, ya que, en este último caso, la impedancia vista por la protección comprende sólo el circuito entre la protección y el punto de la línea en el que se ha producido la falta. En el diagrama R-X, como se ha dicho antes, se representa la característica de operación de la protección, que representa el valor límite de la zona que se quiere proteger y delimita el área de operación de la protección. Por tanto, la protección sólo debe actuar si el punto definido por las coordenadas de la impedancia vista por la protección se encuentra dentro del área de operación. A continuación, se muestran tres tipos de curvas características de protecciones de distancia. En el caso del punto P la protección debe actuar, mientras que en el caso del punto Q no.

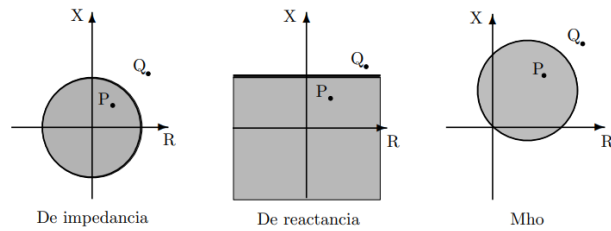


Figura 9. Curvas características de protección de distancia

Si se utilizan sólo unidades de impedancia o de reactancia, la característica que se obtiene es no direccional, es decir, no distingue entre faltas delante y detrás del relé. Por tanto, es importante añadir elementos de control para hacer esta protección direccional. El diagrama Mho es el único que es direccional, es decir, sólo actúa ante faltas que ocurren en el sentido correcto.

### 3.2.3. ACTUACIÓN DEL RELÉ

El rendimiento de un relé de distancia depende de su precisión de alcance y su tiempo de actuación. La precisión de alcance es la comparación entre el alcance real del relé (en ohmios) en condiciones de funcionamiento, con el valor teórico de ajuste del relé. El tiempo de actuación del relé puede variar dependiendo de la corriente de fallo, la posición del fallo, y el punto de la curva de tensión en el que ocurre el fallo.

Por otro lado, se definen los Ratios de Impedancias del Sistema (SIR) como:

$$SIR = \frac{Z_S}{Z_L}$$

$Z_S$  = impedancia de la fuente

$Z_L$  = impedancia de la línea

Las líneas se pueden clasificar según el SIR en cortas, medias o largas:

- Líneas cortas:  $SIR > 4$
- Líneas medias:  $0,5 < SIR < 4$
- Líneas largas:  $SIR < 0,5$

La protección de distancia suele aplicarse a líneas largas, ya que estas líneas requieren disparos de alta velocidad para evitar problemas de estabilidad en el sistema

### 3.2.4. RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DEL RELÉ Y EL SIR

El siguiente diagrama representa el circuito equivalente de una línea en la que hay un relé en el punto R.  $I_R$  y  $V_R$  son la tensión y la corriente medidas por el relé, respectivamente.

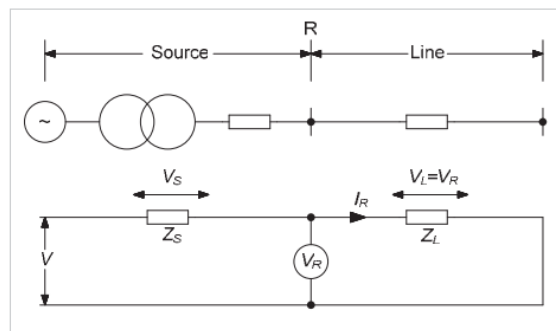


Figura 10. Circuito equivalente de línea con relé

$$V_R = I_R Z_L$$

$$I_R = \frac{V}{Z_S + Z_L}$$

$$\text{Entonces, } V_R = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} V = \frac{1}{\frac{Z_S}{Z_L} + 1} V$$

### 3.2.5. ZONAS DE PROTECCIÓN

Para conseguir una selectividad adecuada y una mejor coordinación del sistema es necesario seleccionar distintas zonas de protección. Una zona de protección es la parte del sistema delimitada por interruptores que permiten aislarla del resto del sistema. Para que no quede ninguna parte sin proteger, las zonas se pueden solapar, y habitualmente el número de zonas está entre tres y cinco.

- Zona 1. La protección en la zona 1 es instantánea, y comprende el 80% de la línea con relés electromecánicos, y alrededor del 85% si el relé es digital. El 15-20%

restante de la línea asegura que no hay riesgo de sobrealcance en la línea debido a errores en los transformadores o en los relés.

- Zona 2. La segunda zona incluye toda la línea y, además, un 20 o 30% de la línea adyacente. Actúa de manera temporizada con un retardo de entre 0,3 y 0,5 segundos.
- Zona 3. El objetivo de esta zona es servir de respaldo a las protecciones de las líneas adyacentes. Alcanza toda la línea a proteger y el 100% de la siguiente, y actúa también con temporización de entre 0,8 y 1 segundos.
- Zonas adicionales. Los relés de protección suelen tener también una zona 4 y una zona 5 que actúan hacia atrás, es decir, protegen también la línea anterior.

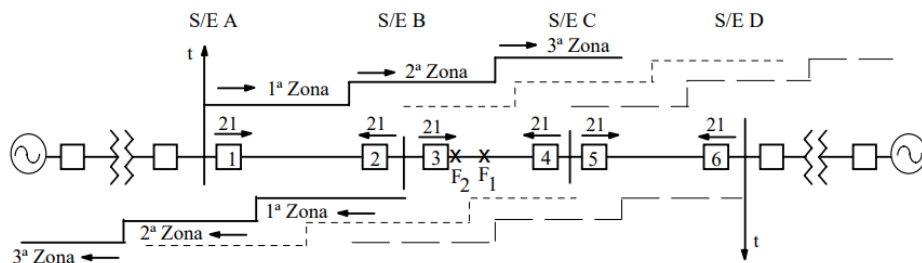


Figura 11. Zonas de protección de distancia [9]

### 3.3. PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE LÍNEA (87L)

#### 3.3.1. DEFINICIÓN

Las protecciones diferenciales se basan en la primera Ley de Kirchoff: la suma de las intensidades que llegan a un nudo debe ser 0. Para ello comparan dos o más magnitudes con un valor fijado previamente en el ajuste de la protección. Además, son protecciones unitarias, es decir, sólo aíslan faltas que ocurren en la zona protegida por ese sistema. Las faltas que ocurran en otra parte no influyen.

#### 3.3.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

La protección diferencial más utilizada es la de corriente de línea, que compara el valor de la corriente a la entrada y a la salida de la línea a proteger. En la figura se muestra el funcionamiento simplificado de una protección diferencial de línea genérica:

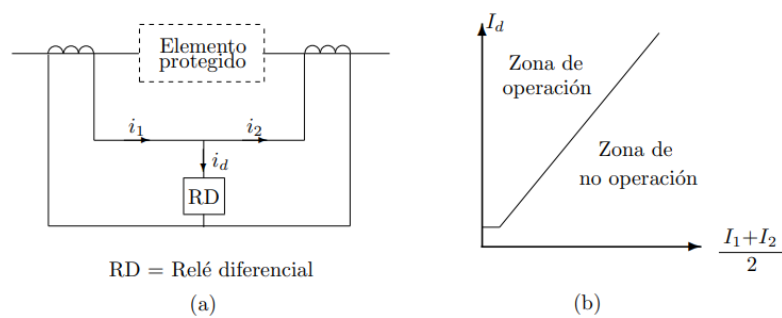


Figura 12. Funcionamiento de protección diferencial [3]

La corriente a un lado y al otro del elemento protegido deben ser iguales, por tanto, la protección actuará cuando la corriente diferencial que circula por el relé supere el valor de referencia previamente ajustado (intensidad de arranque). Esto sólo ocurre cuando la falta es interna, ya que, como se ha dicho antes, las faltas externas no influyen en la protección. Las relaciones de transformación de los transformadores de corriente situados en los extremos de la línea deben ajustarse de manera que, en condiciones de operación, las intensidades a ambos lados de la línea provoquen la misma circulación de corriente por sus secundarios.

Sin embargo, una selectividad basada únicamente en el valor de la intensidad diferencial podría conducir a actuaciones indebidas de la protección. Por eso, para mejorar la selectividad de estas protecciones se utilizan las protecciones diferenciales de



porcentaje. En ellas la decisión de actuación de la protección depende de si la intensidad diferencial supera un determinado porcentaje de la intensidad de frenado, que se define como la media de las intensidades de entrada y salida del elemento protegido. Esto se puede observar en la figura 12b. De esta forma se evitan actuaciones erróneas de la protección, como, por ejemplo, ante fallos externos, en los que tanto la corriente de entrada como la de salida pueden ser muy elevadas.

Las protecciones diferenciales necesitan que ambos elementos estén conectados físicamente mediante un cable, por lo que, si la distancia en los dos extremos es muy grande, la instalación se encarece y la precisión de la protección disminuye. Por esta razón las protecciones diferenciales se utilizan para líneas cortas.

En las protecciones actuales, los relés suelen estar conectados mediante fibra óptica, y realizan una comparación segregada por fase que compara las corrientes de cada fase, lo que mejora en gran medida su precisión.

Se utiliza una polarización de doble pendiente para mejorar la estabilidad ante las faltas:

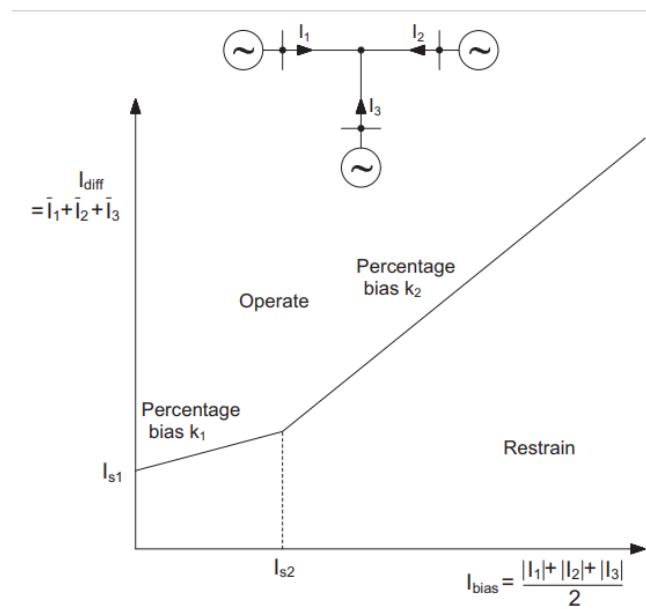


Figura 13. Gráfica de polarización de doble pendiente [1]

Un criterio de disparo típico es el siguiente:

- Si la intensidad de frenado es menor que la intensidad de arranque de la zona 2 ( $I_{S2}$ ):

$$|I_{BIAS}| < I_{S2}$$

$$|I_{DIF}| > k1|I_{BIAS}| + I_{S1}$$

- Si la intensidad de frenado es mayor que la intensidad de arranque de la zona 2 ( $I_{S2}$ ):

$$|I_{BIAS}| > I_{S2}$$

$$|I_{DIF}| > k2|I_{BIAS}| - (k2 - k1)I_{S2} + I_{S1}$$

$I_{BIAS}$  = Intensidad de frenado

$I_{S1}$  = Intensidad de arranque 1

$I_{S2}$  = Intensidad de arranque 2

$I_{DIF}$  = Intensidad diferencial

$k1, k2$  = pendientes 1 y 2

Cuando el relé en uno de los extremos detecta una condición de disparo, transmite una señal a través de la fibra óptica al relé del otro extremo para que también actúe. La sincronización de los datos puede hacerse por dos métodos:

- Basado en canales: funciona sin fuente de tiempo externa, pero necesita que el canal de comunicación sea simétrico, es decir, los retrasos en las direcciones de transmisión y recepción deben ser iguales.
- Basado en tiempos externos: si el canal de comunicación no es simétrico, se pueden utilizar fuentes de tiempo externas (GPS). Cuando se aplica la función 87L sobre Ethernet, la función usa solo el modo de sincronización externo basado en el tiempo; no puede usar aplicaciones Ethernet en el modo basado en canales.

### 3.3.3. DISCRIMINADOR DE FALTAS

Las protecciones diferenciales tienen un dispositivo denominado discriminador de faltas que analizando la secuencia negativa de la intensidad diferencial es capaz de distinguir entre faltas externas o internas de la zona protegida.

El ángulo de fase de la intensidad de secuencia negativa del extremo local se compara con el ángulo de fase de la suma de intensidades de secuencia negativa del extremo remoto. La característica de operación se representa en la siguiente figura y es definida por dos parámetros,  $I_{\min \text{Sec\_Neg}}$  y  $\Phi_{\text{Sec\_Neg}}$ .

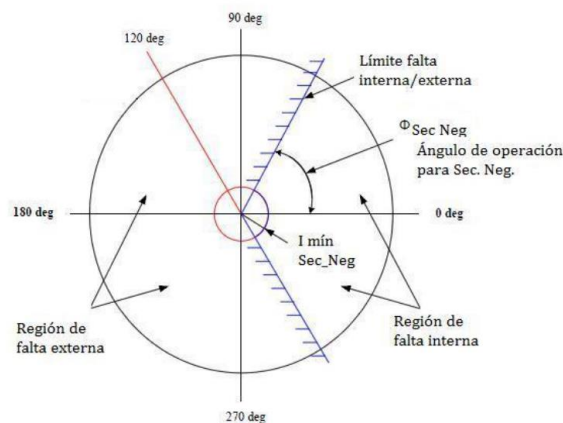


Figura 14. Característica de operación de discriminador de faltas [10]

Se considera que la dirección de la intensidad es hacia la línea, es decir, saliendo de barras de subestación. Así, cuando las dos intensidades tienen esta dirección, ambas hacia la línea, la diferencia de fase entre ellas será idealmente cero. En caso contrario, cuando una intensidad es entrante a la línea y la otra intensidad saliente de la línea, la diferencia de fase será idealmente de  $180^\circ$ . En el caso de que la intensidad de secuencia negativa del extremo local o la suma de las secuencias negativas del extremo remoto esté por debajo de un nivel establecido no se podrá llevar a cabo la comparación entre ellas, el discriminador de falta no realizará ninguna clasificación y se establecerá  $120^\circ$  de diferencia. Cuando el discriminador de falta identifica una falta interna, se inicia una orden de disparo [11].

## 4. ANÁLISIS DE LAS FALTAS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Las líneas eléctricas están expuestas a distintos factores que pueden provocarles faltas. Algunos de estos factores son los efectos atmosféricos, los fallos en el equipamiento, o los errores humanos.

El principal problema que afecta a las líneas eléctricas y que debe ser eliminado es el cortocircuito, aunque también pueden ocurrir otros incidentes como pueden ser: sobrecargas, sobre/subtensiones, sobre/subfrecuencias [11].

- Cortocircuitos: dos puntos a diferentes tensiones se conectan mediante una resistencia muy baja, lo que provoca la circulación de una corriente muy alta.
- Sobrecargas: el sistema soporta una carga mayor de la que debería.
- Sobretensiones/Subtensiones: la tensión aumenta/disminuye más del 5% de la nominal.
- Sobre/subfrecuencias: la frecuencia debe mantenerse dentro de sus límites operativos.

Es importante detectar y eliminar las faltas para proteger a las personas, minimizar los daños en los elementos del sistema, y evitar la pérdida del suministro eléctrico.

### 4.2. CORTOCIRCUITOS

#### 4.2.1. DEFINICIÓN

Los cortocircuitos ocurren cuando se produce una conexión con una resistencia o impedancia muy baja entre dos puntos que están a tensiones distintas. Esto provoca la circulación de una corriente muy alta llamada corriente de cortocircuito, que puede causar graves daños en el circuito.

Para diseñar los dispositivos de protección es necesario conocer las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito, ya que estos deben ser capaces de actuar tanto cuando la intensidad de cortocircuito sea máxima como cuando sea mínima. De esta forma se protegerán de forma eficaz las instalaciones eléctricas.

#### 4.2.2. TIPOS DE CORTOCIRCUITO

Los cortocircuitos se clasifican según el número de fases afectadas, y pueden ser monofásicos, bifásicos, o trifásicos. Los monofásicos y bifásicos son asimétricos, es decir, las corrientes de las tres fases no son iguales en el momento del cortocircuito; mientras que, los trifásicos sí que son simétricos, ya que las tres fases tienen la misma corriente.

- Cortocircuito monofásico. Una de las fases entra en contacto con tierra, generando corrientes de valor muy elevado. Son los más comunes, alrededor del 80% de los cortocircuitos son de este tipo.

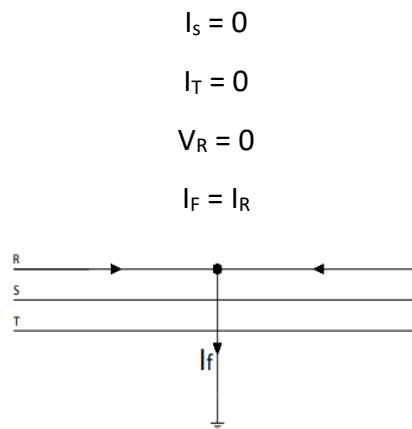


Figura 15. Cortocircuito monofásico

- Cortocircuito bifásico sin conexión a tierra. Dos fases del sistema se conectan entre ellas. Puede evolucionar a un cortocircuito trifásico.

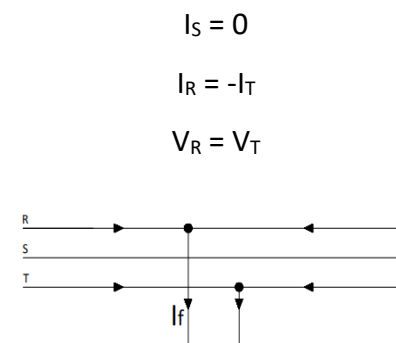


Figura 16. Cortocircuito bifásico sin conexión a tierra

- Cortocircuito bifásico con conexión a tierra. Dos fases del sistema entran en contacto entre ellas y con tierra. Puede evolucionar también a cortocircuito trifásico.

$$I_S = 0$$

$$V_R = V_T = 0$$

$$I_F = I_R + I_T$$

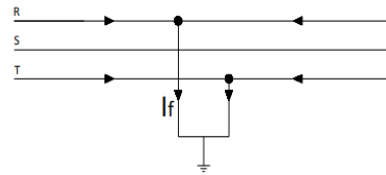


Figura 17. Cortocircuito bifásico con conexión a tierra

- Cortocircuito trifásico. Las tres fases del sistema entran en contacto. Las corrientes de cortocircuito que se producen son las más peligrosas y afectan a las tres fases por igual. Son los menos comunes.

$$I_R + I_S + I_T = 0$$

$$V_R = V_S = V_T$$

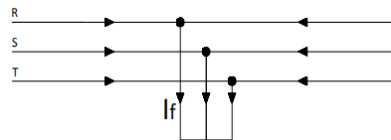


Figura 18. Cortocircuito trifásico

### 4.3. MÉTODO DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

Este método está basado en el teorema de Fortescue, y permite analizar fallas tanto simétricas como asimétricas en cualquier sistema. Las tensiones y corrientes de cualquier nudo del sistema se pueden calcular a partir de sus componentes simétricas.

El método establece que cualquier sistema de “n” vectores puede descomponerse en “n” sistemas simétricos con “n” vectores cada uno. En el caso de corrientes de cortocircuito, se descompondrán sistemas de tres vectores en tres sistemas simétricos con tres vectores cada uno [12]. Estos tres sistemas son los siguientes:

- Sistema de secuencia homopolar. Los tres fasores tienen el mismo módulo, sentido, y argumento. Se representa con el subíndice 0.
- Sistema de secuencia inversa o negativa. Los fasores están desfasados  $120^\circ$  y en secuencia directa. Se representa con el subíndice 1.
- Sistema de secuencia directa o positiva. Los tres fasores están desfasados  $240^\circ$ , ya que el orden de las fases está invertido, por eso se conoce como secuencia inversa y se representa con el subíndice 2.

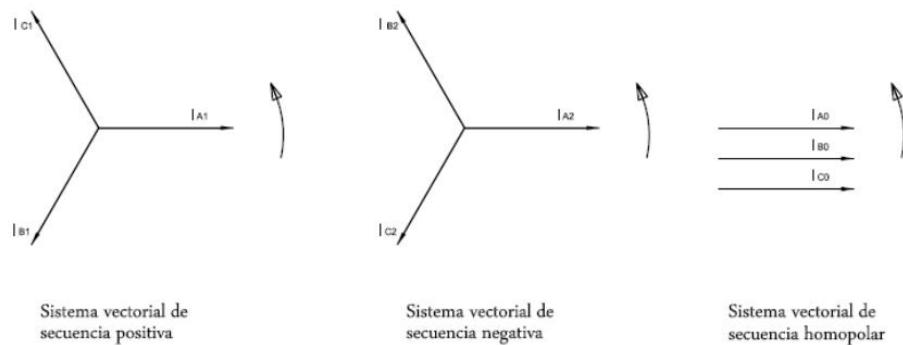


Figura 19. Descomposición de un sistema en componentes simétricas [12]

Para aplicar este método se toma una de las fases como referencia (por ejemplo, la fase R o A) y se refieren a ella el resto de las fases. Se define un factor de fase, que es un operador que, al multiplicarlo por un fasor, cambia el ángulo del mismo, pero no su módulo. Este factor es  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ .

De esta forma, operando con los fasores, se pueden obtener las tres corrientes de secuencia:

$$I_A + I_B + I_C = 3I_{A0} \quad \text{Secuencia homopolar}$$

$$I_A + aI_B + a^2I_C = 3I_{A1} \quad \text{Secuencia inversa}$$

$$I_A + a^2I_B + aI_C = 3I_{A2} \quad \text{Secuencia directa}$$

Con este método se obtienen también las corrientes de falta para cada uno de los tipos de cortocircuito explicados anteriormente:

	Componentes simétricas	Intensidad de falta
Monofásico	$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0$ $\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{1Th-k} + \bar{Z}_{2Th-k} + \bar{Z}_{0Th-k} + 3 \cdot \bar{Z}_f}$	$\bar{I}_F = 3 \cdot \bar{I}_0$
Bifásico sin conexión a tierra	$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$ $\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{1Th-k} + \bar{Z}_{2Th-k} + \bar{Z}_f}$ $\bar{I}_2 = -\frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{1Th-k} + \bar{Z}_{2Th-k} + \bar{Z}_f}$ $\bar{I}_0 = 0$	$\bar{I}_F = \bar{I}_S = -\bar{I}_T$ Supuesta falta entre fases S y T
Bifásico con conexión a tierra	$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_f}{\frac{\bar{Z}_{2Th-k} \cdot \bar{Z}_{0Th-k}}{\bar{Z}_{2Th-k} + \bar{Z}_{0Th-k}} + \bar{Z}_{1Th-k}}$ $\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_{2Th-k}}$ $\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_{0Th-k}}$	$\bar{I}_F = 3 \cdot \bar{I}_0$
Trifásico	$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{1Th-k}}$ $\bar{I}_2 = 0; \bar{I}_0 = 0$	$\bar{I}_F = \bar{I}_1$

Tabla 5. Corrientes de falta según tipo de cortocircuito



#### **4.4. CONSECUENCIAS DE LOS CORTOCIRCUITOS**

Dependiendo de naturaleza y magnitud de los defectos, del punto de la instalación afectado y de la magnitud de la intensidad las consecuencias de los cortocircuitos pueden ser muy diferentes.

La presencia de un arco puede degradar los aislantes, fundir los conductores, e incluso provocar un incendio. También pueden presentarse sobreesfuerzos electrodinámicos con deformación de las barras, desprendimiento de los cables, o sobrecalentamiento producido por el aumento de pérdidas debido a efecto Joule que puede deteriorar los aislantes.

Además, otros circuitos de la red afectada o de redes próximas también pueden verse afectados. Pueden producirse bajadas de tensión durante el tiempo de eliminación de la falta, desconexiones de partes de la instalación, inestabilidad o pérdida de sincronismo de las máquinas, o perturbaciones en los circuitos de mando y control.

#### **4.5. CRITERIOS DE ELIMINACIÓN**

- La eliminación debe producirse en tiempo inferior al crítico y con selectividad, en ausencia de fallo y salvo con falta entre transformador de intensidad e interruptor.
- En caso de que falle un único elemento del sistema, también debe eliminarse en tiempo inferior al crítico y con selectividad, excepto en los siguientes casos: configuraciones de simple y doble barra en las que no se duplica la protección diferencial, y fallos de interruptores.
- Las faltas entre transformador de intensidad e interruptor se deben eliminar también en tiempo inferior al crítico y con selectividad. La selectividad implica siempre la pérdida de los elementos a ambos lados del interruptor.
- En líneas aéreas el disparo debe ser monofásico si:
  - Se compromete la estabilidad o el sincronismo del sistema.
  - Es posible el reenganche tras falta monofásica pero no polifásica.
  - La red tiene una tensión superior a 400 kV.
- La protección de línea debe disponer de comunicación entre extremos, aunque el tiempo crítico sea superior a 500 ms.

- Para conseguir una adecuada selectividad con las protecciones de apoyo de líneas adyacentes, acoplamientos y máquinas, el tiempo de eliminación desde cada extremo debe ser instantáneo en el 80% de la línea [2].

## 5. DISEÑO DE UNA PROTECCIÓN CON RELÉ SEL-411L

### 5.1. RELÉ SEL-411L

Se va a emplear el relé SEL-411L, ya que combina la protección diferencial de línea de alta velocidad (87L) con la protección de distancia (21). A continuación, se incluye un esquema con las distintas partes y funciones del relé.

#### Functional Overview

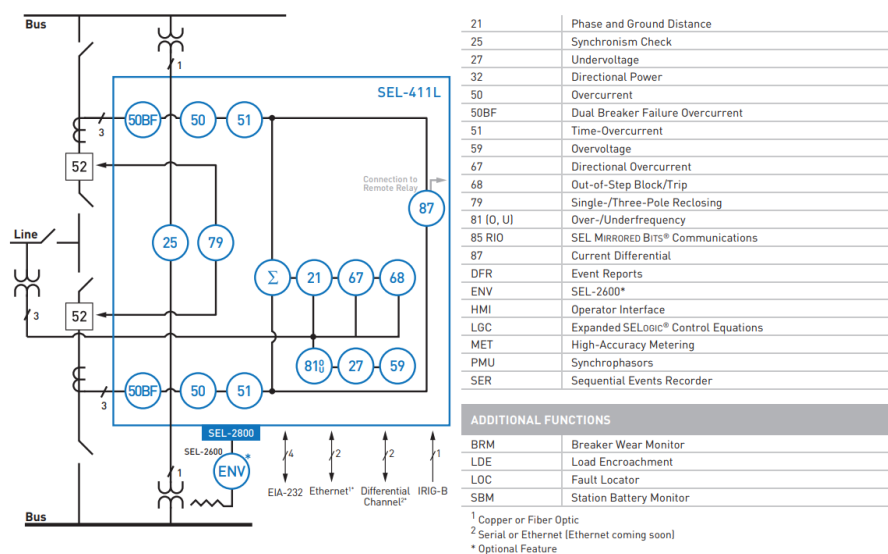


Figura 20. Diagrama funcional relé SEL-411L [13]

El relé aplica la **lógica FIDS** (Faul Type IDentification Selection) [14] para la detección de faltas. Esta lógica identifica todas las faltas que involucren tierra (monofásicas y bifásicas a tierra) comparando el ángulo entre la corriente de secuencia homopolar ( $I_0$ ) y la de secuencia inversa ( $I_2$ ). Para los casos en los que sólo circulan corrientes de secuencia homopolar la lógica FIDS utiliza elementos de subtensión monofásica para seleccionar la fase en falta.

Las salidas de esta lógica son FSA, FSB y FSC:

- FSA: Se activa si el ángulo calculado entre  $I_0$  e  $I_2$  está comprendido entre  $-60^\circ$  y  $+60^\circ$ . Indica que hay una falta entre la fase A y tierra o entre las fases B y C.
- FSB: Se activa si el ángulo calculado entre  $I_0$  e  $I_2$  está comprendido entre  $+60^\circ$  y  $+180^\circ$ . Indica que hay una falta entre la fase B y tierra o entre las fases C y A. 62

- FSC: Se activa si el ángulo calculado entre I0 e I2 está comprendido entre +180° y -60°. Indica que hay una falta entre la fase C y tierra o entre las fases A y B.

### Localización de faltas

La localización de fallas por onda viajera opcional proporciona una mayor precisión y le permite enviar al personal de línea a la torre o tramo más cercano para abordar rápidamente el problema. Con los relojes GPS y el canal de comunicaciones incluidos en su sistema, el relé calculará automáticamente la localización de la falla. Con los datos de eventos de onda viajera, puede calcular una ubicación precisa de la falla de forma manual o con el software SEL-5601-2 synchroWAVE® Event. La localización de falla por onda viajera es el mejor método para las configuraciones de líneas de transmisión de compensación en serie y en paralelo. Se obtienen resultados exactos independientemente de la configuración de la línea o de la impedancia de la falla [13].

$$FL = \frac{TWLL}{2} + \frac{(TPKL - TPKR) * C * LPVEL}{2}$$

TWLL: longitud de la línea

TPKL: tiempo correspondiente a la onda viajera detectada en el terminal local

TPKR: tiempo correspondiente a la onda viajera detectada en el terminal remoto

C = 299792.458 km/sec

LPVEL: velocidad de propagación en pu de la velocidad de la luz

### Teleprotección

La teleprotección consiste en que el equipo de protección intercambia información con el extremo opuesto de la línea mediante comunicación con fibra óptica (OPGW) con relés de transmisión y recepción. Los distintos esquemas de teleprotección sirven para conseguir la desconexión selectiva y sin retardo en el 100% de la línea con protección de distancia. El relé permite elegir entre los esquemas de teleprotección POTT, DCUB, PUTT, DCB y DTT.

- POTT (Permissive Overreaching Transfer Tripping). En este esquema la condición para la desconexión de la línea es que ambos extremos de la línea detecten una falla en la zona 2 y en dirección hacia adelante.

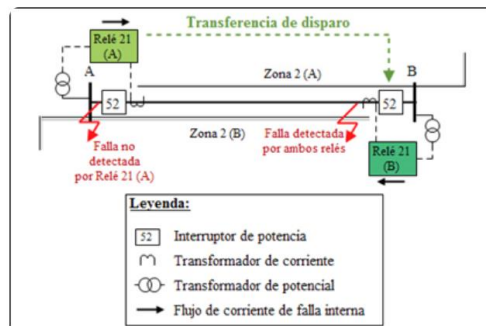


Figura 21. Esquema de teleprotección POTT

- DCUB (Directional Comparison Unblocking). Se transmite de un extremo a otro una señal de bloqueo permanente, hasta que se detecta una falta y se envía la señal de desbloqueo que permite iniciar el disparo.
- PUTT (Permissive Underreaching Transfer Tripping). El disparo ocurre si ambos extremos detectan una falla en la zona 1. Es un esquema menos fiable, ya que la zona 1 no abarca el 100% de la línea.

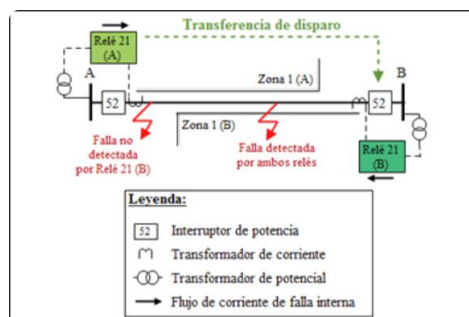


Figura 22. Esquema de teleprotección PUTT

- DCB (Directional Comparison Blocking). Se utiliza la comunicación por fibra óptica para enviar una señal de bloqueo o desbloqueo de un extremo a otro de la línea. La señal se envía cuando se detecta una falla en dirección hacia atrás y el bloqueo se detiene cuando se detecta una falla en dirección hacia adelante.

- DTT (Direct Transfer Tripping). Cuando se produce un fallo de interruptor en la posición, se envía un disparo directo hacia las posiciones que alimentan la falta, incluyendo el extremo remoto.

La siguiente tabla muestra los cinco esquemas de teleprotección y las principales funciones del relé para cada uno de ellos.

Permissive Overreaching Transfer Tripping (POTT) schemes	Current reversal guard logic Open breaker echo keying logic Weak-infeed and zero-infeed logic Time-step distance backup protection
Directional Comparison Unblocking Tripping (DCUB) schemes	Includes all POTT logic All loss-of-channel logic is inside the relay Time-step distance backup protection
Permissive Underreaching Transfer Tripping (PUTT) schemes	Supported by POTT logic Time-step distance backup protection
Directional Comparison Blocking Trip (DCB) schemes	Current reversal guard logic Carrier coordinating timers Carrier send and receive extend logic Zone 3 latch eliminates the need for offset three-phase distance elements Time-step distance backup protection
Direct Transfer Tripping (DTT) schemes	SELOGIC control equations program the elements that key direct tripping

*Tabla 6. Esquemas de teleprotección y sus funciones SEL-411L*

## 5.2. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

### 5.2.1. INTRODUCCIÓN

El relé SEL-411L incluye protección de distancia con cinco zonas de elementos de distancia de fase y de tierra mediante características Mho y cuadrilateral. La lógica de sobrealcance transitorio del transformador de tensión de acoplamiento optimiza el rendimiento y mejora la seguridad del elemento de distancia de la zona 1 de protección. Además, la lógica Best Choice Ground Directional Element, que se explicará a continuación, simplifica el ajuste del relé eliminando la necesidad de múltiples ajustes.

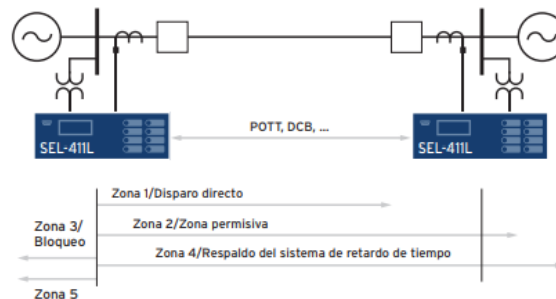


Figura 23. Zonas de protección en SEL-411L [13]

### 5.2.2. FUNCIONES

#### Direccionalidad

Los elementos de distancia de la zona 1 y la zona 2 están configurados en dirección hacia adelante. Las zonas 3, 4, 5 se pueden configurar independientemente como forward-looking (F) o reverse-looking (R) con los ajustes DIR3, DIR4, DIR 5.

Las direcciones de los elementos de sobrecorriente direccionales de nivel 1 y nivel 2 se fijan hacia adelante para los elementos de sobrecorriente direccional de secuencia inversa y de tierra. Los elementos de los niveles 3 y 4 (67Q3, 67Q4, 67G3, 67G4) tienen la misma dirección que las correspondientes zonas de protección de distancia, utilizando también los ajustes DIR 3, DIR 4, DIR 5.

Setting	Description	Range	Default
DIR3	Zone/Level 3 directional control	F, R	R
DIR4	Zone/Level 4 directional control	F, R	F
DIR5	Zone/Level 5 directional control	F, R	F

Tabla 7. Ajustes zonas direccionalidad SEL-411L [13]

### Elementos direccionales a tierra

El relé cuenta con tres elementos direccionales independientes para supervisar los elementos de distancia a tierra. La lógica Best Choice Ground Directional Element selecciona la mejor opción para el elemento direccional de tierra. Selecciona entre los elementos 32QG, 32V, y 32I para proporcionar decisiones sobre la dirección de los elementos de distancia a tierra.

- 32QG. Elemento direccional polarizado por tensión de secuencia negativa.
- 32V. Elemento direccional polarizado por tensión de secuencia homopolar.
- 32I. Elemento direccional polarizado por corriente de secuencia homopolar.

En la tabla se muestran los ajustes predeterminados que el relé utiliza para los elementos direccionales de tierra.

Setting	Equation
50FP	$0.12 \cdot I_{NOM}$
50RP	$0.08 \cdot I_{NOM}$
Z2F	$0.5 \cdot Z1MAG$
Z2R	$Z2F + 1/(2 \cdot I_{NOM})$
a2	0.1
k2	0.2
Z0F	$0.5 \cdot Z0MAG$
Z0R	$Z0F + 1/(2 \cdot I_{NOM})$
a0	0.1

Tabla 8. Ajustes elementos direccionales de tierra SEL-411L [13]

### Detección de transitorios en CVT

El relé detecta transitorios en los transformadores capacitivos (CVT) de la línea que pueden causar sobrealcance en los elementos de la zona 1. Si se activa esta función, cuando el relé detecta SIR altos retrasa el disparo hasta 1,5 ciclos para permitir que los



transitorios se estabilicen. El relé se adapta automáticamente a las distintas condiciones del SIR del sistema mediante la monitorización de la tensión y la corriente medidas [15].

La detección de transitorios en CVT se utiliza si se cumplen las siguientes condiciones:

- SIR  $\geq 5$
- CVTs con AFSC (Circuitos de Supresión de Ferrorresonancia activos)

Otras condiciones que pueden agravar los transitorios son las siguientes:

- CVTs con una carga mayoritariamente inductiva
- CVTs con un valor bajo de la capacidad (C)

**Table 3.82 CVT Transient Detection Logic Setting**

Name	Description	Range	Default
ECVT	CVT transient detection	Y, N	N

**Table 3.83 CVT Transient Detection Logic Relay Word Bit**

Name	Description
CVTBTL	CVT transient blocking active

*Tabla 9. Ajustes de detección de transitorios SEL-411L [13]*

### Elementos de distancia a tierra

- MHO

El relé tiene cinco zonas independientes de protección mho de distancia a tierra. Esta protección actúa sólo para faltas monofásicas y permite ajustar el alcance para cada zona de forma independiente.

Los elementos de distancia de las zonas 1 y 2 operan sólo hacia adelante, pero las zonas 3,4,5 se pueden configurar hacia adelante o hacia atrás.

K0 es el coeficiente de impedancia a tierra y es importante para el cálculo de fallas monofásicas.

$$k0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3 * Z_{1L}}$$

Si se considera que para líneas de muy alta tensión se puede encontrar que  $Z_1=0,43 \Omega/\text{km}$  y  $Z_0=1,3 \Omega/\text{km}$ , resulta un  $K_0=0,67$ .

$Z_{1L}$ : impedancia de la línea de secuencia positiva

$Z_{0L}$ : impedancia de la línea de secuencia homopolar

Name	Description	Range	Default (5 A)
E21MG	Mho phase distance protection	N, 1 to 5	3
<b>Mho Ground-Distance Element Reach</b>			
Z1MG	Zone 1 ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	6.24
Z2MG	Zone 2 ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	9.36
Z3MG	Zone 3 ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	1.87
Z4MG	Zone 4 ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	OFF
Z5MG	Zone 5 ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	OFF
<b>Zero-Sequence Compensation Factor</b>			
k0M1	Zone 1 ZSC factor magnitude	AUTO, 0.000–10	0.726
k0A1	Zone 1 ZSC factor angle ( $^\circ$ )	–180.00 to +180	–3.69
k0M <sup>a</sup>	Forward Zones ZSC factor magnitude	0.000–10	0.726
k0A <sup>a</sup>	Forward Zones ZSC factor angle ( $^\circ$ )	–180.00 to +180	–3.69
k0MR <sup>a</sup>	Reverse Zones ZSC factor magnitude	0.000–10	0.726
k0AR <sup>a</sup>	Reverse Zones ZSC factor angle ( $^\circ$ )	–180.00 to +180	–3.69

<sup>a</sup> Advanced Setting if EADVS := Y. If the Advanced Settings are not enabled (setting EADVS := N), the relay hides the settings.

Tabla 10. Ajustes elementos mho de distancia a tierra SEL-411L [13]

#### - CUADRILATERAL

El relé tiene cinco zonas independientes de protección cuadrilateral de distancia a tierra que actúan para faltas monofásicas.

Se programan el alcance reactivo (XG) y resistivo (RG) para cada zona independientemente. La medición de la reactancia se hace con el ajuste Z1ANG, que es un número complejo.

Los elementos de distancia de las zonas 1 y 2 operan sólo hacia adelante, pero las zonas 3,4,5 se pueden configurar hacia adelante o hacia atrás.

Se pueden activar ajustes avanzados (EADVS) para elegir si los elementos cuadrilaterales de distancia a tierra utilizan corriente de secuencia homopolar o inversa para polarizar la línea de reactancia. Si no se activa la función EADVS, el ajuste por defecto es que se utilice la corriente de secuencia inversa.

Los elementos cuadrilaterales del relé incluyen una opción (ARESE) que permite ajustar el limitador de resistencia (resistance blinder) a las condiciones de carga. Esta función sólo afecta a los elementos cuadrilaterales a tierra, no a los de fase. El objetivo de la función de resistencia adaptativa es aumentar la cobertura de la resistencia ante faltas, especialmente en el caso de faltas remotas.

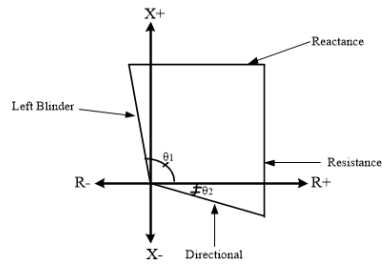


Figura 24. Limitador de resistencia de un relé

Existing Resistance Blinder	Adaptive Resistance Blinder
The left blinder is the negative of the right-blinder setting.	The left blinder is the minimum of the enabled right blinder settings, (min [RG1, RG2, . . . RGn]).
The right resistance blinder is fixed.	The right blinder adapts to the changing load conditions.

Tabla 11. Mejoras de la resistencia adaptativa [13]

Name	Description	Range	Default (5 A)
ARESE	Enable adaptive resistive element	Y, N	N
E21XG	Quadrilateral ground distance zones	N, 1 to 5	N
XG1	Zone 1 reactance ( $\Omega$ )	OFF, $(0.25-320)/I_{NOM}$	OFF
RG1	Zone 1 resistance ( $\Omega$ )	$(0.25-250)/I_{NOM}$	12.48
XG2	Zone 2 reactance ( $\Omega$ )	OFF, $(0.25-320)/I_{NOM}$	OFF
RG2	Zone 2 resistance ( $\Omega$ )	$(0.25-250)/I_{NOM}$	18.72
XG3	Zone 3 reactance ( $\Omega$ )	OFF, $(0.25-320)/I_{NOM}$	OFF
RG3	Zone 3 resistance ( $\Omega$ )	$(0.25-250)/I_{NOM}$	3.64
XG4	Zone 4 reactance ( $\Omega$ )	OFF, $(0.25-320)/I_{NOM}$	OFF
RG4	Zone 4 resistance ( $\Omega$ )	$(0.25-250)/I_{NOM}$	31.20

Tabla 12. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia a tierra SEL-411L (I) [13]

Name	Description	Range	Default (5 A)
XG5	Zone 5 reactance ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	OFF
RG5	Zone 5 resistance ( $\Omega$ )	(0.25–250)/ $I_{NOM}$	50.00
XGPOL <sup>a</sup>	Quadrilateral ground polarizing quantity	I2, IG	I2
TANGG <sup>a,b</sup>	Nonhomogeneous correction angle ( $^\circ$ )	-40.0 to +40.0	-7.0

<sup>a</sup> Advanced Setting if EADVS := Y. If the Advanced Settings are not enabled (setting EADVS := N), the relay hides the settings.

<sup>b</sup> Setting is hidden if XGPOL = I2.

Tabla 13. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia a tierra SEL-411L (II) [13]

## Elementos de distancia de fase

### - MHO

El relé tiene cinco zonas independientes de protección mho de distancia de fase. Esta protección actúa para fallas bifásicas con y sin conexión a tierra, y para fallas trifásicas, y permite ajustar el alcance de cada zona de forma independiente.

Los elementos de distancia de las zonas 1 y 2 operan sólo hacia adelante, pero las zonas 3,4,5 se pueden configurar hacia adelante o hacia atrás. Las zonas 1,2, y 3 son de alta velocidad, y su tiempo de detección es de menos de un ciclo. Los elementos mho de distancia de fase utilizan polarización de tensión de secuencia positiva para una mayor fiabilidad.

Name	Description	Range	Default (5 A)
E21MP	Mho phase distance zones	N, 1–5	3
Z1MP	Zone 1 reach ( $\Omega$ )	OFF (0.25–320)/ $I_{NOM}$	6.24
Z2MP	Zone 2 reach ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	9.36
Z3MP	Zone 3 reach ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	1.87
Z4MP	Zone 4 reach ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	OFF
Z5MP	Zone 5 reach ( $\Omega$ )	OFF, (0.25–320)/ $I_{NOM}$	OFF

Tabla 14. Ajustes elementos mho de distancia de fase SEL-411L [13]

### - CUADRILATERAL

El relé tiene cinco zonas de protección cuadrilateral de distancia de fase. Todas las zonas tienen elementos de protección convencionales, y, además, las zonas 1,2, y 3 tienen elementos de alta velocidad.

Tanto los elementos convencionales de distancia como los de alta velocidad de las zonas 1 y 2 operan sólo hacia adelante, y las zonas 3,4, y 5 pueden configurarse hacia adelante o hacia atrás.

Zones	High-Speed Elements	Conventional Elements
Zone 1	Forward only	Forward only
Zone 2	Forward only	Forward only
Zone 3	Forward/reverse	Forward/reverse
Zone 4	NA	Forward/reverse
Zone 5	NA	Forward/reverse

Tabla 15. Direccionalidad elementos de alta velocidad [13]

El alcance de la impedancia para cada zona depende del ángulo de impedancia de secuencia positiva de la línea (Z1ANG) y no de la ordenada (reactancia) del plano R-X.

Una red no homogénea puede causar subalcance o sobrealcance en los elementos cuadrilaterales de distancia. Una red es homogénea respecto a una falta si el cociente de la reactancia y la resistencia a la izquierda de la falta es igual al cociente a la derecha.

$$\frac{X_{LEFT}}{R_{LEFT}} = \frac{X_{RIGHT}}{R_{RIGHT}}$$

El relé cuenta con la función TANGP, cuyo valor va desde -40° hasta +40°, para solucionar la no homogeneidad de las redes y que no afecte a los elementos de protección cuadrilateral.

Name	Description	Range	Default (5A)
E21XP	Enable quadrilateral phase distance Zones	N, 1–5	3
XP1	Zone 1 reactance (ohms, s)	OFF, (0.25–320)/I <sub>NOM</sub> <sup>a</sup>	OFF
RP1	Zone 1 resistance (ohms, s)	(0.25–250)/I <sub>NOM</sub>	12.48 <sup>b</sup>
XP2	Zone 2 reactance (ohms, s)	OFF, (0.25–320)/I <sub>NOM</sub>	OFF
RP2	Zone 2 resistance (ohms, s)	(0.25–250)/I <sub>NOM</sub>	18.72 <sup>b</sup>
XP3	Zone 3 reactance (ohms, s)	OFF, (0.25–320)/I <sub>NOM</sub>	OFF
RP3	Zone 3 resistance (ohms, s)	(0.25–250)/I <sub>NOM</sub>	3.64 <sup>b</sup>
XP4	Zone 4 reactance (ohms, s)	OFF, (0.25–320)/I <sub>NOM</sub>	OFF
RP4	Zone 4 resistance (ohms, s)	(0.25–250)/I <sub>NOM</sub>	31.20 <sup>b</sup>
XP5	Zone 5 reactance (ohms, s)	OFF, (0.25–320)/I <sub>NOM</sub>	OFF
RP5	Zone 5 resistance (ohms, s)	(0.25–250)/I <sub>NOM</sub>	50.00 <sup>b</sup>
TANGP	Phase nonhomogeneous correction angle (deg)	–40.0 to +40.0	–7.0
DIR3 <sup>c</sup>	Zone/Level 3 directional control	F or R	R
DIR4 <sup>c</sup>	Zone/Level 4 directional control	F or R	F
DIR5 <sup>c</sup>	Zone/Level 5 directional control	F or R	F

<sup>a</sup> I<sub>NOM</sub> = 1 or 5 A.  
<sup>b</sup> Hidden if X<sub>Pm</sub> = OFF.  
<sup>c</sup> Common setting for the mho and quadrilateral elements.

Tabla 16. Ajustes elementos cuadrilaterales de distancia de fase SEL-411L [13]

### **5.3. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE LÍNEA**

#### **5.3.1 INTRODUCCIÓN**

El elemento 87L del relé puede proteger líneas de dos, tres, o hasta cuatro terminales, y cada terminal puede conectarse en una disposición de doble interruptor. El relé proporciona una adecuada seguridad para la función 87L al admitir dos entradas de corriente para la medición de las dos corrientes en cada terminal de la línea.

El relé ofrece dos modos de sincronización de los datos: basado en el canal y basado en el tiempo externo. El modo basado en el canal funciona sin ninguna fuente de tiempo externa, pero requiere que el canal de comunicaciones 87L sea simétrico (los retardos del canal en las direcciones de transmisión y recepción deben ser idénticos o casi idénticos).

La función 87L del relé utiliza corrientes de fase (87LP), de secuencia negativa (87LQ), y de secuencia neutra (87LG) para conseguir una mayor seguridad, sensibilidad y velocidad. El relé trabaja con muestras de corriente para proporcionar una rápida y sensible detección de fallos externos.

#### **5.3.2 FUNCIONES**

##### AlphaPlane generalizado

El principio de protección diferencial de corriente AlphaPlane puede aplicarse en el caso de una línea en disposición de interruptor único. En este caso, el relé mide y compara el cociente complejo entre las corrientes que circulan a ambos lados de la línea ( $k$ ) con su característica de operación. De esta forma el relé decide si operar o no, como se observa en la siguiente figura.

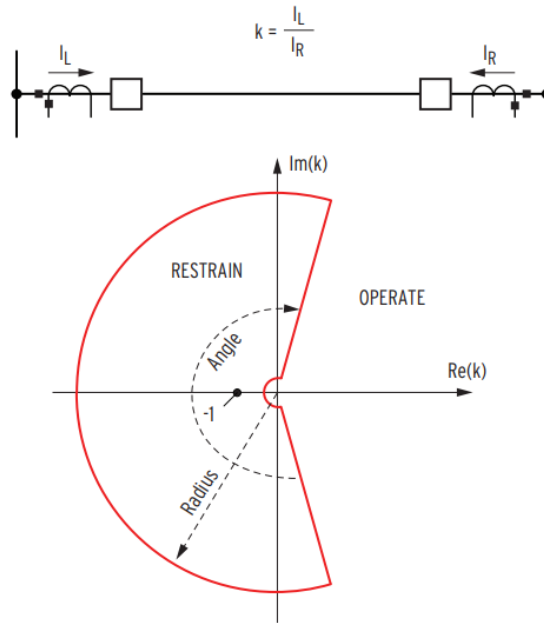


Figura 25. Característica de operación AlphaPlane [13]

Este principio de operación está comprobado que es seguro, rápido y sensible, ya que asegura que el relé no se vea afectado por errores en la sincronización de datos, o por saturación en los transformadores de corriente. Además, proporciona una adecuada sensibilidad y velocidad de los elementos de secuencia 87LQ y 87LG en presencia de elevadas corrientes de carga en la línea.

#### Algoritmo de detección de faltas externas

La función 87L del relé incorpora un algoritmo de detección de faltas externas de gran precisión. Este algoritmo analiza determinadas características de las corrientes de la zona de protección y detecta si hay faltas externas, ratios X/R demasiado altos, o peligro de saturación de los transformadores.

El algoritmo de detección de faltas consta de dos vías: una para corriente alterna (AC) y otra para corriente continua (DC). La de corriente alterna protege contra saturaciones rápidas de los transformadores, que pueden deberse a corrientes muy altas provocadas por cortocircuitos u otros fallos externos. Por otro lado, la de corriente continua, protege frente a saturaciones más lentas que pueden resultar de una componente grande y duradera de corriente continua provocada por altos ratios X/R. La siguiente figura es un diagrama lógico del sistema de detección de faltas externas del relé.

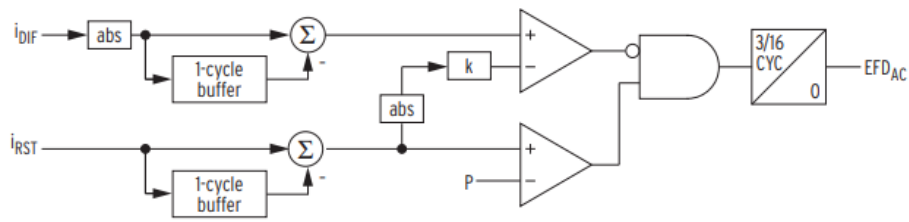


Figura 26. Diagrama lógico de algoritmo de detección de falta externas SEL-411L

### Compensación de la corriente de carga de la línea

La corriente de carga se origina en las líneas por las cargas y descargas alternas generadas por la tensión alterna del sistema, y depende de la capacidad de la línea. Al compensar la corriente de carga se disminuyen las pérdidas en la línea, y, por tanto, se aumenta su eficiencia y su factor de potencia.

El relé compensa la corriente de carga de la línea mediante la diferencia entre un valor instantáneo estimado de la corriente de carga total por fase de la línea y la corriente diferencial medida en ese instante. Este método de compensación es preciso tanto en régimen permanente como en condiciones transitorias.

Mediante la compensación de las corrientes de fase, se elimina la componente de corriente de carga de las corrientes de secuencia y se mejora tanto el elemento 87LP, como los elementos 87LQ, y 87LG. Cada uno de los terminales de la función 87L con acceso a tensión del relé calcula de manera instantánea la corriente de carga de la siguiente forma:

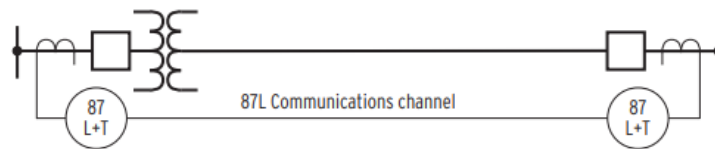
$$i_{CHARGE} = C_{LINE} \frac{dv}{dt}$$

Posteriormente, cada relé compensa una parte de la corriente de carga proporcional al número de terminales. En el caso de dos relés, cada uno eliminaría el 50% de la corriente de carga total.



## Protección de transformadores

La función 87L del relé también admite transformadores de potencia conectados a la línea, como en el esquema de la figura. En estos casos la protección diferencial protege tanto la línea como el transformador.



*Figura 27. Línea con transformadores con protección 87L*

Esta aplicación mejora la experiencia operativa y permite el autocierre mediante la identificación de los fallos tanto en el transformador como en la línea de forma precisa. Proporciona eliminación de la sobreexcitación, así como bloqueo de armónicos para condiciones de irrupción magnetizante.

## Comunicaciones seguras

Los relés diferenciales de corriente están expuestos a varios tipos de comunicaciones, por lo que es importante que el diseño del relé permita que estas tengan lugar de forma segura. El ruido en las comunicaciones puede dañar los datos que se transmiten y afectar a la seguridad del sistema. Este ruido puede deberse a interferencias en los medios del canal de comunicación, componentes electrónicos defectuosos, o mala calidad de la fibra óptica.

El relé SEL-411L utiliza un código Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH) de 32 bits para proteger la integridad de los datos de la función 87L. Con este sistema la probabilidad de que haya errores en la comunicación de los datos es muy pequeña ( $p < 1.2 \cdot 10^{-10}$ ).

El relé cuenta con un detector de perturbaciones locales (87DDL), que responde a las corrientes y tensiones de secuencia; y un detector de perturbaciones remotas (87DDR), que responde a las componentes de secuencia de todas las corrientes remotas.

### 5.3.3. ELEMENTOS DIFERENCIALES

- Elementos diferenciales de fase

Setting	Description	Range	Default
87LPP	Pickup threshold of the phase differential element in the normal security mode (pu)	OFF, 0.1–2	1.2
87LPR	Radius of the phase differential element in the normal security mode	1.2–8	6
87LPA	Blocking angle of the phase differential element in the normal security mode (deg)	90–270	195
87LPPS <sup>a</sup>	Pickup threshold of the phase differential element in the extended security mode (pu)	OFF, 0.1–2	1.44
87LPRS <sup>a</sup>	Radius of the phase differential element in the extended security mode	1.2–8	7.2
87LPAS <sup>a</sup>	Blocking angle of the phase differential element in the extended security mode (deg)	90–270	234

<sup>a</sup> Advanced settings (EADVS = Y).

Tabla 17. Ajustes de los elementos diferenciales de fase [13]

- Elementos diferenciales de secuencia negativa

Setting	Description	Range	Default
87LQP	Pickup threshold of the negative-sequence differential element in the normal security mode (pu)	OFF, 0.1–2	0.25
87LQR	Radius of the negative-sequence differential element in the normal security mode	1.2–8	6
87LQA	Blocking angle of the negative-sequence differential element in the normal security mode (deg)	90–270	195
87LQPS <sup>a</sup>	Pickup threshold of the negative-sequence differential element in the extended security mode (pu)	OFF, 0.1–2	0.3
87LQRS <sup>a</sup>	Radius of the negative-sequence differential element in the extended security mode	1.2–8	7.2
87LQAS <sup>a</sup>	Blocking angle of the negative-sequence differential element in the extended security mode (deg)	90–270	234

<sup>a</sup> Advanced settings (EADVS = Y).

Tabla 18. Ajustes de los elementos diferenciales de secuencia negativa [13]

- Elementos diferenciales de secuencia neutra

Setting	Description	Range	Default
87LGP	Pickup threshold of the zero-sequence differential element in the normal security mode (pu)	OFF, 0.1–2	0.25
87LGR	Radius of the zero-sequence differential element in the normal security mode	1.2–8	6
87LGA	Blocking angle of the zero-sequence differential element in the normal security mode (deg)	90–270	195
87LGPS <sup>a</sup>	Pickup threshold of the zero-sequence differential element in the extended security mode (pu)	OFF, 0.1–2	0.3
87LGRS <sup>a</sup>	Radius of the zero-sequence differential element in the extended security mode	1.2–8	7.2
87LGAS <sup>a</sup>	Blocking angle of the zero-sequence differential element in the extended security mode (deg)	90–270	234

<sup>a</sup> Advanced settings (EADVS = Y).

Tabla 19. Ajustes de los elementos diferenciales de secuencia neutra [13]

## 6. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Producido en colaboración con TROLLBACK COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1.212.529.1010  
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dpicamp@trollback.com

Figura 28. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible fueron desarrollados en 2015 por la Organización de las Naciones Unidas y se pretende alcanzarlos para el año 2030. Estos objetivos persiguen acabar con la pobreza y proteger el planeta de la contaminación y el calentamiento global. Para alcanzarlos es importante que desde todos los ámbitos (gobiernos, empresas privadas, sociedad civil) se colabore de una forma u otra. El sector de la energía eléctrica, y especialmente el del transporte y distribución de electricidad, es clave para la consecución de estos objetivos, ya que puede contribuir a que haya un suministro de energía seguro y que llegue a todas las personas. Es por eso por lo que el desarrollo de líneas eléctricas con las protecciones adecuadas para evitar incidentes es muy importante y puede ayudar a gran cantidad de personas. De los 17 objetivos, los que más alineados están con este proyecto son los siguientes:

### Objetivo 8: trabajo decente y crecimiento económico

El desarrollo de una mayor y más eficiente red eléctrica en todo el planeta permitiría el desarrollo económico y aportaría empleo a una gran cantidad de personas. Si se consiguieran reducir los costes de la instalación de protecciones para líneas eléctricas sin que se perdiera seguridad, se podría hacer llegar energía eléctrica a más lugares favoreciendo así la creación de riqueza. Además, unas instalaciones eléctricas seguras evitan accidentes laborales, mejorando así las condiciones de los trabajadores de este sector.

### Objetivo 11: ciudades y comunidades sostenibles

La cuestión medioambiental es un tema muy importante en nuestros días y desde gran parte de los campos de la ingeniería se está trabajando para desarrollar soluciones sostenibles. Las líneas de alta tensión tienen grandes impactos ambientales que son difíciles de reducir. Además del impacto evidente impacto paisajístico, las líneas de alta tensión también afectan a los suelos y a los bosques. Por otra parte, aunque las líneas subterráneas son más sostenibles, su coste económico es mucho mayor. Con este proyecto se intentará reducir, en la medida de lo posible, dicho impacto ambiental, con el objeto de lograr unas ciudades más sostenibles.

### Objetivo 7: energía asequible y no contaminante

Relacionado con los dos anteriores, este proyecto también se alinea con este objetivo. Si se aumenta la eficiencia y se reducen los costes de la distribución eléctrica se podrá garantizar el acceso universal a servicios energéticos de calidad. Aunque en España el acceso a la electricidad segura es del 100%, en la actualidad todavía hay alrededor de un 13% de la población mundial que no tiene acceso a este servicio.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alstom Grid. (2011). Network Protection and Automation Guide.
- [2] Red Eléctrica Española (2005). Criterios generales de protección del sistema eléctrico peninsular español.
- [3] Gómez Expósito, A. (2002). Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica.
- [4] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (2008). Real Decreto 223/2008.
- [5] Endesa. (2017). Especificaciones técnicas particulares de líneas aéreas de alta tensión >36 kV
- [6] E-ON Distribución. (2013). Proyecto tipo de líneas de alta tensión aéreas (>36 kV)
- [7] Endesa. (2017). Especificaciones técnicas particulares de líneas subterráneas de alta tensión >36 kV
- [8] Nexans. (2011). 60-500 kV High Voltage Underground Power Cables: XLPE insulated cables.
- [9] Villarroel Moreno, M. (2008). Protecciones de sistemas eléctricos.
- [10] ABB. (2007). Technical reference manual – Line distance protection IED RED 670.
- [11] Perales García, M. (2011). Estudio de sistemas protectivos en redes eléctricas en alta tensión. Estudio y mejora de procedimientos para el análisis de incidentes.
- [12] Universidad Tecnológica Nacional. (2014). Método de las componentes simétricas.
- [13] Schweitzer Engineering Laboratories. (2015). SEL-411L Relay. Protection and Automation System. Instruction Manual.
- [14] Bilbao Crespo, C. (2018). Desarrollo de herramienta de simulación del relé SEL-411L.
- [15] Martínez-Lozano, M. (2005). Compensación de los transitorios en el secundario de un transformador capacitivo (CVT).