Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS
DE ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA PARA ALTA
VELOCIDAD, ALIMENTADOS EN 2×25 kV
(SISTEMA BIFÁSICO CON AUTOTRANSFORMADORES)

Tesis Doctoral

Jesús Serrano Álvarez

Madrid, 2017

Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y
Electrónica e Informática Industrial

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS
DE ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA PARA ALTA
VELOCIDAD, ALIMENTADOS EN 2×25 kV
(SISTEMA BIFÁSICO CON AUTOTRANSFORMADORES)

Tesis Doctoral

Jesús Serrano Álvarez

Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid

Director de tesis:

Dr. Carlos Platero Gaona

Dr. Ingeniero Industrial

Madrid, 2017

Tribunal

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Suplentes:

A mi esposa e hijas

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han ayudado en la elaboración de este trabajo doctoral, en especial a aquellas personas que me han aportado las ideas fundamentales para llevar a cabo la consecución de este proyecto.

También quiero agradecer la ayuda de todo tipo que me han dado las personas del departamento de Ingeniería Eléctrica. Y sobre todo expresar mi gratitud a las personas que me han dedicado parte de su tiempo para que yo pudiera seguir adelante con este trabajo.

Índice General

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estructura de la tesis	4
Capítulo 2 PROTECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN LOS SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA.....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Sistemas de electrificación ferroviaria	8
2.2.1 Estructura de un sistema de electrificación ferroviaria	8
2.2.2 Clasificación de los sistemas de electrificación ferroviaria.....	13
2.2.3 Sistemas de electrificación ferroviaria en corriente continua.....	15
2.2.4 Sistemas de electrificación ferroviaria en corriente alterna.....	18
2.2.4.1 Sistemas de electrificación con frecuencia reducida	18
2.2.4.2 Sistemas de electrificación con frecuencia de red pública	20
2.2.4.2.1 Electrificación a 25 kV 50 Hz	20
2.2.4.2.2 Circuito de retorno de corriente y puesta a tierra	23
2.2.4.2.3 Estructura del sistema en caso de fallos	27
2.2.4.3 Sistemas de electrificación ferroviaria 2×25 kV	27
2.2.4.3.1 Esquema de conexión de la línea a la subestación	28
2.2.4.3.2 Distribución de corriente en los conductores	31
2.2.4.3.3 Ventajas y desventajas de un sistema 2×25 kV	32
2.2.4.3.4 Estructura del sistema en caso de fallos	33

2.3 Protecciones eléctricas en los sistemas ferroviarios de corriente alterna.....	35
2.3.1 Introducción a las protecciones eléctricas.....	35
2.3.2 Elementos de las protecciones eléctricas	37
2.3.2.1 Transformadores de Intensidad	38
2.3.2.2 Transformadores de Tensión	39
2.3.2.3 Interruptores automáticos de corriente alterna	40
2.3.2.4 Relés de protección	41
2.3.3 Clasificación de las protecciones eléctricas	43
2.3.3.1 Protección de sobreintensidad.....	45
2.3.3.2 Protección de sobreintensidad direccional	47
2.3.3.3 Protección diferencial.....	48
2.3.3.4 Protección de distancia.....	48
2.3.4 Estructura de las protecciones ferroviarias de corriente alterna.....	53
2.3.4.1 Estructura en sistemas de tracción 1×25 kV	54
2.3.4.1.1 Protección a la entrada de la subestación.....	54
2.3.4.1.2 Protección de transformador	55
2.3.4.1.3 Protección a la salida de la subestación	56
2.3.4.1.4 Protección de la línea de contacto	56
2.3.4.2 Estructura en sistemas de tracción 2×25 kV	57
2.3.4.3 Estructura en autotransformadores en sistemas 2×25 kV	58
2.3.5 Detección de faltas en líneas ferroviarias de corriente alterna.....	61
2.3.5.1 Protecciones de distancia en líneas de corriente alterna	62
2.3.5.2 Propiedades de los relés de distancia ferroviarios.....	63
2.3.5.3 Características optimizadas de los relés de distancia	64
2.3.5.4 Configuración de la protección de distancia en las líneas.....	65
2.3.5.5 Ajuste de alcances de zonas de protección en 1×25 kV.....	66

2.3.5.6 Ajuste de alcances de zonas de protección en 2×25 kV	67
2.4 Localización de faltas a tierra en sistemas ferroviarios de corriente alterna	71
2.4.1 Localización de faltas a tierra en sistemas 1×25 kV	72
2.4.2 Localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV	72
2.4.3 Métodos de localización de faltas a tierra en 2×25 kV	73
Capítulo 3 DESCRIPCIÓN DEL NUEVO MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV	81
3.1 Introducción.....	81
3.2 Método de identificación de la subsección y el conductor con falta a tierra en líneas 2×25 kV	82
3.2.1 Fundamento del método	82
3.2.2 Aplicación a secciones con tres subsecciones	86
3.2.3 Extensión a secciones con n subsecciones	89
3.3 Localización de la posición de una falta a tierra en líneas 2×25 kV	92
3.3.1 Distribución característica de las intensidades en autotransformador en caso de falta a tierra.....	93
3.3.2 Método de localización de faltas a tierra en 2×25 kV	96
3.3.3 Extensión del método de localización para secciones con n subsecciones	100
3.3.3.1 Análisis del método de localización para secciones 2×25 kV con dos subsecciones	100
3.3.3.2 Análisis del método de localización para secciones 2×25 kV con cuatro subsecciones	102
3.4 Conclusiones.....	103
Capítulo 4 SIMULACIÓN EN ORDENADOR DEL NUEVO MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV	105

4.1 Introducción	105
4.1.1 Datos para la simulación	106
4.1.2 Esquema para la simulación.....	108
4.2 Simulación de la impedancia vista desde la subestación en función de la distancia a la que ocurren las faltas.....	110
4.3 Simulación del Método de identificación de la subsección y el conductor con falta a tierra en líneas 2x25 kV	112
4.4 Simulación de la localización de la posición de las faltas a tierra en sistemas de alimentación 2 x 25 kV	114
4.5 Simulación de la generalización del método de localización de la posición de faltas a tierra a secciones con n subsecciones.....	117
4.5.1 Simulación de faltas a tierra en secciones con dos subsecciones.....	117
4.5.2 Simulación de faltas a tierra en secciones con cuatro subsecciones	121
4.6 Simulación de la influencia de la potencia consumida por los trenes de alta velocidad sobre el método de localización de faltas a tierra.....	125
4.6.1 Simulación de la influencia del consumo de los trenes sobre los ángulos intensidad-tensión.....	127
4.6.2 Simulación de la influencia del consumo de los trenes sobre los módulos de la intensidad en los autotransformadores	132
4.7 Simulación del método de localización de faltas a tierra en caso de vía doble ferroviaria	135
4.7.1 Faltas entre catenaria y tierra con vía doble.....	136
4.7.2 Faltas entre alimentador y tierra con vía doble	137
4.8 Simulación de la influencia de la resistencia de defecto sobre el método de localización de faltas a tierra	139

4.8.1 Influencia de la resistencia de falta sobre los ángulos intensidad-tensión en autotransformador.....	140
4.8.2 Influencia de la resistencia de falta sobre las intensidades de los autotransformadores	141
4.9 Conclusiones.....	143
Capítulo 5 ENSAYOS EN LABORATORIO PARA VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV	145
5.1 Introducción.....	145
5.2 Simulador de laboratorio para obtención de subsección y conductor en falta	146
5.2.1 Esquema de la implementación en el laboratorio	149
5.2.1.1 Fuentes de Alimentación	150
5.2.1.2 Autotransformadores	151
5.2.1.3 Impedancias de línea	152
5.2.1.4 Módulos de medida	152
5.2.1.4.1 Módulo de medida en autotransformador intermedio	152
5.2.1.4.2 Módulo de medida y corte en subestación	154
5.2.1.5 Relés de sobreintensidad	155
5.2.1.5.1 Relé en subestación	155
5.2.1.5.2 Relé en autotransformador intermedio	157
5.2.1.6 Controlador lógico programable.....	162
5.3 Simulador de laboratorio para obtención de la posición de la falta.....	165
5.3.1 Descripción del simulador de laboratorio para medición de intensidades en los autotransformadores	166
5.3.1.1 Dispositivos de instalación de la línea.....	167
5.3.1.2 Dispositivos de medida y protección.....	170

5.3.2 Ensayos de laboratorio realizados para la obtención de intensidades en los autotransformadores	173
5.3.2.1 Ensayos de intensidades en los autotransformadores sin circulación de trenes	174
5.3.2.1.1 Faltas entre catenaria y carril	174
5.3.2.1.2 Faltas entre alimentador y carril.....	177
5.3.2.2 Ensayos de intensidades en los autotransformadores cuando hay circulación de trenes.....	179
5.3.2.2.1 Faltas entre catenaria y carril con un tren	180
5.3.2.2.1.1 Tren en la primera subsección.....	182
5.3.2.2.1.2 Tren en la segunda subsección	182
5.3.2.2.1.3 Tren en la tercera subsección	183
5.3.2.2.2 Faltas entre alimentador y carril con un tren.....	183
5.3.2.2.2.1 Tren en la primera subsección.....	185
5.3.2.2.2.2 Tren en la segunda subsección	186
5.3.2.2.2.3 Tren en la tercera subsección	186
5.3.2.2.3 Faltas con dos trenes circulando.....	187
5.3.2.2.3.1 Faltas entre catenaria y carril	188
5.3.2.2.3.2 Faltas entre alimentador y carril.....	188
5.3.3 Comparación de los resultados de las intensidades en autotransformadores obtenidas en laboratorio	190
5.4 Conclusiones	192
Capítulo 6 CONCLUSIONES	195
6.1 Conclusiones	195
6.2 Aportaciones originales.....	197

6.3 Trabajos futuros.....	197
Bibliografía.....	199

Índice figuras

2.1. Esquema simplificado de los elementos de la electrificación ferroviaria	9
2.2 Detalle del tramo alimentado por una subestación.....	10
2.3. Diagrama de un sistema de electrificación en funcionamiento normal.....	11
2.4. Disposición de los sistemas eléctricos ferroviarios en relación con las redes eléctricas públicas	14
2.5. Estructura del sistema de electrificación en corriente continua	16
2.6. Esquema de una estructura básica centralizada en el sistema de electrificación de corriente alterna 16 2/3 Hz 15 kV.....	19
2.7. Esquema del sistema de electrificación de los ferrocarriles alemanes	20
2.8. Esquema general del sistema de electrificación de corriente alterna a 50 Hz 25 kV.....	21
2.9. Conexión cíclica de subestaciones a la red eléctrica trifásica, obteniendo tramos de línea con ángulos de tensión con separación de 120°	22
2.10. Conexión de la subestación de tracción a la red eléctrica pública mediante transformadores especiales	23
2.11. Conexiones a tierra en electrificaciones de corriente alterna	24
2.12. Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna	25
2.13. Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna con transformadores auxiliares de retorno	26
2.14. Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna con autotransformadores y alimentador negativo	27

2.15. Esquema del tramo completo de vía alimentado por una subestación en un sistema electrificado con autotransformadores y conductor de alimentación negativo	29
2.16. Esquema de la disposición de los conductores en una línea aérea de contacto con autotransformadores y conductor alimentador negativo	30
2.17. Distribución de corrientes en los conductores en una línea aérea de contacto con autotransformadores y conductor alimentador negativo	32
2.18. Esquema de la estructura en corriente alterna en funcionamiento normal.....	34
2.19. Estructura de un equipo de protección indirecto	37
2.20. Evolución de las diferentes tecnologías aplicadas a los relés	42
2.21. Representación en el tiempo de los principales sistemas de protección	44
2.22. Familia de curvas de característica normal inversa en una protección de sobreintensidad.....	46
2.23. Esquema de actuación de un elemento direccional con ángulo de actuación menor de $\pm 90^\circ$	48
2.24. Representación del principio de la protección de distancia	49
2.25. Disposición de los ajustes de las protecciones de distancia	50
2.26. Característica de mínima impedancia y característica mho	52
2.27. Característica poligonal de una protección de distancia	52
2.28. Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una subestación de tracción ferroviaria de corriente alterna	55
2.29. Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una subestación de tracción ferroviaria de corriente alterna 2x25kV	58
2.30. Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una estación de autotransformador intermedia de tracción ferroviaria de corriente alterna 2x25 kV	59

2.31. Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una estación de autotransformador final de 2x25 kV	60
2.32. Característica típica de impedancia de un relé de distancia ferroviario	64
2.33. Característica poligonal optimizada de impedancia de un relé de distancia ferroviario	65
2.34. Esquema de protección de catenaria y alimentador con un único relé de distancia en una sección de un sistema de alimentación 2x25kV	68
2.35. Diagrama del módulo de la impedancia combinada en subestación ST en función de la distancia de ST a una falta catenaria-tierra para una sección 2x25 kV de vía única.....	69
2.36. Diagrama del módulo de la impedancia combinada en subestación ST en función de la distancia de ST a la falta catenaria-tierra para una sección 2x25 kV de cuatro vías.....	70
2.37. Módulo de la impedancia vista desde la subestación en función de la distancia a la que ha sucedido una falta a tierra en un sistema 1x25kV	72
3.1. Diagrama simplificado de un sistema 2×25 kV y su distribución de intensidades en una sección con tres subsecciones	83
3.2. Distribución teórica de intensidades y tensiones en un sistema 2×25 kV	85
3.3. Distribución de intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en un Sistema 2×25 kV en operación normal	86
3.4. Distribución de intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en un Sistema 2×25 kV en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección C	87
3.5. Esquemas con las intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en los autotransformadores en caso de una falta alimentador-tierra en la subsección C.....	88
3.6. Esquemas con las intensidades (I_A) y tensiones(V_C) en los autotransformadores en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección B.....	89

3.7. Sección de n subsecciones alimentada desde la subestación de tracción (TS) con n-1 dispositivos medidores de tensión e intensidad	90
3.8. Resumen del proceso completo del nuevo método de localización de una falta a tierra en Sistemas 2×25 kV	92
3.9. Esquema de una sección de un Sistema 2×25 kV en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección C.....	94
3.10. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto. Falta catenaria - tierra.....	95
3.11. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto. Falta alimentador- tierra	95
3.12. Diagrama de flujo del método de localización de faltas a tierra	99
3.13. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con dos subsecciones. Falta catenaria - tierra	101
3.14. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con dos subsecciones. Falta alimentador - tierra.....	101
3.15. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con cuatro subsecciones. Falta catenaria - tierra	102
3.16. Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con cuatro subsecciones. Falta alimentador - tierra	103
4.1. Diagrama del circuito utilizado para realizar la simulación de un sistema 2x25 kV en una sección con tres subsecciones	105
4.2. Configuración de vía para el modelo, calculado mediante el programa ATP	106
4.3. Esquema del circuito utilizado para realizar la simulación mediante el método nodal modificado en una sección con tres subsecciones.....	109
4.4. Impedancia en función de la distancia. Faltas entre catenaria y tierra.....	111

4.5. Impedancia en función de la distancia. Faltas entre alimentador y tierra.....	111
4.6. Ángulo entre I_A y V_C en los diferentes autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo tierra	113
4.7. Ángulo entre I_A y V_C en los diferentes autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor negativo-tierra.....	114
4.8. Valores de intensidad en los arrollamientos de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección en caso de falta catenaria-raíl	115
4.9. Valores de intensidad en los arrollamientos de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección en caso de falta alimentador-raíl.....	116
4.10. Esquema utilizado para realizar la simulación de un sistema 2x25 kV en una sección con dos subsecciones	117
4.11. Ángulo entre I_A y V_C en los dos autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra	118
4.12. Valores de intensidad en los autotransformadores AT1 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción en caso de falta catenaria-raíl	119
4.13. Ángulo entre I_A y V_C en los dos autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor negativo tierra.....	120
4.14. Valores de intensidad en los autotransformadores AT1 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción en caso de falta alimentador – raíl.....	120
4.15. Esquema utilizado para realizar la simulación de un sistema 2x25 kV en una sección con cuatro subsecciones.....	121

4.16. Ángulo entre I_A y V_C en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra	122
4.17. Valores de los módulos de intensidad en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra.	123
4.18. Ángulo entre I_A y V_C en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta alimentador negativo-tierra	124
4.19. Valores de los módulos de intensidad en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta alimentador- tierra.....	125
4.20. Representación del circuito utilizado para realizar la simulación de la influencia del consumo por circulación de trenes en los ángulos entre intensidades y tensiones y en los módulos de intensidad en los autotransformadores	126
4.21. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Tren en el punto medio de la subsección A	127
4.22. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador y tierra. Tren en el punto medio de la subsección A.....	128
4.23. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Tren en el punto medio de la subsección B.....	129
4.24. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador negativo y tierra. Tren en el punto medio de la subsección C.....	130
4.25. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Dos trenes, uno circulando en el punto medio de la subsección A y el otro circulando en el punto medio de la subsección B.....	131

4.26. Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador negativo y tierra. Dos trenes, uno circulando en el punto medio de las subsección A y el otro circulando en el punto medio de la subsección C	132
4.27. Comparación de valores de intensidad de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección, para faltas entre catenaria y raíl, con trenes circulando.....	133
4.28. Comparación de valores de intensidad de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección, para faltas entre alimentador y raíl, con trenes circulando	134
4.29. Esquema empleado para simular una sección de vía doble de tres subsecciones con el método nodal modificado	135
4.30. Ángulos entre la intensidad en los autotransformadores y la tensión en catenaria en función de la distancia con faltas catenaria – tierra en vía doble	136
4.31. Intensidades en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en caso de falta catenaria – tierra en vía doble.....	137
4.32. Ángulos intensidad-tensión en los autotransformadores en función de la distancia con faltas alimentador – tierra. Para vía doble	138
4.33. Intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas alimentador – tierra en vía doble	139
4.34. Ángulos I_A - V_C en función de la distancia con faltas con resistencia catenaria – tierra	140
4.35. Ángulos I_A - V_C en función de la distancia con faltas con resistencia alimentador – tierra.....	141
4.36. Intensidades en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en caso de falta con resistencia catenaria – tierra.....	142
4.37. Intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas con resistencia alimentador – tierra	143

5.1. Esquema de una sección 2x25 kV con tres subsecciones	146
5.2. Disposición simplificada de la instalación en laboratorio para los ensayos de obtención de la subsección y el conductor en falta en una línea 2x25 kV	147
5.3. Vista general del simulador empleado en los ensayos de laboratorio.....	149
5.4. Esquema que muestra las conexiones de los distintos módulos de la maqueta realizada en el laboratorio para la obtención de la subsección y el conductor en falta	150
5.5. Conexión de dos fuentes en tándem para conseguir la tensión de catenaria y alimentador.....	151
5.6. Módulo de autotransformadores en laboratorio	152
5.7. Conexiones del relé MiCOM P127 de autotransformador intermedio al módulo de medida de ATS y al PLC.....	153
5.8. Vista de los módulos de medida.....	154
5.9. Conexiones del módulo de medida y corte de subestación al relé MiCom P127 de subestación	155
5.10. Vista del relé MiCOM P127 con disparo en la fase A	156
5.11. Ángulos entre intensidades y tensiones en autotransformadores con falta catenaria-tierra.....	158
5.12. Ángulos entre intensidades y tensiones en autotransformadores con falta entre alimentador y tierra.	158
5.13. Oscilografía del registro de datos de falta generados por el relé P127.	159
5.14. Esquema del conexionado de los módulos de medida y relés de los dos autotransformadores intermedios con el PLC y el ordenador de control (PC)	162
5.15. Vista del controlador lógico programable empleado: un TSX3722.....	163
5.16. Resultado en la pantalla del ordenador de control	164

5.17. Pantalla que aparece en el ordenador de control en caso de ausencia de faltas a tierra en el tramo de línea controlada	164
5.18. Circuito de la instalación en laboratorio empleado en los ensayos de obtención de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta	166
5.19. Esquema de la instalación en el laboratorio para la obtención de las tablas intensidad medida en autotransformadores – distancia a la falta	167
5.20. Disposición de los elementos del simulador en el laboratorio para la obtención de las tablas intensidad en los autotransformadores – distancia a la falta.....	168
5.21. Foto y esquema de las impedancias variables $Z1$ y $Z2$ empleadas en la instalación, de valor $10 \times (0,05 + j 0,5 \text{ ohm})$	170
5.22. Esquema de la instalación en el laboratorio en el que se muestran los dispositivos de medida y protección empleados.....	171
5.23. Disposición de los elementos de medida y protección del simulador en el laboratorio.....	172
5.24. Esquema para realización de faltas catenaria - tierra a lo largo de la sección eléctrica ferroviaria sin circulación de trenes	175
5.25. Distribución de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a las faltas entre catenaria y carril sin que haya circulación de trenes	176
5.26. Esquema para realización de faltas alimentador - tierra a lo largo de la sección ferroviaria sin circulación de trenes.....	178
5.27. Distribución de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a las faltas entre alimentador y carril sin que haya circulación de trenes .	178
5.28. Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la sección mediante la resistencia R	180

5.29. Disposición física de las resistencias que simulaban la circulación de trenes en los ensayos de laboratorio para la obtención de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta	181
5.30. Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la subsección intermedia con faltas catenaria - carril a lo largo de toda la sección.....	181
5.31. Diagrama de intensidad – distancia con faltas catenaria – tierra. Un tren circulando en el punto medio de la primera subsección.....	182
5.32. Distribución de intensidades en los autotransformadores en los ensayos con tren en la segunda subsección con faltas entre catenaria y carril	183
5.33. Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con tren en la tercera subsección con faltas entre catenaria y carril	184
5.34. Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la primera subsección con faltas alimentador - carril a lo largo de toda la sección.....	184
5.35. Distribución de intensidades en los autotransformadores en los ensayos con tren en la primera subsección con faltas entre alimentador y carril	185
5.36. Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con tren en la segunda subsección con faltas alimentador – tierra ..	186
5.37. Diagrama de intensidad – distancia con faltas alimentador – tierra. Un tren circulando en el punto medio de la tercera subsección	187
5.38. Esquema de la simulación de dos trenes circulando por el punto medio de la primera y la tercera subsección con falta alimentador – carril.....	188
5.39. Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con trenes en la primera y tercera subsección con faltas entre catenaria y carril	189
5.40. Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con dos trenes en la primera y tercera subsección con faltas alimentador – tierra	189

5.41. Comparación de valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas entre catenaria y tierra.	190
5.42. Comparación de valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas entre alimentador y tierra.	191

Resumen

El conocimiento de la posición en que ocurre una falta a tierra es una tarea complicada en un sistema de alimentación ferroviaria 2×25 kV. Debido a la instalación de autotransformadores a intervalos regulares en la línea, no es posible utilizar el método de protección de distancia porque la relación impedancia - distancia a la falta no es lineal en estos sistemas de electrificación, a diferencia de lo que ocurre en los sistemas de alimentación 1×25 kV. Varias soluciones se han empleado para conseguir localizar dicha posición en los sistemas 2×25 kV. El método descrito en esta tesis permite obtener de manera económica, con precisión y en tiempo real la posición de la falta. Este método está basado en obtener en el momento de la falta a tierra el valor del módulo de la intensidad en los diferentes autotransformadores y el valor del ángulo de fase entre dicha intensidad y la tensión del terminal positivo a tierra en cada autotransformador.

Este nuevo método de localización de falta a tierra en sistemas de potencia de 2×25 kV se divide en dos etapas diferentes. En la primera etapa, la subsección entre autotransformadores y el conductor positivo o negativo donde se ha producido la falta se identifican analizando el ángulo de fase entre las tensiones y corrientes en los autotransformadores y los valores de intensidad en dichos autotransformadores leídos en el momento en que ocurre dicha falta. En el caso de una falta a tierra, la corriente en los autotransformadores adyacentes a la posición de la falta supera un umbral prefijado, y el sistema de localización se activará.

En la segunda etapa, la localización de la falta se basa en el cálculo previo de los valores de las corrientes en los autotransformadores para faltas a tierra a lo largo de todas las posiciones de una sección. Los cálculos deben realizarse teniendo en cuenta específicamente los datos propios de la instalación a proteger, almacenándose los valores de la corriente de falta obtenidos en tablas intensidad- distancia.

La localización de la falta se realiza mediante una comparación de la intensidad medida en los dos autotransformadores adyacentes a la posición de la falta con los valores precalculados almacenados en las tablas intensidad-distancia.

Abstract

The ground fault location is a complicated task in 2×25 kV railway power supply systems. Owing to the installation of autotransformers at regular intervals along the line, distance protection relays cannot be used with the aim of locating ground faults in 2×25 kV railway power supply systems. The reason is that the ratio between impedance and distance to the fault point is not linear in these electrification systems, unlike in 1×25 kV power systems. Various methods have been used to localize the ground fault position in 2×25 kV systems. The method described here allows an economical location of a ground fault in an accurate way in real time. This method is based on obtaining the value of the module of the circulating current in each autotransformer when that ground fault occurs and the value of the angle between such current and the voltage at the positive terminal in each autotransformer.

This new method for ground fault location in 2×25 kV power systems is divided into two different stages. In the first stage, the subsection between autotransformers and the positive or negative conductor where the fault has occurred are identified by analyzing the phase angle between the voltages and currents in the autotransformers and their current values.

In the case of a ground fault, the current in some of the autotransformers would exceed a threshold set previously, and the location system should be activated.

In the second stage, the fault locator is based on the previous calculation of the currents in the autotransformer for a ground fault along all the positions of a section. The calculations should be performed specifically taking into consideration the precise data of the power system. The values of the fault current should be stored as look-up tables.

The fault location is performed by a comparison of the current measured in the two adjacent autotransformers to the fault position to the pre-calculated value stored in the look-up tables. In this way, the location of the fault can be found.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

El sistema de alimentación de tracción más adecuado en la actualidad para proporcionar energía eléctrica a los trenes de alta velocidad es el sistema de alimentación ferroviario 2×25 kV, en el que además del conductor de alimentación habitual positivo, conocido como catenaria, tiene también instalado un conductor de alimentación negativo, y autotransformadores conectados a dichos conductores y al carril unido a tierra. Este sistema permite suministrar, sin incrementar la sección de la catenaria ni disminuir la distancia entre subestaciones, la elevada potencia, superior a 8 MW, demandada por un tren que circula a más de 300 km/h. Dentro de los sistemas de tracción con conductor negativo y autotransformadores, aunque también hay líneas con este sistema de tracción que utilizan otras tensiones como es el caso del ferrocarril del sureste de Pensilvania en Estados Unidos (12 kV+24 kV) [Natarajan y otros, 1997], el más utilizado es el sistema denominado 2×25 kV. La razón de denominarle de esta manera es porque entre el conductor positivo ó catenaria, y el carril hay una tensión de 25 kV de corriente alterna, y entre el carril y el alimentador negativo también hay una tensión de 25 kV de corriente alterna con polaridad contraria. Con este sistema, comparado con el sistema tradicional denominado 1×25 kV de alimentación únicamente con la catenaria, se puede disminuir el número necesario de subestaciones de tracción que hay que instalar a lo largo de la línea debido a que tiene menores pérdidas y menor caída de tensión en la línea, y, asimismo, se consiguen menores perturbaciones en las instalaciones eléctricas del entorno de la línea [Han y otros, 2011].

En el sistema de tracción 2×25 kV, cada subestación de tracción, que recibe la energía de la red de distribución eléctrica, alimenta dos secciones, una en cada dirección de la línea. Cada

sección se compone de varias subsecciones de similar longitud que están delimitadas por estaciones con autotransformadores de potencia (ATS). Estos autotransformadores están conectados en un extremo al conductor de alimentación positiva de 25 kV (catenaria) y en el otro extremo al conductor de alimentación negativa de 25 kV (también conocido como alimentador o “feeder”), estando el punto intermedio de su arrollamiento conectado al carril y a tierra. Otro autotransformador (SATS) se instala al final de la sección conectándose de la misma manera que los autotransformadores instalados en puntos intermedios de la sección.

Cualquier instalación eléctrica necesita sistemas de protección adecuados que aseguren un funcionamiento fiable y seguro. Esta necesidad se acentúa en el caso de los sistemas eléctricos de tracción ferroviaria debido al incremento de faltas causadas por el deslizamiento del pantógrafo sobre el hilo de contacto, que incluso puede provocar la rotura de éste, y a las peculiaridades del entorno del trazado ferroviario. Estas faltas ocasionan severos problemas económicos y sociales al interrumpir el servicio ferroviario. Es muy importante, por ello detectar y localizar el punto donde ha ocurrido la falta para así aislar la subsección en falta y poder reparar dicha falta rápidamente.

En los sistemas eléctricos de tracción de corriente alterna, el método más usado para medir la distancia desde la subestación de tracción a una falta debido a su estabilidad, fiabilidad y simplicidad es el método de impedancia [Xu y otros, 2013]. Sin embargo, en los sistemas de tracción 2×25 kV no es posible determinar de manera aceptable con dicho método la posición de las faltas a tierra, que son las que ocurren en la mayoría de los casos [Weller y Hindle, 1989]. Esto es debido a la presencia de autotransformadores que hacen no lineal la relación impedancia-distancia [Hewings y otros, 2008], con lo que se mide la misma impedancia en diferentes distancias. Para poder utilizar este método de localización de la distancia a la falta mediante la impedancia vista desde la subestación es necesario desconectar los autotransformadores y separar el circuito de catenaria del circuito del alimentador cuando se detecta una falta. De esta manera se transforma la sección en dos circuitos de un solo conductor y cable de retorno, como si fueran cada uno del sistema 1×25 kV, con lo que se puede así localizar la falta midiendo la impedancia en cada uno de dichos circuitos. Este método es usado en algunas líneas de 2×25 kV, pero es muy lento, ya que requiere varias operaciones de conexión y desconexión de los interruptores con tiempo de espera entre cada maniobra [Agarwal, 2002; Sezi y Menter, 1999]. Asimismo, se han

desarrollado otros métodos de localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV, siendo este trabajo el análisis de un nuevo método.

1.2 Objetivo

El estudio descrito en esta tesis busca desarrollar un nuevo método de localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV que permita obtener con precisión, en tiempo real y de manera económica, la posición de la línea ferroviaria donde ha ocurrido una falta a tierra, y si ha sido en el conductor positivo o en el negativo. El método que aquí se analiza se desarrolló en dos etapas. La primera consistió en identificar, cuando ocurre una falta a tierra, la subsección (intervalo de la línea, comprendido entre la subestación y el autotransformador adyacente o entre dos autotransformadores contiguos, dentro de la sección eléctrica) en que ha sucedido la falta, y si ha sido en el conductor positivo o negativo. Esta identificación se realiza tanto mediante el análisis de los valores de los módulos de la intensidad que circula en cada autotransformador, como mediante los valores de los ángulos que forman las fases de dicha intensidad en el devanado del autotransformador con la tensión entre la catenaria y tierra en el momento de la falta a tierra. El poder determinar de una manera rápida dicha subsección y conductor en falta es una gran ventaja, ya que permite aislar únicamente y de manera rápida el tramo afectado de ese conductor, sin interferir en el resto de la circulación de trenes.

Con el conocimiento de esta subsección y conductor, se desarrolló la segunda etapa, basada en la dependencia de la corriente en los autotransformadores de la posición de la falta. En ella, los valores de intensidad en los devanados de los autotransformadores obtenidos en el momento de la falta, se comparan con los valores de unas tablas intensidad en los autotransformadores-distancia de la subestación a la falta, previamente calculados y almacenados. Esta comparación se realiza teniendo en cuenta la información de la subsección y el conductor en los que ha ocurrido la falta a tierra, para comparar con la tabla de búsqueda de posición correspondiente y así obtener la posición de la falta.

1.3 Estructura de la tesis

Para describir el planteamiento expresado en el objetivo de esta tesis, el contenido de este trabajo se ha estructurado en seis capítulos.

En el capítulo 2, en primer lugar, se detallan los componentes, las características y la estructura de los diferentes sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, tanto de corriente alterna como de corriente continua, centrándose en el análisis detallado de las ventajas e inconvenientes del sistema 2×25 kV y de su modo de funcionamiento. Asimismo, se describen los diversos sistemas de protección de las líneas eléctricas ferroviarias de corriente alterna, así como la protección de los componentes de cada sistema. También se aborda la problemática de la localización de faltas a tierra en los sistemas ferroviarios de corriente alterna. Se detallan los componentes y método de las protecciones de distancia, que son las empleadas en la detección y localización de faltas en los sistemas de tracción ferroviaria de corriente alterna 1×25 kV. Además, se analiza la aplicación de las protecciones de distancia a la detección de faltas en sistemas 2×25 kV y su dificultad en utilizarlas para la localización de la posición de las faltas a tierra. Por último, se detalla la situación actual de la problemática de la localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV al describir diversos métodos que se emplean en la localización de dichas faltas.

El nuevo método de localización de faltas a tierra en sistemas de alimentación ferroviaria 2×25 kV, objetivo de esta tesis, se describe en el capítulo 3. En él se detallan los fundamentos teóricos en los que se basa el método, así como los pasos empleados en el método para determinar la posición de la falta una vez realizadas las medidas de tensiones y de intensidades en los autotransformadores cuando ocurre una falta a tierra: la identificación de la subsección y el conductor en falta y la comparación de los valores de intensidad en los autotransformadores con los de la tabla almacenada correspondiente.

El capítulo 4 está dedicado a describir las simulaciones de todos los aspectos de este nuevo método de localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV. En él se explica el procedimiento de implementación del método de localización de la falta, con el circuito eléctrico y sus parámetros empleados para simular faltas a tierra mediante cortocircuitos en una sección eléctrica ferroviaria del sistema 2×25 kV. Para resolver dicho circuito eléctrico se empleó el Método de Análisis de Circuitos Nodal Modificado, realizando las simulaciones mediante la programación en el lenguaje MATLAB.

Las pruebas experimentales llevadas a cabo en el laboratorio de Electrotecnia, que sirvieron para comparar los resultados con los obtenidos en las simulaciones realizadas, se detallan en el capítulo 5. En él se describen de manera pormenorizada los materiales empleados en la instalación que simulaba una sección eléctrica ferroviaria con sistema 2×25 kV, la forma de conexionarlos y los resultados obtenidos, que dan validez al método y a la simulación llevada a cabo en el ordenador.

Por último, en el capítulo 6 se realiza una breve descripción de las conclusiones obtenidas mediante los estudios realizados y de las principales aportaciones de esta tesis. Asimismo, se sugieren las líneas de investigación para futuros trabajos que permitan realizar una comprobación más profunda de los diferentes factores y situaciones que puedan influir en la validez de este método.

Capítulo 2

PROTECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN LOS SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA

2.1 Introducción

La electrificación ferroviaria tiene por objeto proporcionar energía eléctrica al vehículo que realiza la tracción eléctrica en las unidades ferroviarias de forma fiable, segura e ininterrumpida. Comprende un conjunto de instalaciones que incluye:

- Las subestaciones eléctricas ferroviarias, que proporcionan la energía eléctrica a las líneas de contacto ferroviarias mediante la transformación y adaptación de la energía recibida de las líneas de alta tensión.
- Las líneas de contacto ferroviarias, que distribuyen a lo largo de la parte electrificada del trazado ferroviario la energía que es entregada a los vehículos de tracción eléctrica mediante el contacto entre línea y vehículo.
- Los sistemas de generación eléctrica y distribución de alta tensión. Aunque en algunos casos estos sistemas son específicos ferroviarios, lo habitual es que las subestaciones ferroviarias obtengan la energía de los sistemas de distribución de las redes eléctricas públicas [Kiessling y otros, 2001] [Pilo, 2003].

Como en toda instalación eléctrica, la protección de la red de tracción ferroviaria es indispensable para evitar daños en las instalaciones y en las personas que están trabajando en las proximidades o son usuarias del ferrocarril, así como para asegurar un funcionamiento

correcto del sistema ferroviario. Con ello, los componentes del sistema de tracción quedan protegidos [Hill, 1994] y, aunque no se pueda eludir el que las faltas ocurran, se limitan en gran medida sus efectos dañinos en las instalaciones hasta conseguir incluso que sean nulos. Es, por tanto, el objetivo, como en cualquier sistema de protección, eliminar la falta o condición anormal del sistema tan rápidamente y de manera tan segura como sea posible, pero limitando los efectos sobre el sistema y minimizando el área que la falta deja sin operación [Knights, 2013]. Para ello, es fundamental localizar la posición de la línea ferroviaria donde ha ocurrido una falta, en orden a reducir todo lo posible el tiempo en que el equipo de mantenimiento pueda acceder a reparar dicha avería en el sistema eléctrico de alimentación ferroviaria.

2.2 Sistemas de electrificación ferroviaria

En este apartado se explica cómo está organizado el conjunto de instalaciones que constituyen los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, así como sus distintos modos de funcionamiento en caso de que ocurra una falta en dicho sistema eléctrico. Asimismo, se describen los diferentes tipos de alimentación empleados en la alimentación de la tracción ferroviaria, tanto en corriente continua como en corriente alterna. En particular, se detalla en profundidad el sistema de alimentación de corriente alterna con conductor negativo y autotransformadores (2×25 kV), ya que es el sistema más utilizado hoy en día y en el que es de aplicación el método de localización de faltas a tierra objetivo de esta tesis.

2.2.1 Estructura de un sistema de electrificación ferroviaria

En la figura 2.1 se muestra un esquema simplificado de los elementos que componen un sistema de electrificación ferroviaria, con el que los trenes obtienen la energía eléctrica necesaria para alimentar sus unidades de tracción, y les permite obtener su desplazamiento a lo largo de la línea ferroviaria. Se representa el tramo de tendido eléctrico entre dos subestaciones K y L separadas entre sí por puestos de acoplamiento (que interconectan o separan las líneas de contacto de dichas subestaciones), en una línea ferroviaria de doble vía, formando dos secciones independientes eléctricamente.

Figura 2.1: Esquema simplificado de los elementos de la electrificación ferroviaria

El detalle de la composición del tramo o sección en cada sentido alimentados por una subestación en una doble vía electrificada está reflejado en la figura 2.2. Como es lógico, su función es asegurar la energía eléctrica necesaria a todos los trenes que circulan por las dos secciones en cada momento.

En dicha figura 2.2 se muestran en los puestos de acoplamiento los aisladores de tramos de sección eléctrica AS y los interruptores de conexión IC (que puentean los aisladores) entre dichos tramos. Estos interruptores facilitan en caso necesario la interconexión entre secciones, para reducir caídas de tensión ó para alimentar secciones con avería en su subestación.

Cuando se quiere evitar que varios pantógrafos de una unidad de tracción puenteen, y por tanto conecten dos tramos de sección de línea o dos secciones, los aisladores se hacen de suficiente longitud para que no haya contactos entre los tramos adyacentes, siendo entonces denominado el tramo aislador como zona neutra [Kiessling y otros, 2001].

A diferencia de las líneas de transmisión eléctrica públicas, la separación entre el tendido eléctrico ferroviario y los elementos de alrededor es pequeña, lo que provoca que sea alta la probabilidad de faltas debidas a cortocircuitos con tierra del alimentador positivo (catenaria o línea de contacto) del tendido eléctrico, en el que hace contacto el pantógrafo del tren. En algunos casos se producen frecuencias de faltas de una por kilómetro de vía y año [Areva T&D, 2002].

Figura 2.2: Detalle del tramo alimentado por una subestación

Esta relativa alta probabilidad de ocurrencia de faltas, unido a la alta tensión mecánica a la que está sometida la línea de contacto o catenaria hace imprescindible despejar la falta muy rápidamente. Si no se hace así, los conductores eléctricos que forman la catenaria podrían romperse debido al excesivo calentamiento, con el consiguiente riesgo de daños graves ocasionados por la circulación de trenes, además de la interrupción del servicio por largo tiempo. Es por tanto imprescindible dotar a las instalaciones de electrificación de un eficaz y completo sistema de protecciones y localización de faltas. Este tema se tratará posteriormente de manera amplia.

Asimismo, es totalmente necesario disponer de un procedimiento con el conjunto de acciones a tomar cuando el funcionamiento del sistema de electrificación deje de estar en modo normal debido a un fallo en cualquier componente del sistema. Se dice que el sistema funciona en modo degradado cuando el funcionamiento del sistema no está en modo normal. Por tanto, se disponen todos los elementos de la línea para que pueda funcionar en modo degradado ante cualquier problema que pueda ocurrir. Es habitual que en las subestaciones se dupliquen los circuitos de entrada de forma que cada uno sea capaz de soportar toda la

carga necesaria para la tracción, proporcionando así un alto grado de seguridad de funcionamiento. De igual manera, en dichas subestaciones es habitual duplicar todos sus componentes de forma que puedan trabajar independientemente cada uno, y en caso de emergencia conseguir que con uno de ellos se pudiera abastecer toda la carga necesaria. Es sobre todo con los componentes importantes, como los transformadores y rectificadores (que actúan, bien duplicados, ó bien uno en servicio y otro de respaldo), con los que es más importante esta redundancia. De esta manera se impide que un fallo en ellos provoque que se quede fuera de servicio la subestación. En la figura 2.3 se ha representado el diagrama de un sistema de electrificación de doble vía en funcionamiento normal.

Figura 2.3: Diagrama de un sistema de electrificación en funcionamiento normal

En dicho diagrama se representan tres subestaciones de la línea, separando las secciones con puestos de acoplamiento con sus interruptores en posición de separación (zonas neutras). Se puede observar que cada subestación alimenta dos secciones con un elemento de alimentación (transformador ó transformador y rectificador) para cada una de dichas secciones. Una posible forma de conexión en caso de fallo del elemento E2 de la subestación L, es conectar las dos secciones de dicha subestación al elemento de alimentación E1 de la subestación. Otras disposiciones tienen un elemento de alimentación que se conecta a las dos secciones simultáneamente y el otro elemento es de respaldo. En este caso las dos secciones se conectarían al elemento de respaldo en caso de fallo del conectado habitualmente.

Si el fallo es de la subestación, las dos secciones de la subestación afectada se desconectan de ella y se conectan mediante los puestos de acoplamiento con interruptores en posición de contacto a las subestaciones adyacentes. Éstas tienen que diseñarse para soportar el incremento de línea conectada. En la subestación en fallo se aíslan mediante una zona neutra las dos secciones conectadas a dichas subestaciones adyacentes.

Otra situación frecuente es el caso de un fallo en la catenaria. En este caso se posicionan los interruptores en la subestación para que quede aislado dicho tramo de vía exclusivamente [Pilo, 2003]. Este tipo de fallo es el que tiene peores consecuencias, ya que hay que dejar sin servicio el tramo afectado en caso de vía única. En el caso de vía doble, a veces es posible mantener el servicio desviando la circulación por la otra vía, pero sólo volverá a una situación adecuada cuando se subsane el fallo de la catenaria.

La corriente que circula por la línea de contacto hacia la unidad de tracción necesita un camino de retorno hacia la subestación, de forma que esta corriente sea de la misma magnitud que la de ida. El camino de retorno habitualmente lo hace por los raíles de la vía que sirven como conductores conectados a la subestación. Éstos, al tener una gran longitud y reducida sección, presentan cierta resistencia a la corriente, lo que, junto con el hecho de que la resistencia entre los raíles y tierra es finita, hace que una parte de la corriente de retorno se vaya a tierra y vuelva a la subestación por ella y por objetos metálicos dispuestos a lo largo de la vía (tuberías, cables, etc.). Dependiendo del sistema de electrificación instalado, hay importantes diferencias en la forma de conectar a tierra los carriles de vía. En los sistemas con corriente continua, el acoplamiento entre raíles y tierra es de naturaleza completamente galvánica, mientras que en ferrocarriles de corriente alterna hay un acoplamiento inductivo entre todos los conductores, lo que afecta en la forma en que las corrientes de retorno se distribuyen entre los distintos conductores. Si los raíles no están rígidamente unidos a tierra se pueden producir diferencias de tensiones entre aquellos y ésta, llamadas tensiones de contacto, que pueden ser peligrosas para las personas que estén junto a las vías, tanto en condiciones normales de funcionamiento como en caso de faltas. Para evitarlo es necesario instalar dispositivos de protección que limiten estas tensiones de contacto [Kiessling y otros, 2001].

2.2.2 Clasificación de los sistemas de electrificación ferroviaria

A diferencia de las redes eléctricas, que emplean el habitual sistema trifásico de corriente alterna, en los sistemas ferroviarios pronto se observó que no iba a resultar práctica la utilización de dicho sistema trifásico en la conexión entre la línea y el vehículo de tracción eléctrica ferroviaria. Aunque se realizaron numerosos experimentos en los primeros tiempos de la electrificación ferroviaria, enseguida se determinó que no era viable, sobre todo en las intersecciones y cambios de vía. De todos los ferrocarriles electrificados con este sistema trifásico tan difícil de utilizar en el ámbito ferroviario, sólo quedan en funcionamiento una cantidad muy pequeña, como es el caso del ferrocarril Jungfraubahn y el Gornergrat-Bergbahn en Suiza, y algunos ferrocarriles de transporte entre terminales de aeropuertos [Steimel, 2012].

Los esfuerzos para electrificar los ferrocarriles se centraron por ello en la alimentación del tren mediante la conexión con la línea de contacto con una sola fase y retorno de la corriente por el carril de la vía, siendo este sistema, llamado monofásico, el que se emplea en la práctica. Se utiliza para ello tanto corriente continua como corriente alterna, empleándose en ambos tipos diferentes tensiones, y además, diferentes frecuencias y técnicas en corriente alterna. Asimismo, en corriente alterna se han desarrollado algunas variantes para que la corriente de retorno no vuelva por el carril, sino por conductores de retorno conectados a él directamente ó con algún tipo de transformador. Un esquema general de la disposición de los distintos sistemas de electrificación con respecto a las redes eléctricas públicas se muestra en la figura 2.4 [Kiessling y otros, 2001].

En los comienzos de la electrificación en corriente continua, los ferrocarriles se electrificaron a tensiones algo superiores a los 550-750 V que usaban los tranvías y metros, siendo 1500 V la tensión más usual. Al tener esta tensión el inconveniente de una límite de potencia poco elevado, la mayoría de los países de Europa que adoptaron este sistema de corriente continua, decidieron la electrificación en corriente continua a la tensión de 3 kV, opción que fue seguida después de la segunda guerra mundial por India, Sudáfrica y Brasil entre otros [Steimel, 2012].

Figura 2.4: Disposición de los sistemas eléctricos ferroviarios en relación con las redes eléctricas públicas

La principal razón de la utilización de este tipo de electrificación radicó en la posibilidad de utilizar el motor serie de corriente continua, que permitía arrancarse y que se controlase su velocidad, conmutándose de conexión serie a paralelo al aumentar la velocidad. Se conseguía de esta manera mucha simplicidad en el equipo de tracción montado en el vehículo. Incluso actualmente, la tracción en corriente continua tiene ciertas ventajas con el control de la tracción mediante la electrónica de potencia debido al poco peso y compacto tamaño de los equipos [Hill, 1994].

En cuanto a la electrificación en corriente alterna, se descartó, como ya se ha comentado, la electrificación con sistema trifásico. Por ello, los sistemas en corriente alterna que se desarrollaron emplearon una sola fase en la conexión con el vehículo de tracción, empleándose las ruedas de éste y el carril para el retorno de corriente. Esto supone extraer una gran cantidad de corriente de una sola fase del sistema de distribución de las redes eléctricas públicas, con el consiguiente desequilibrio del sistema.

Este problema, añadido a la difícil conmutación del motor de arrollamiento serie a la frecuencia de 50 Hz del sistema eléctrico, hizo que a principios del siglo XX en el centro y norte de Europa se adoptara un sistema de electrificación ferroviaria de corriente alterna propio a 15 kV, de frecuencia reducida a la tercera parte de la del sistema eléctrico [Kiessling y otros, 2001]. Se intentaba combinar de esta manera la economía de la transmisión de alta tensión de corriente alterna con las ventajas de usar motores de conmutación de corriente alterna [Hill, 1994]. En Estados Unidos, algunos ferrocarriles adoptaron una frecuencia reducida de 25 Hz.

A mediados del siglo XX, los avances en los rectificadores de vapor de mercurio posibilitaron el uso de corriente alterna por los vehículos de tracción con motores de corriente continua. De esta forma se pudo aplicar directamente a dichos vehículos un sistema de corriente alterna con la frecuencia de 50 Hz y tensión elevada de 25 kV, obtenido directamente de la red de electrificación pública. Este sistema se empezó a instalar en el norte de Francia, y se ha extendido con gran rapidez por todo el mundo. Debido a los grandes avances en la electrónica de potencia, es en la actualidad el sistema más utilizado. En algunos países la frecuencia no es de 50 sino de 60 Hz, que es la de trabajo de las redes eléctricas públicas de dichos países [Steimel, 2012].

2.2.3 Sistemas de electrificación ferroviaria en corriente continua

Para conseguir corriente continua en las líneas de contacto, lo habitual es rectificar en las subestaciones la corriente alterna, previamente transformada a una tensión adecuada, a partir de la corriente alterna de la red pública de distribución.

La estructura de este sistema de electrificación ferroviaria se observa en la figura 2.5.

En ella se observa que la tensión en corriente continua obtenida en el conductor (catenaria) en contacto con el pantógrafo de las unidades de tracción del tren, se obtiene de los rectificadores ubicados en las subestaciones eléctricas, estando la otra conexión del rectificador unida al carril. En los ferrocarriles urbanos y tranvías, con tensiones entre 600 y 750 V, la potencia de dichas subestaciones suele estar entre 1 y 2 MW, con separaciones entre ellas de 1,5 a 6 km. En los ferrocarriles interurbanos y de larga distancia, con tensiones

de 1500 ó 3000 V, aumenta tanto la potencia de cada subestación, hasta 10 MW, como la separación de ellas, hasta 20 km [Kiessling y otros, 2001].

Figura 2.5: Estructura del sistema de electrificación en corriente continua

Normalmente, el cable de contacto con el tren es aéreo, pero cuando las tensiones son inferiores a 1 kV, en algunos casos la distribución de la potencia a los trenes se realiza mediante un tercer carril ó conductor lateral apoyado en aislantes, en el que hace contacto un patín deslizante que llevan los vehículos del tren. Este sistema tiene la ventaja de tener menor coste de construcción que el tendido con postes eléctricos. Además, estos últimos tienen que soportar cables de contacto de cobre gruesos debido a la gran intensidad de corriente que tienen que transportar al ser la tensión poco elevada.

Las subestaciones se conectan a la red eléctrica pública a nivel normalmente de tensión de distribución, disponiéndose a la entrada de la subestación de los correspondientes equipos de protección y aislamiento para la corriente alterna trifásica entrante, antes de que la corriente llegue a los transformadores y a los rectificadores. Los transformadores convierten la tensión trifásica de la línea pública a la tensión de la línea de contacto ferroviaria,

convirtiéndose en corriente continua en los rectificadores. Anteriormente se usaban circuitos de seis pulsos en los rectificadores. En la actualidad se usan rectificadores de doce pulsos, y en algunos casos de veinticuatro pulsos [Hill, 1994].

En los sistemas con electrificación de corriente continua los raíles que llevan la corriente de retorno deben estar aislados de tierra [Nikouee y Ledbetter, 2006]. La razón de este principio es que la parte de las corrientes de retorno que circulan por tierra hacia la subestación, denominadas corrientes vagabundas o parásitas, provocan una corrosión importante en los componentes metálicos de las estructuras en contacto con tierra. Esto es debido a que en los metales en contacto con un electrolito como es el suelo húmedo, ocurren reacciones químicas cuando en dicha conexión circulan corrientes siempre en la misma dirección. Elementos como tuberías, cimientos de edificios con partes metálicas, postes, estructuras de túneles, puentes y viaductos pueden verse afectados. Dificultar la producción de estas corriente vagabundas impidiendo la conducción de raíl a tierra, y disminuir la caída de tensión longitudinal en el circuito de retorno, reducirá en gran medida el riesgo de corrosión. Para ello se instala el circuito de retorno por el carril de vía aislado de la estructura de tierra de edificios, viaductos, túneles y postes de electrificación de la línea. Hay veces que se añade un conductor de retorno aislado de tierra al circuito de retorno de los raíles, y así se disminuye la generación de corrientes vagabundas.

Como ya se ha comentado anteriormente, es muy importante en los sistemas ferroviarios disponer de alternativas en caso de fallo de alguno de los componentes para que se siga dando servicio de manera normal, ó en el peor de los casos de manera restringida. Esto se gestiona de una manera más rápida y eficaz cuando las subestaciones se controlan mediante un telemando desde un puesto de control, lo que ocurre habitualmente en la actualidad [Chang y otros, 2000].

A la entrada de la subestación se instalan los interruptores automáticos y seccionadores de corriente alterna, que una vez transformada y rectificada se convierte en corriente continua a la tensión que se necesita en la línea de contacto. En caso de fallo de un transformador ó de un rectificador, es posible aislarlo mediante los interruptores automáticos y seccionadores de entrada de alterna y de salida de continua, de forma que el transformador y rectificador gemelo de la subestación proporcione toda la potencia de corriente continua necesaria en las dos secciones alimentadas por la subestación. Si la instalación es del tipo en que en funcionamiento normal, un conjunto transformador-rectificador proporciona toda la

corriente que entrega la subestación, y el otro conjunto es de respaldo, en caso de avería del primero, mediante los interruptores y seccionadores de entrada y salida se desconecta el primer conjunto y se conecta el segundo.

En caso de que la avería sea en barras ó afecte a los dos conjuntos, se desconectan todos los interruptores y seccionadores de la subestación, conectándose los de los puestos de acoplamiento de cada sección para que sean alimentadas desde las subestaciones adyacentes.

Si la avería se produce en la catenaria de una de las vías, se desconecta mediante los interruptores automáticos y seccionadores de vía. En esta situación, cuando es una línea de doble vía, es posible mantener el servicio de manera restringida desviando la circulación por la otra vía en el tramo afectado, si la instalación tiene la disposición necesaria para ello. No ocurre así en caso de vía única, en el que es necesaria la reparación de la avería eléctrica para volver a dar servicio.

2.2.4 Sistemas de electrificación ferroviaria en corriente alterna

Dentro de los sistemas alimentados mediante corriente alterna se pueden hacer tres grupos:

- Sistemas de electrificación en corriente alterna con frecuencia reducida
- Sistemas de electrificación en corriente alterna con frecuencia de la red pública
- Sistemas de electrificación en corriente alterna con frecuencia de la red pública, conductor negativo y autotransformadores

2.2.4.1 Sistemas de electrificación con frecuencia reducida

Como se ha explicado anteriormente, aunque algunos ferrocarriles adoptaron una frecuencia reducida de 25 Hz, la frecuencia reducida más extendida fué la de $16 \frac{2}{3}$ Hz a una tensión de 15 kV. Tal como se puede observar en la figura 2.4, los sistemas de electrificación de corriente alterna de 15 kV, $16 \frac{2}{3}$ Hz se pueden obtener, ó bien de manera descentralizada, método empleado principalmente en los países nórdicos europeos, en el que se utilizan convertidores de frecuencia fija a $16 \frac{2}{3}$ Hz para alimentar sus líneas de contacto ferroviario,

ó bien de manera centralizada, como ocurre en Centroeuropa. Un esquema de la estructura básica centralizada se muestra en la figura 2.6 [Kiessling y otros, 2001].

Figura 2.6: Esquema de una estructura básica centralizada en el sistema de electrificación de corriente alterna 16 2/3 Hz 15 kV

En él se observa como las plantas generadoras propias de la red ferroviaria (PG) están interconectadas mediante una red de transmisión eléctrica monofásica de 110 kV a la frecuencia de 16 2/3 Hz, junto con las estaciones convertidoras centralizadas (EC). A dicha red se conectan las subestaciones de tracción (SE), que alimentan las distintas líneas de contacto de la electrificación ferroviaria.

En este sistema, la generación propia en la red ferroviaria tiene un gran inconveniente. Debido a la menor frecuencia de salida y a ser ésta monofásica el rendimiento obtenido en los generadores propios de la red ferroviaria es del orden de cinco veces menor que el de los generadores de las redes eléctricas públicas. Por tanto, estos generadores específicos necesitan ser varias veces más grandes que los de las redes públicas para poder obtener potencias similares [Kiessling y otros, 2001].

Los ferrocarriles alemanes (DB) emplean una red propia cuyas secciones están acopladas longitudinal y transversalmente, a una tensión de 110 kV. Su longitud es superior a los 7000

km y tiene cerca de 200 subestaciones. Se utiliza una frecuencia nominal de 16,7 Hz, y se permiten unas variaciones de frecuencia mayores que las de la Red eléctrica pública. Un esquema de esta red se puede observar en la figura 2.7 [Steimel, 2012].

2.2.4.2 Sistemas de electrificación con frecuencia de red pública

Este sistema se caracteriza porque las subestaciones que alimentan las líneas ferroviarias pueden ser directamente conectadas a las redes eléctricas públicas, cuya frecuencia es de 50 Hz (lógicamente en los países cuyas redes públicas funcionan a la frecuencia de 60 Hz, las redes ferroviarias conectadas a ellas tienen también 60 Hz de frecuencia de trabajo).

Figura 2.7: Esquema del sistema de electrificación de los ferrocarriles alemanes

2.2.4.2.1 Electrificación a 25 kV 50 Hz

Un esquema general de este sistema, también llamado 1×25 kV, se puede visualizar en la figura 2.8 en la que se pueden observar los puntos de separación de fases (zonas neutras)

para evitar cortocircuitos por la conexión a dos fases diferentes en cada tramo [Steimel, 2012] [Han y otros 2012].

En este sistema no se necesitan generadores especiales ni convertidores de frecuencia ni rectificadores en las instalaciones. Tampoco se necesita una red eléctrica propia dedicada a este sistema, con lo que supone un gran ahorro de costes. Son éstas las grandes ventajas de este tipo de electrificación. Además, al trabajar a una mayor tensión, tanto las secciones de los conductores como las necesidades de espacio para los transformadores se reducen notablemente. A cambio, son mayores las necesidades de aislamiento, por lo que la distancia de la parte superior de los vehículos a la línea de contacto aérea aumenta ligeramente, disminuyendo el espacio disponible en aquéllos. Asimismo, debido a que la carga que representa la línea eléctrica ferroviaria es de tipo no lineal, muy cambiante en el tiempo y acoplada a la red pública, produce en ésta otros problemas, como son, la aparición de armónicos y un factor de potencia bajo [Bhalja y Maheshwari, 2007].

Figura 2.8: Esquema general del sistema de electrificación de corriente alterna a 50 Hz 25 kV

Sin embargo, el gran problema de este sistema de electrificación es el desequilibrio provocado en la red trifásica de alta tensión a la que se conecta la subestación eléctrica ferroviaria. En orden a paliar este problema, la alimentación a las subestaciones se toman de la red pública de las líneas de muy alta tensión, que tienen tensiones comprendidas entre 132

y 400 kV. El nivel de carga de tracción y la disponibilidad de la red pública determinará el punto de conexión.

Una forma de evitar el desequilibrio de la red es mediante compensadores de estado sólido, que consiguen equilibrar la red, incluso con cargas variables. Esta solución tiene el inconveniente de un costo económico muy alto, por lo que sólo se emplean en condiciones muy especiales [Steimel, 2012].

Pero lo más habitual es intentar minimizar el problema, conectando las subestaciones de forma que ocasione un desequilibrio muy pequeño que sea asumible en la práctica. Existen para ello varios métodos:

Uno de ellos es conectar las subestaciones sucesivamente a las diferentes fases R, S, T de la red, tal como se puede observar en el esquema general de la figura 2.8; ó como habitualmente se hace, conectándolas cíclicamente con separación de 120° entre sucesivos tramos de línea, tal como se describe en la figura 2.9. En ella las subestaciones SE 1, SE 2 y SE 3 se conectan a las diferentes fases, y así sucesivamente a lo largo de la línea.

Figura 2.9: Conexión cíclica de subestaciones a la red eléctrica trifásica, obteniendo tramos de línea con ángulos de tensión con separación de 120°

Como se puede observar, con esta disposición es necesario implementar separaciones de fase entre éstas. Entre dos fases adyacentes se produce una elevada diferencia de tensión de 43,3 kV. Una forma de reducir esta diferencia de tensión es conectando las fases con separación

de 60° solamente, lo que provoca que la diferencia de tensión entre ellas se disminuya hasta 25 kV.

Otra forma de compensación es conectar la red trifásica a la red ferroviaria en las subestaciones mediante transformadores especiales [Kiessling y otros, 2001] [Shahnia y Esmailzadeh, 2005] [Wu y otros, 2011].

Uno de ellos es el que utiliza la conexión que se puede observar en la figura 2.10. Esta conexión consigue producir un desequilibrio menor en la red [Pilo, 2003].

Figura 2.10: Conexión de la subestación de tracción a la red eléctrica pública mediante transformadores especiales

Otro método existente es el que utiliza la conexión mediante transformadores Scott. Su inconveniente es que el transformador Scott es un transformador más complejo, con conexiones a tomas intermedias, y por tanto más caro de fabricar. Por el contrario, tiene la ventaja de que reduce casi totalmente los desequilibrios en la red eléctrica [Pilo, 2003].

2.2.4.2.2 Circuito de retorno de corriente y puesta a tierra

A diferencia de la electrificación en corriente continua en la que el circuito de retorno está aislado de tierra como ya se ha comentado, en los sistemas de electrificación de corriente alterna el circuito de retorno, y por tanto el carril está conectado a tierra. El peligro de corrosión de las estructuras metálicas subterráneas que tenía lugar en la electrificación en

corriente continua por fluir las corrientes vagabundas de retorno de manera continuada en la misma dirección, no existe en los sistemas de corriente alterna.

En la figura 2.11 está representada la estructura de las conexiones a tierra de las diferentes infraestructuras y del circuito de retorno por medio del carril de la vía en la electrificación de corriente alterna [Kiessling y otros, 2001].

Figura 2.11: Conexiones a tierra en electrificaciones de corriente alterna

Al estar unido a tierra el circuito de retorno por la vía, se evita que se creen diferencias de tensión entre la vía y tierra como ocurría en la electrificación con corriente continua, con lo que se anulan las tensiones de contacto, tan peligrosas para las personas que puedan estar en contacto con los rieles de vía. Sin embargo, dicha conexión facilita la creación de corrientes vagabundas que retornan por tierra, como se puede observar en la figura 2.12.

En sistemas de corriente alterna con retorno por el carril, estas corrientes de retorno por tierra pueden alcanzar un porcentaje del 40% del total de la corriente de tracción, y ocasionan una indeseable interferencia inductiva y de campo magnético en los sistemas distribuidos a lo largo de la vía, pudiendo causar fallo de funcionamiento en el equipo electrónico y de telecomunicaciones [Kiessling y otros, 2001].

Una forma de disminuir en gran medida dicho porcentaje de corrientes de retorno por tierra es la instalación de conductores de retorno en paralelo en las proximidades de la línea de contacto, ya que se consigue de esta forma un buen acoplamiento inductivo con aquélla. Los

conductores de retorno se unen al circuito de retorno del carril y a tierra cada cierto intervalo mediante conexiones que se realizan en los postes que sustentan la línea de contacto.

Figura 2.12: Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna

Otra disposición para que sólo una muy pequeña parte de la corriente de retorno vuelva por la tierra y el carril es la instalación de transformadores auxiliares en el conductor de retorno de la forma que refleja la figura 2.13

En este sistema se intercala en la línea de contacto el primario de estos transformadores auxiliares de retorno a intervalos de 3 a 5 km, que tienen una relación 1:1 de transformación. El arrollamiento secundario se conecta al conductor de retorno, extrayendo la corriente que podía circular por los raíles y tierra y enviándola de vuelta a la subestación por el conductor de retorno.

Figura 2.13: Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna con transformadores auxiliares de retorno

Esta disposición tiene el inconveniente de que aumenta la impedancia efectiva de la línea debido a dichos transformadores auxiliares de contacto, ocasionando mayores caídas de tensión y mayores pérdidas de potencia. También produce arcos eléctricos en los aisladores entre tramos de la línea de contacto, incrementando el desgaste del conductor y del pantógrafo y las interferencias de radiofrecuencia. Asimismo, en la sección en que se encuentra el tren sigue habiendo corrientes de retorno por el carril y la vía. Pero el inconveniente más notable es el alto coste de los transformadores, ya que por cada sección hay que instalar un conjunto de ellos [Kiessling y otros, 2001].

Otro sistema, también llamado 2×25 kV, que consigue reducir en gran medida las corrientes de retorno por raíl y tierra es el basado en la instalación de autotransformadores y alimentador negativo, reflejado en la figura 2.14 [Kiessling y otros, 2001].

Dicha reducción, que implica una disminución importante de corrientes vagabundas es una de las múltiples ventajas que tiene este sistema de electrificación en corriente alterna, sistema que se estudiará en profundidad más adelante. Esta reducción en la circulación de corriente por carril y tierra viene reforzada porque en este sistema prácticamente sólo hay circulación de corriente de retorno por la vía en el tramo entre subestación y autotransformador ó en el tramo entre autotransformadores ocupados por un tren [Kiessling y otros, 2001].

Figura 2.14: Retorno de corriente en sistemas de electrificación de corriente alterna con autotransformadores y alimentador negativo

2.2.4.2.3 Estructura del sistema en caso de fallos

Al igual que en otros sistemas de electrificación, la estructura de la electrificación en corriente alterna debe estar preparada para soportar fallos de los componentes y continuar en esos casos dando servicio ferroviario. De esta forma, en el caso de fallo de un transformador, el otro debe soportar el tráfico en las dos secciones de la subestación. Asimismo, si la avería afecta a toda la subestación, ésta se desconectará así como las catenarias de la subestación, y las dos secciones se alimentarán desde las subestaciones adyacentes al conectar los puestos de acoplamiento [Hill, 1994].

2.2.4.3 Sistemas de electrificación ferroviaria 2×25 kV

Como ya se ha explicado al describir las corrientes de retorno (y se representó en la figura 2.14), en los sistemas electrificados en corriente alterna, la adición en cada sección de varios autotransformadores y un conductor (conductor alimentador negativo ó “feeder”) con tensión alterna opuesta en fase a la de catenaria presenta grandes ventajas.

Es necesario proporcionar una elevada potencia a las unidades de tren para conseguir velocidades muy altas (del orden de 300 km/h) y para no verse afectadas dichas unidades en mantener la velocidad cuando circulan en las pendientes incrementadas que se utilizan en las nuevas líneas. Normalmente este tipo de unidades de tren demandan una potencia de entre 10 y 16 MW distribuida entre dos ó más vehículos de tracción acoplados a varios vehículos remolques. Potencias tan altas necesitan grandes intensidades a transportar desde la subestación a la unidad de tren, ocasionando fuertes caídas de tensión en la estructura clásica de corriente alterna con un solo conductor alimentador (1×25 kV), sobre todo cuando soporta un tráfico elevado. De esta forma, en dicha estructura clásica de corriente alterna sería necesario reducir de manera importante la separación entre subestaciones [Areva T&D 2002]. Esto, además de incrementar en gran medida el coste de instalación y mantenimiento, obligaría a instalar las subestaciones en lugares de difícil acceso ó sin posibilidades adecuadas de conexión.

Para resolver estos inconvenientes, en la actualidad, la estructura de electrificación en corriente alterna con alimentador negativo y autotransformadores es la disposición más empleada, sobre todo en líneas de alta velocidad ó con tráfico de mercancías muy intenso. En este sistema, el arrollamiento del autotransformador está conectado entre la catenaria y el alimentador negativo, con la toma intermedia conectada al carril de vía y a tierra. De esta manera se consigue que la tensión que transporta la línea sea superior a la de alimentación del tren, que circula conectado entre la línea de contacto y el carril, con este último unido eléctricamente al punto intermedio del transformador de la subestación y de los autotransformadores. También se consigue así que las intensidades transportadas por los conductores sean inferiores a la extraída por el pantógrafo del tren [Pilo y otros, 2003].

Este tipo de electrificación ya se empezó a usar en el primer tercio del siglo XX en el ferrocarril de Pennsylvania en Estados Unidos [Kneschke y otros, 1995] [Natarajan y otros, 1997]. Sin embargo, no fue hasta la década de 1970 en las líneas de alta velocidad japonesas cuando se hicieron nuevas instalaciones, con una tensión entre la catenaria y el alimentador negativo de 60 kV. En 1981 se utilizó en la línea TGV París-Lyon con una relación de autotransformadores de 1:1 y tensión entre catenaria y alimentador negativo de 50 kV. Por tanto, la tensión entre catenaria y vía es de 25 kV, pudiéndose con ello utilizar material de tracción que ya utilizaba esta tensión [Hill, 1994]. El sistema con esta estructura y con tensión de 25 kV se denomina habitualmente sistema de electrificación en corriente alterna 2×25 kV. En España este sistema se empezó a utilizar en el año 2003 en la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa.

2.2.4.3.1 Esquema de conexión de la línea a la subestación

En la figura 2.15 se esquematiza la estructura del tramo completo de vía conectado a una subestación de este sistema de electrificación en la que se observan las dos secciones alimentadas por la subestación. En este ejemplo, cada sección tiene instalados dos autotransformadores intermedios (ATS1 y ATS2), y un autotransformador final (SATS) de la sección. Este está separado eléctricamente del autotransformador final de la sección contigua, aunque suelen compartir dichos transformadores finales el mismo edificio de instalaciones.

Figura 2.15: Esquema del tramo completo de vía alimentado por una subestación en un sistema electrificado con autotransformadores y conductor de alimentación negativo

Los autotransformadores suelen instalarse entre sí y desde la subestación a distancias entre 8 y 12 km. De esta manera, se pueden separar las subestaciones distancias del orden de 50 a 60 km. sin que se produzcan caídas de tensión notorias entre subestación y tren. Como se puede observar, la catenaria y el alimentador negativo, conectados a los extremos de los autotransformadores, se conectan a las terminaciones del devanado secundario del transformador de la subestación, conectándose su toma intermedia así como la de los autotransformadores a tierra y a la vía.

Se consigue de esta forma que la tensión entre el conductor negativo y tierra sea del mismo valor pero con desfase de 180° que la tensión entre el conductor positivo y tierra. Habitualmente estas tensiones son de -25 kV y +25 kV respectivamente. Es por lo que a este sistema se le suele denominar de manera abreviada como sistema de corriente alterna 2×25 kV.

La figura 2.16 muestra la disposición de estos conductores en una línea aérea de contacto con conductor alimentador negativo.

Esta línea consta de un alimentador positivo (compuesto del cable de sustentación, que forma una curva en forma de catenaria, y el hilo de contacto), de un conductor de tierra (enterrado y aéreo) y de un alimentador negativo (o “feeder”) [Areva T&D 2002].

Figura 2.16: Esquema de la disposición de los conductores en una línea aérea de contacto con autotransformadores y conductor alimentador negativo

El conductor positivo, habitualmente colocado sobre la vía a una distancia de entre 4,8 y 7 m., está compuesto de un hilo de contacto suspendido mediante péndolas de un cable de catenaria situado en el extremo atirantado de los mástiles o postes. El conductor de tierra consta del carril unido a un cable enterrado y a otro cable aéreo situado junto al mástil en la parte superior de éste, estando a intervalos conectados entre sí y a tierra.

El alimentador negativo habitualmente se sitúa en la parte superior trasera y, lógicamente aislado del mástil, con lo que se consigue una cercanía al conductor positivo que reduce el tamaño del bucle alimentador positivo-alimentador negativo [Hill, 1994].

2.2.4.3.2 Distribución de corriente en los conductores

La distribución de corrientes teórica en este sistema se puede visualizar en la figura 2.17 en el caso en que un tren está circulando por el punto medio entre el autotransformador intermedio y el autotransformador final de la sección.

Como se puede apreciar, la mitad de la corriente que alimenta el tren retorna por los carriles de ese tramo hacia la izquierda y la otra mitad hacia la derecha. Cada una de estas corrientes entra en el autotransformador respectivo por su toma central, por lo que dentro de éste se reparte a partes iguales debido a la relación de espiras unidad en los autotransformadores. Finalmente, el transformador de la Subestación de Tracción entrega la mitad de la intensidad consumida por el tren, ya que la tensión es doble que la del tren [Chamorro, 2005]. De esta manera solamente tiene que circular por la línea la mitad de la corriente absorbida por el tren [Lee y otros, 2004] [Zhao y Wu, 2011]. Si los autotransformadores fueran ideales, no circularía corriente ni en los raíles ni en los autotransformadores de las subsecciones no ocupadas, circulando sólo entre el tren y los autotransformadores adyacentes, y al tener éstos su punto medio conectado a tierra, la corriente vagabunda que circula por tierra sería cero más allá de dichos autotransformadores.

Pero en la realidad, la impedancia de cortocircuito reduce la tensión de salida del autotransformador, ocasionando que se extraiga corriente de carga de los autotransformadores lejanos en una proporción cercana al 10%, causando las consiguientes corrientes por raíles y tierra. Estas corrientes de tierra vagabundas producen tensiones que provocan interferencias en los cables adyacentes en la vía, aunque son pequeñas sobre todo en comparación con las que producen los sistemas clásicos de electrificación en corriente alterna [Hill, 1994].

Figura 2.17: Distribución de corrientes en los conductores en una línea aérea de contacto con autotransformadores y conductor alimentador negativo

2.2.4.3.3 Ventajas y desventajas de un sistema 2×25 kV

De acuerdo a lo descrito en los párrafos anteriores, se puede resumir que este sistema 2×25 kV presenta múltiples ventajas, tales como necesitar menor número de subestaciones al poderlas distanciar más que en los sistemas clásicos con la consiguiente reducción de coste, tener menores pérdidas por utilizar una tensión más elevada y circular intensidades menores, proporcionar potencias más altas, tener menos corrientes vagabundas por tierra al circular menor intensidad de retorno por el carril, y producir menores interferencias en los cables adyacentes a la vía con el consiguiente menor impacto en los equipos de señalización y telecomunicaciones, entre otras [Hill y Cevik, 1993].

Pero también existen desventajas en este sistema con respecto al sistema clásico de electrificación en corriente alterna (1×25 kV), como son, mayores corrientes de cortocircuito, mayores necesidades de aislamiento, sistema de protecciones más complejo, y mayor coste de los autotransformadores y del cable alimentador negativo [Senol y otros, 1998]. Sin embargo, son compensadas ampliamente con las ventajas previamente descritas [Courtois, 1993-1] [White, 2010].

2.2.4.3.4 Estructura del sistema en caso de fallos

Al igual que se mencionó anteriormente cuando se describieron los sistemas de electrificación de corriente continua y corriente alterna clásico, la estructura de la electrificación en corriente alterna 2×25 kV debe estar preparada para soportar fallos de los componentes y continuar dando servicio ferroviario. En la figura 2.18 se puede observar el esquema de la estructura en corriente alterna con autotransformadores y alimentador negativo (2×25 kV) en funcionamiento normal. La apreciación más notoria de dicha figura es que esta estructura es complicada debido a que el número de conductores se incrementa a causa de los autotransformadores y a los alimentadores negativos de vía conectados a las subestaciones y autotransformadores.

Aquí se ha representado un tramo de vía entre dos subestaciones, en las que las secciones de cada una tienen dos autotransformadores, uno que es intermedio y el otro que se sitúa al final de la sección, separándose cada una de éstas por zonas neutras indicadas en esta figura por rectángulos de color negro. Los dos autotransformadores finales de las dos subestaciones, al estar situados en la misma ubicación, se pueden instalar en el mismo edificio formando un puesto de acoplamiento entre secciones, ya que están provistos de interruptores automáticos y seccionadores para poder conectar dichas secciones en caso de necesidad. Los interruptores automáticos con un círculo rodeando una X son los que están normalmente abiertos en caso de funcionamiento normal, mientras que los interruptores representados únicamente con una X son los que están normalmente cerrados en dicho caso. Asimismo, en caso de fallo en una catenaria se la aislaría y se desviaría el tráfico por la otra vía.

Al igual que en los otros sistemas de electrificación, cuando en una subestación uno de los transformadores se avería, el otro transformador es capaz de alimentar las dos secciones de la subestación cerrando el interruptor que entre las dos secciones está normalmente abierto, aunque aquí son dos interruptores los que se cierran, uno para el conductor positivo y otro para el conductor negativo. Asimismo se abrirían los dos interruptores de salida del transformador [Capasso y otros, 2010].

Figura 2.18: Esquema de la estructura en corriente alterna en funcionamiento normal

De manera similar a los otros sistemas, si el fallo afecta a los dos transformadores o a otros elementos que inutilizan la subestación, los interruptores de la subestación se abrirían y la desconectarían. Al mismo tiempo, se cerrarían los interruptores del puesto de acoplamiento que hacen de separación con la sección de la subestación contigua y que están normalmente abiertos en caso de funcionamiento normal. Se consigue así la alimentación de la sección de la subestación averiada. También se haría el mismo procedimiento con la subestación contigua a la otra sección de la subestación averiada. Y en todos los casos las operaciones se harían tanto con los interruptores del conductor positivo como con los del negativo.

Un elemento diferente en este sistema de electrificación es el fallo en un autotransformador. En este caso, se desconectaría tanto el conductor positivo como el negativo en su conexión al autotransformador sin que el servicio ferroviario se viera afectado más que con una pérdida de rendimiento en la sección conectada al autotransformador.

Otra particularidad que se puede apreciar en este sistema es el fallo en un conductor negativo. En este caso se aislaría únicamente este conductor, dejando disponible todos los tramos del

conductor positivo. Afectaría al rendimiento del recorrido con el negativo desconectado, pero sin interrumpir el servicio en ningún momento.

2.3 Protecciones eléctricas en los sistemas ferroviarios de corriente alterna

2.3.1 Introducción a las protecciones eléctricas

La protección es vital para garantizar una operación segura y razonablemente económica en cualquier instalación eléctrica. Todos los sistemas eléctricos están amenazados, tanto por fallos del equipamiento que conforma el sistema, como por amenazas externas ocasionadas por sucesos accidentales o interferencias con los componentes del sistema. Se define la protección de redes de energía como el conjunto de dispositivos destinados a detectar faltas u otras situaciones anormales en una red de energía, para permitir la eliminación de las faltas, poner fin a las situaciones anormales y emitir órdenes o señales [UNE 21302-601/1M, 2000].

Los beneficios de la protección del sistema eléctrico recaen en una doble vertiente:

- Limitan el daño al equipamiento causado por faltas, sobrecargas y otros sucesos que frecuentemente ocurren.
- Proporcionan protección a las personas y a los equipos e instalaciones adyacentes.

Además, disminuyen las pérdidas económicas que ocasionaría la interrupción prolongada del servicio con la consiguiente pérdida de imagen, y minimizan el daño en las instalaciones adyacentes [Knights, 2013].

Para ello las protecciones deben cumplir una serie de características:

- Fiabilidad: es la probabilidad de funcionamiento correcto de un elemento. En protecciones este término engloba dos conceptos:

Obediencia (o confiabilidad): un dispositivo es obediente si actúa cuando debe actuar.

Seguridad: un dispositivo es seguro si no actúa cuando no debe actuar.

Por tanto, una protección puede fallar por pérdida de obediencia (no actuar cuando debe hacerlo) o de seguridad (actuar cuando no debe hacerlo). Cuando se hace el ajuste de una protección es necesario tener en cuenta que el reforzamiento de un aspecto va en detrimento del otro.

- Selectividad: es la capacidad de una protección de aislar únicamente el elemento con fallo, manteniendo en servicio las partes del sistema no afectadas por dicho fallo.
- Rapidez de operación: normalmente se desea que la protección actúe tan rápido como sea posible. Sin embargo, hay veces que necesita cierto tiempo para tener un elevado grado de certeza en su actuación. Por tanto la relación entre la rapidez y la fiabilidad de una protección es inversa. Además, para conseguir la coordinación entre las protecciones, hay ocasiones en que algunas de ellas necesitan actuar posteriormente a las otras.
- Sensibilidad: es la capacidad de detección de perturbaciones que producen variaciones pequeñas en los parámetros de la red.
- Zona de protección: para limitar la desconexión a una parte de la red cuando ocurre un fallo, la protección se organiza en zonas. Una zona de protección es la parte del sistema de energía de cuya protección es responsable un elemento de protección instalado en dicho sistema. Todos los elementos de la red deben estar al menos dentro de una zona de protección, y para que ninguna parte del sistema quede desprotegida, las zonas deben solaparse.
- Protección de respaldo: Para eliminar de manera prácticamente total la posibilidad de fallo en la eliminación de una falta en el sistema, cada sección de la red, además de tener un dispositivo de protección propio en su zona (llamada protección primaria), es conveniente que tenga otro dispositivo que actúe en caso de funcionamiento incorrecto de la protección primaria, denominado protección de respaldo o apoyo. A la protección de respaldo normalmente se la dispone para que actúe en un tiempo superior al de la primaria [Suárez, 2011].

2.3.2 Elementos de las protecciones eléctricas

En un principio los equipos de protección eran de tipo directo, en los que el mismo elemento hacía las funciones de medida, análisis e interrupción de corriente. Además, la magnitud que había que controlar se aplicaba a la protección sin ningún tipo de transformación. Inicialmente esta labor la realizaron los fusibles y posteriormente los relés directos, que al igual que aquéllos, protegían contra cortocircuitos.

Posteriormente aparecieron los equipos de protección indirectos, en los que las magnitudes a controlar se transforman en valores normalizados antes de aplicarse al control de la protección. Estos sistemas, que son más costosos que los directos [Montané, 1988], tienen la estructura descrita en la figura 2.19.

Figura 2.19: Estructura de un equipo de protección indirecto

En ellos un dispositivo transductor lee la magnitud a controlar y la convierte a un valor adecuado para que pueda ser enviado, y analizado por un relé de protección. En caso de que el relé decida que es necesario actuar, enviará una señal de disparo a un interruptor, que se accionará y de esa manera efectuará la protección de la línea.

Debido a que prácticamente todos los relés que se utilizan para protección utilizan las magnitudes de tensión y e intensidad para analizar si es necesario tomar alguna acción, los transductores empleados deben obtener de la línea y enviar al relé unas señales que sean

reflejo de estas magnitudes. A causa de que las tensiones e intensidades que pasan por la línea son muy elevadas, ya desde el principio se observó la necesidad de separar galvánicamente los circuitos de medida y las protecciones, además de reducir las magnitudes a medir a valores mucho más pequeños. Para ello se emplearon transformadores de medida de intensidad y de tensión [Montané, 1988]. Además, en los últimos años se han desarrollado alternativas válidas al transformador convencional, a través de una serie de metodologías diferentes de captación de corrientes, resultando diversos tipos de transformadores de intensidad, como son los transformadores ópticos, los transformadores convencionales con salida óptica o los transformadores que utilizan anillos de Rogowsky. Asimismo, se han desarrollado también en los últimos años transformadores de tensión no convencionales basados en dos filosofías de diseño principales: transformadores que utilizan el efecto Pockels y transformadores que utilizan un divisor capacitivo y salida óptica [Jiménez, 2015].

2.3.2.1 Transformadores de Intensidad

Son transformadores de medida en los cuales la intensidad secundaria es, en las condiciones normales de empleo, prácticamente proporcional a la intensidad primaria y desfasada con relación a ésta un ángulo próximo a cero, para un sentido apropiado de las conexiones [UNE-EN 60044-1, 2000].

Estos transformadores son monofásicos y tienen el arrollamiento primario en serie con el circuito principal a medir, por lo que está recorrido por la intensidad a transformar. En ellos, la corriente primaria es independiente de la carga conectada en el secundario, debiendo ser esta última muy pequeña, con lo que el secundario funciona en condiciones similares a las de cortocircuito.

Los transformadores de intensidad se pueden usar para medida o para protección. Los primeros deben mantener su precisión hasta el nivel de intensidad próximo a la nominal, saturándose rápidamente cuando la sobrepase, con objeto de proteger los instrumentos de medida. Sin embargo, los transformadores de intensidad para protección deben conservar la precisión tanto para intensidades bajas como altas, ya que éstas son las que indican la existencia de falta en la red.

En los transformadores de intensidad hay que poner especial cuidado de que, en ningún caso, ningún circuito secundario del transformador de intensidad quede en circuito abierto, pues provocaría un calentamiento excesivo del núcleo y una tensión muy alta en el secundario [Montané, 1988].

2.3.2.2 Transformadores de Tensión

Son transformadores de medida en los que la tensión secundaria es, en condiciones normales de uso, prácticamente proporcional a la tensión primaria y desfasada con relación a la misma en un ángulo próximo a cero. Como es lógico, estos transformadores se conectan en paralelo en los puntos en los que se quiere medir la diferencia de tensión, estando la tensión de entrada de dichos transformadores fijada por la de la línea.

Hay dos tipos principales de transformadores de tensión: Inductivos y Capacitivos.

Un Transformador de Tensión Inductivo consiste en un arrollamiento primario y un arrollamiento secundario dispuestos sobre un núcleo magnético común. Los terminales del arrollamiento primario se conectan a un par de fases de la red, o a una fase y a tierra. Los terminales del arrollamiento secundario se conectan a los aparatos de medición y protección que constituyen la carga, obteniéndose una tensión de salida proporcional a la tensión de entrada medida dividida por la relación de espiras.

Transformadores de Tensión Capacitivos. Este tipo de transformadores está constituido por un divisor capacitivo al que se conecta un transformador bobinado de tipo inductivo en paralelo con la parte del divisor puesta a tierra. En serie con éste, se conecta una inductancia con núcleo de hierro que está en resonancia a la frecuencia asignada con la capacidad del divisor. La principal ventaja de estos transformadores sobre los inductivos es de tipo económico, pues para altas tensiones, surgen problemas de aislamiento en los transformadores de tensión de tipo inductivo, y su precio se incrementa notablemente. Sin embargo, su principal desventaja es que los capacitivos presentan mayores limitaciones en su respuesta ante fenómenos transitorios que los de tipo inductivo [Montané, 1988].

Al igual que en el caso de los transformadores de intensidad, es muy importante tomar las debidas precauciones en el conexionado y puesta a tierra de los circuitos secundarios de los

transformadores de tensión. A diferencia de aquellos, la principal precaución es no conectar en cortocircuito los circuitos secundarios de tensión.

2.3.2.3 Interruptores automáticos de corriente alterna

El interruptor automático es el elemento de la protección que materializa las órdenes de conexión y desconexión ordenadas por el relé de protección. Además de su función de aislamiento de las zonas averiadas en el menor tiempo posible, cumple también la misión de unir redes o instalaciones en caso de maniobras.

Para hacer mínimos los daños causados en las zonas averiadas, los interruptores automáticos deben realizar su apertura en el menor tiempo posible a pesar de la dificultad de cortar corrientes muy elevadas, como ocurre en caso de cortocircuitos. Para elegir el interruptor adecuado en cada caso, el parámetro fundamental que lo determina es la intensidad de ruptura expresada en kA.

El tipo de interruptor más antiguo todavía en uso es el interruptor automático de gran volumen de aceite, en el que los contactos están dentro de un depósito de aceite aislante que enfría y ayuda a extinguir el arco. Su costo de mantenimiento, unido al peligro que supone grandes volúmenes de aceite inflamable dentro de una subestación, ocasionó que se desarrollaran otras tecnologías, como son los de vacío o los de SF₆ [Knights, 2013].

El interruptor automático de vacío evita los problemas mencionados anteriormente. En estos interruptores se establece un vacío que consigue un efecto dieléctrico muy alto, con lo que se diseñan de forma que la separación entre los contactos sea muy pequeña [Knights, 2013].

El interruptor automático de hexafluoruro de azufre aprovecha las excelentes propiedades de aislamiento, así como una estabilidad térmica y química excepcionalmente altas que posee el hexafluoruro de azufre (SF₆). Estas características, unidas a sus propiedades de absorción térmica y de compresión, han dado a este gas inerte artificial un amplio uso en interruptores, consiguiendo una ausencia casi total de mantenimiento en su ciclo de vida excepto cuando se emplean en trabajos muy duros. Por el contrario, tiene el inconveniente de que son altamente tóxicos los productos que se emiten en la descomposición del SF₆ cuando ocurre un incendio [Knights, 2013].

Al principio, los interruptores se desarrollaron con actuadores de aire comprimido, y luego de muelle, pero actualmente utilizan un innovador sistema de actuadores de imanes permanentes [White, 2010]. Estos sistemas proporcionan una reducción drástica del número de piezas, consiguiendo mayor fiabilidad y robustez [Marchi, 2000].

2.3.2.4 Relés de protección

Se puede definir el relé como un dispositivo que provoca un cambio brusco en uno o varios circuitos de control cuando la cantidad o cantidades a las que responde cambian de manera determinada. Reciben la información enviada por los transductores (normalmente intensidad y tensión, y a veces también señales lógicas), la analizan y comparan con diversos parámetros previamente ajustados, y en función del resultado obtenido, envían las señales para modificación del estado de los interruptores. Entre las cualidades que deben tener los relés, destacan su sencillez y robustez, su rapidez de actuación, que tengan una sensibilidad suficiente y que actúen de forma segura, haciéndolo sólo cuando tengan que hacerlo.

Se puede hacer una clasificación de los relés por su tecnología, que coincide con su evolución cronológica desde los primeros relés electromecánicos o electromagnéticos a los actuales electrónicos digitales, pasando por los intermedios con electrónica analógica convencional. Esta clasificación se puede observar en la figura 2.20:

- Relés electromecánicos: La información suministrada a los relés en forma de intensidad o tensión es transformada por éstos en una fuerza capaz de cerrar unos contactos que establecen la continuidad en el circuito de disparo [Montané, 1988]. Fueron los primeros en desarrollarse teniendo actualmente un uso muy limitado. Se pueden subdividir en relés de émbolo, de armadura articulada, de disco de inducción y de copa de inducción.

Figura 2.20: Evolución de las diferentes tecnologías aplicadas a los relés

- Relés de bobina móvil: su conjunto de elementos está formado por parte de ellos de tipo electromecánico y otra parte de tipo electrónico, ya que, aunque todas las funciones de entrada y de proceso se realizan con componentes electrónicos, la medida obtenida a la salida se efectúa mediante un dispositivo electromagnético de cuadro móvil. En la figura 2.20 se engloban en los primeros años de los relés estáticos.

- Relés estáticos o de estado sólido: no incorporan ninguna parte móvil, ya que todos sus componentes son electrónicos. Siguiendo los principios de la electrónica analógica, estos relés miden por integración los valores instantáneos de la magnitud de entrada. Aunque son más fáciles de ajustar que los relés electromecánicos, tiene mejor resistencia mecánica, son más rápidos de actuación y requieren menor espacio físico, tienen los inconvenientes de ser sensibles a perturbaciones y a la temperatura, además del envejecimiento de sus componentes.

- Relés digitales: están basados en microprocesadores. Para ello, la señal de entrada analógica se filtra y se realiza su conversión a señal digital para su procesamiento en un microprocesador que proporciona una señal de salida a los dispositivos de actuación. Se consigue con estos relés una mejora de sus características, con un gran incremento de su flexibilidad de actuación, una gran facilidad para incorporar funciones de vigilancia y autodiagnóstico, y pudiéndose realizar en el mismo equipo múltiples funciones con la consiguiente reducción del conexionado entre equipos.

- En la actualidad, dichos relés emplean microprocesadores especialmente diseñados para el procesamiento digital de la señal (microprocesadores DSP), que utilizan algoritmos matemáticos en tiempo real por lo que son denominados relés numéricos [Montané, 1988].

2.3.3 Clasificación de las protecciones eléctricas

En la figura 2.21 se representa la evolución en el tiempo de la aparición de los principales sistemas de protecciones. A principios del siglo XX aparecieron las primeras protecciones con la aparición de los relés electromecánicos de sobreintensidad (protección de sobreintensidad). Apenas unos años después surgieron las primeras protecciones diferenciales, que permitían controlar anomalías eléctricas en una zona cuando la suma de las corrientes que entraban y salían de ella no era igual a cero. En la misma primera década de dicho siglo se consiguió que la protección de las instalaciones eléctricas se pudiera hacer en determinadas zonas de las instalaciones en función de la dirección que tenía la sobreintensidad en un punto determinado, dando lugar a la protección direccional. Dos décadas después se pudieron empezar a instalar las primeras protecciones de distancia basadas en la variación de la impedancia de la línea eléctrica vista desde el punto inicial.

Tuvieron que pasar varias décadas para que aparecieran otro tipo de protecciones en las que hubiera un cambio destacable en su modo de funcionamiento. Así, con la aparición de la técnica digital se pudieron conseguir protecciones que, analizando la evolución de una corta sucesión de muestras de la magnitud de un parámetro eléctrico (como la intensidad o tensión) en el momento inmediatamente posterior a una falta en la instalación eléctrica, eran capaces de detectar que se había producido dicha perturbación. A estas protecciones eléctricas ultrarrápidas, pocos años después les siguió la aparición de otro tipo de protecciones, llamadas adaptativas. En ellas, los algoritmos que controlaban los relés ajustaban sus funciones de protección de modo automático a determinados parámetros del sistema eléctrico a lo largo del tiempo, de forma que su actuación esté lo más en sintonía posible con la situación de dicho sistema en cada momento.

Después empezaron a implementarse los relés digitales basados en microprocesadores que permiten la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) tales como las redes neuronales artificiales y la lógica difusa en la detección y localización de faltas. Estos

dispositivos, una vez que se han sometido a entrenamiento, son capaces de aprender y detectar nuevas situaciones en las que hay faltas en el sistema a proteger.

Figura 2.21: Representación en el tiempo de los principales sistemas de protección

La búsqueda de nuevas técnicas de detección de faltas ha ocasionado que haya una importante parte de las investigaciones actuales basadas en las componentes transitorias (componentes de alta frecuencia) de las señales de tensión e intensidad. Esto es posible gracias al desarrollo de nuevos sensores y algoritmos de cálculo mucho más rápidos que sus antecesores.

Un aspecto fundamental en la evolución de los relés ha sido el complemento en su funcionamiento recibido de las telecomunicaciones, desde el primer hilo piloto desarrollado en la primera mitad del siglo XX a los modernos sistemas de comunicación con fibra óptica. Asimismo, es importante destacar la evolución en los sistemas de control, permitiendo concentrar la información, y tomar las decisiones de actuación con una visión global en un centro de supervisión y adquisición de datos (SCADA) [Martinez, 2006].

2.3.3.1 Protección de sobreintensidad

Este tipo de protección se basa en la medida y control de la intensidad que pasa por el equipo a proteger. Cuando es superior a un valor de ajuste, se activa una salida en la protección capaz de desencadenar una acción que proteja la instalación objeto de protección. Se pueden hacer dos grandes grupos de protecciones de sobreintensidad: a tiempo dependiente y a tiempo independiente.

- Protección de sobreintensidad a tiempo independiente: Su tiempo de actuación es independiente de la intensidad, actuando cuando ésta alcanza una magnitud superior a la prevista. Pueden ser instantáneos (actúan inmediatamente) o temporizados (actúan con un tiempo de ajuste). Mediante la temporización de las protecciones de sobreintensidad se consigue la selectividad entre ellas. Así, actúa la protección más adecuada en cada momento y se aísla de esta manera únicamente la parte del sistema con defecto.
- Protección de sobreintensidad a tiempo dependiente: Actúan en un tiempo que es función del valor de la corriente, de forma que cuanto mayor sea ésta, menor será el tiempo de actuación. Por ello suelen denominarse protecciones de sobreintensidad de tiempo inverso.

En las protecciones de sobreintensidad de tiempo inverso, el tiempo de actuación t en segundos y la relación entre la intensidad de paso I y la intensidad de ajuste I_a están relacionados, representándose esta relación en la ecuación (2.1). En ella el exponente α (para un parámetro a y coeficiente multiplicador fijo k dados) define el tipo de característica: de tiempo normal inverso, tiempo muy inverso, tiempo extremadamente inverso o inversa de tiempo largo. Esta clasificación de tiempo menos o más inverso se hace según que la curva de tiempo de actuación- relación de corriente I/I_a tenga una menor o mayor pendiente [Montané, 1988].

$$t = k \frac{a}{\left(\frac{I}{I_a}\right)^\alpha - 1} \quad (2.1)$$

Se puede observar en la figura 2.22 la representación de las curvas de característica de tiempo normal inverso de la ecuación 2.1, con valor de $a = 0,14$ y $\alpha = 0,02$ siendo la abscisa la

relación I/I_a entre la corriente que pasa por la protección y la corriente a la que se ha ajustado dicha protección, y la ordenada el tiempo de actuación del relé en segundos.

Al variar el coeficiente k , se puede obtener un haz de curvas relación de corriente–tiempo de actuación, tal como se ha representado en la figura 2.22, en la que el coeficiente multiplicador k varía entre 0,1 y 1, permitiendo así disponer de un ajuste para el disparo de la protección al nivel de la intensidad de falta deseado.

Figura 2.22: Familia de curvas de característica normal inversa en una protección de sobreintensidad. La abscisa es la relación I/I_a y la ordenada el tiempo t de actuación

Para mejorar la selectividad entre las protecciones de sobreintensidad de tiempo inverso, a veces se las incorpora un elemento que actúa sobre el disparo de la protección en función de la tensión existente en el punto donde está instalada la protección, de forma que cuanto menor sea aquélla, menor es el tiempo de actuación del relé. Estos elementos pueden ser frenados por tensión o controlados por tensión.

En las protecciones con frenado por tensión el arranque de la protección se produce a intensidades más pequeñas cuanto menor sea la tensión en ella. En las protecciones controladas por tensión no hay una variación continua de la intensidad de actuación en función de la tensión, sino que existe únicamente un escalón [Montané, 1988].

2.3.3.2 Protección de sobreintensidad direccional

Para conseguir una adecuada selectividad entre las protecciones, a veces es necesario dotar a las protecciones de sobreintensidad de otro elemento adicional. El elemento direccional permite la actuación del elemento de sobreintensidad únicamente cuando la corriente circula en un sentido determinado. Para ello es preciso comparar la fase de la magnitud de operación del elemento (en caso de una falta normalmente la intensidad) con la de otra magnitud alterna cuya fase se vea alterada lo menos posible por la existencia de una falta. A esta magnitud adicional que sirve de referencia para la corriente de falta se le denomina magnitud de polarización, que, aunque a veces es una corriente, normalmente es una tensión. En este caso se denomina polarizada por tensión a la protección de sobreintensidad direccional.

Inicialmente, los elementos direccionales eran de tipo electromagnético, con un principio de funcionamiento similar al de los vatímetros. [Suárez, 2011]

Se diseñaba para que la línea divisoria de la zona de actuación se posicione a $\pm 90^\circ$ del ángulo máximo de par, de forma que cuando el ángulo de la corriente con la tensión de polarización supere esos valores no se produjese ninguna actuación del elemento. El ángulo δ que formaba la tensión de polarización con el ángulo máximo de par se podía hacer distinto de 0° insertando una resistencia en el circuito de tensión del elemento direccional [Montané, 1988].

En los modernos dispositivos de tipo electrónico incluidos en los relés de sobreintensidad, es posible parametrizarlos para que, además de definirles el ángulo de par δ , se les

especifique una zona de actuación con un ángulo $\emptyset$ de valor distinto de $\pm 90^\circ$ tal como se especifica en la figura 2.23.

2.3.3.3 Protección diferencial

Este tipo de protección se llama diferencial porque compara la corriente entrante con la saliente en un elemento. Como la suma vectorial de todas las intensidades que llegan a un nudo debe ser cero, si hay un resultado no nulo o diferencia, es señal de que hay alguna falta en la zona comprendida entre los puntos donde se colocan los sensores de todas las intensidades entrantes y salientes [Suárez, 2011].

Figura 2.23: Esquema de actuación de un elemento direccional con ángulo de actuación menor de $\pm 90^\circ$

2.3.3.4 Protección de distancia

El principio de la protección de distancia está basado en que cuando se produce una falta en una línea, su posición puede determinarse midiendo la impedancia que existe entre el punto en que está situada la protección y el punto de defecto, siendo por tanto aplicable a líneas.

Cuando ocurre una falta F en el punto m de la línea representada en la figura 2.24, la impedancia medida desde el interruptor B será

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B} = m Z_L \quad (2.2)$$

siendo U_B la tensión en el punto B, I_B la intensidad en el punto B, m la fracción de distancia de la línea a la que ha ocurrido la falta y Z_L la impedancia de la línea completa B-C [Suárez, 2011].

Figura 2.24: Representación del principio de la protección de distancia

Por tanto, con este tipo de protecciones, si se conoce la impedancia de la línea completa Z_L , además de conocer la posición de la falta, se puede conseguir proteger la línea ajustando dicha protección para que actúe cuando la impedancia vista desde el extremo de la línea tenga un valor menor que Z_L . Es decir

$$Z_B = \frac{U_B}{I_B} < Z_L \quad (2.3)$$

En la práctica, imprecisiones procedentes de los errores introducidos por los transformadores de medida o por la resistencia de defecto, errores en la estimación de la impedancia de la línea y otros efectos perturbadores ocasionan que si el ajuste de la protección se realiza con el valor de la impedancia de la ecuación (2.3), se puedan producir disparos no deseados de la protección. Para evitarlos, se modifica dicho ajuste para que la protección sólo actúe cuando la impedancia vista desde el extremo de la línea sea menor que el 80 % de la impedancia de la línea completa, es decir $Z_B < 0,8 Z_L$. Un esquema de la disposición de los ajustes de la impedancia para la actuación de estas protecciones se representa en la figura 2.25. [Suárez, 2011] En ella se representan dos tramos de línea, cada uno con protecciones de distancia en cada extremo que solo actúan en una dirección. Así, el primer tramo entre las protecciones B y C, está protegido en primer escalón únicamente por ellas, ya que cuando se produce una falta en ese tramo, bien B, bien C o las dos deben actuar de inmediato. Sin

embargo, para una falta en el segundo tramo, el comprendido entre las protecciones D y E, sólo éstas deben actuar inmediatamente, evitando que actúen B y C para no dejar sin servicio innecesariamente este tramo de línea.

Figura 2.25: Disposición de los ajustes de las protecciones de distancia

Con este criterio, la protección B, tal como se puede observar en la figura 2.25, se ajusta para que actúe en dirección BC cuando ocurra una falta en el espacio que comienza en la posición de la protección B y acaba en el 80% de la longitud de BC, en un tiempo tan corto t_1 (del orden de 20 ms), que se puede decir que actúa de manera inmediata. A este ajuste se le denomina protección en Zona 1, y se consigue disponiendo dicha protección para que actúe cuando la impedancia medida en la dirección BC por la protección B sea

$$Z_B < 0,8 Z_{LBC} \quad (2.4)$$

siendo Z_{LBC} la impedancia del tramo BC. Por tanto, una falta que ocurra entre al 80% y el 100% de BC, no provocaría el disparo de la protección B de forma inmediata, sino en un tiempo t_2 (entre 0,3 y 0,6 s), que es el tiempo de actuación de B para posiciones de falta

incluidas en la llamada Zona 2. Dicha Zona 2 de B es el tramo comprendido desde esta protección hasta una longitud del 120 al 150% del tramo BC (o el 100% de BC más el 50% del tramo siguiente DE). Sin embargo, para que el intervalo comprendido entre el 80 y el 100% del tramo BC tenga una protección en un tiempo adecuado, inmediato, la protección C que actúa en la dirección CB, se disparará para una falta que ocurra en dicho intervalo, ya que está dentro de la Zona 1 de actuación de C. De esta forma, la protección de la zona 2 de B para una falta en ese intervalo actuaría como respaldo de la protección C. Asimismo, para una falta en la parte más cercana a la protección D del tramo DE, la protección de zona 2 de B actuaría como respaldo de la protección D.

El ajuste de la zona 3 de B se hace de forma que su alcance sea BC más el 150% de la línea siguiente DE (o bien BC más DE más el 25% de la siguiente línea a la DE), actuando en un tiempo t_3 de aproximadamente 1s, y consiguiéndose así un respaldo adicional en el caso de que no hubieran actuado debidamente las protecciones más rápidas.

El alcance de una protección de distancia está definido por la característica de actuación del relé de distancia que incorpora la protección. Esta característica es el contorno de actuación del relé en el plano R-X de los componentes de la impedancia, y normalmente viene determinada por el equilibrio entre dos magnitudes opuestas entre sí. Una de ellas tiende a producir la actuación u operación del relé, mientras que la otra tiende a su frenado. Estas magnitudes son pares de operación proporcionales a tensiones e intensidades vistas por el relé en el caso de relés electromagnéticos, mientras que en el caso de relés de estado sólido analógicos se produce una comparación de magnitudes de tensión e intensidad. En el caso de la característica circular del relé de mínima impedancia representada en la parte izquierda de la figura 2.26, dicha característica se obtiene en un relé electromagnético mediante un par de operación proporcional al cuadrado de la intensidad y un par de frenado proporcional al cuadrado de la tensión [Suárez, 2011].

Otra característica de relés de distancia es la característica mho , representada en la parte derecha de la figura 2.26. Es también circular pero pasando por el origen, lo que la hace direccional. De esta forma, permite acomodarse a amplios valores de resistencia de falta modificando la posición del centro de la circunferencia.

Figura 2.26: Característica de mínima impedancia (izquierda) y característica mho (derecha)

Algunos tipos de características de actuación tienen una forma diferente, de líneas en vez de circunferencias. Estas características están diseñadas para usarse conjuntamente con otro elemento direccional, o combinadas ellas mismas dando lugar a figuras geométricas. Una muestra de estas figuras es la característica poligonal representada en la figura 2.27. Esta característica es propia de los relés digitales con microprocesador.

Figura 2.27: Característica poligonal de una protección de distancia

Se consigue que esta característica sea direccional al pasar por el origen del plano RX. Además, permite detectar faltas con elevada resistencia, y al mismo tiempo se puede ajustar fácilmente para que la impedancia de carga esté fuera de la zona de actuación. [Suárez, 2011]

Con estas figuras, tales como semicircunferencias, polígonos o en forma de ocho se consiguen zonas de actuación muy ajustadas a los objetivos de protección buscados en cada momento.

2.3.4 Estructura de las protecciones ferroviarias de corriente alterna

Como ya se ha expuesto anteriormente, las peculiares características de las líneas del tendido eléctrico ferroviario, en particular su poca separación con los elementos circundantes y la alta tensión mecánica a la que está sometida la catenaria o línea de contacto, provoca que sea mayor la frecuencia a la que ocurren las faltas y se necesite despejarlas más rápidamente incluso, que en las líneas de transmisión eléctrica públicas [Kiessling y otros, 2001].

En estas condiciones, prima por tanto la obediencia (actuar cuando debe actuar) de las protecciones ferroviarias sobre la seguridad (no actuar cuando no debe actuar), ya que un disparo indeseado de la protección tiene consecuencias menos graves debido a la inercia en el movimiento de los trenes [Areva T&D 2002]. Otra característica habitual que dificulta el funcionamiento de las protecciones en las líneas ferroviarias es la alta carga de intensidad que lleva la línea en determinados momentos [Knights, 2013], cercana al nivel de la corriente de falta en caso de cortocircuito a tierra [Hill, 1994].

Como en toda instalación eléctrica, las protecciones se instalan en todos los componentes de la estructura ferroviaria (subestaciones, puestos de acoplamiento, líneas de contacto, unidades eléctricas de tracción) con conjuntos de dispositivos de protección específicos de cada componente. [Cornah y otros, 2008]. El control de estas protecciones se suele llevar a cabo de una forma jerárquica. Se realiza dicho control localmente desde el propio dispositivo, y también desde una sala de control de la propia instalación. Y a distancia, mediante telemando, desde un centro de control que gobierne todas o parte de las instalaciones de protección de la línea ferroviaria con la ayuda de un adecuado sistema de

supervisión, control y adquisición de datos (SCADA). [Menter y Kaltenbach, 1999] [Kuypers y otros, 2008].

2.3.4.1 Estructura en sistemas de tracción 1×25 kV

En la figura 2.28 se muestra un ejemplo de la estructura simplificada (no se han representado los relés) de las protecciones en una subestación de tracción ferroviaria clásica de corriente alterna (1×25 kV), en la que tampoco se han representado las autoválvulas de protección contra sobretensiones que normalmente se instalan en los pórticos de salida a vías y en la entrada y salida de los transformadores de potencia. [Kiessling y otros, 2001] [Cosulich y otros, 1996].

En dicha estructura se ha considerado que el sistema de tracción está conectado a la red eléctrica pública de manera directa, con lo que la frecuencia de corriente alterna del sistema ferroviario es la misma que la de la red. La conexión de las subestaciones a la red eléctrica pública se hace normalmente a nivel de transporte, y la disposición de los elementos de entrada, salida y los transformadores, se hace de forma redundante para, aun recurriendo al funcionamiento en modo degradado de la línea, evitar en gran medida la falta de servicio en ella.

2.3.4.1.1 Protección a la entrada de la subestación

De cada línea trifásica de la red, normalmente aérea, se conectan cada uno de los dos seccionadores trifásicos de línea L con mando motorizado (M) y conexión de puesta a tierra. A la salida de estos seccionadores solamente están conectadas dos fases, unidas al interruptor bipolar I. Un seccionador intermedio N permite conectar a una misma línea de la red los dos transformadores de potencia T en caso de fallo de alguna de las dos líneas trifásicas. Los interruptores I, están controlados por relés a los que llega la información proporcionada por los transformadores de medida y protección. Estos transformadores, representados en la figura como transformadores de tensión V y de intensidad C, en esta configuración están instalados, los primeros, antes del interruptor y los de intensidad a la entrada de los transformadores de potencia T. Las principales funciones de protección que en esta zona se

realiza son las protecciones de sobreintensidad instantánea, de sobreintensidad temporizada y de mínima y máxima tensión [Courtois, 1993-2].

Figura 2.28: Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una subestación de tracción ferroviaria de corriente alterna

2.3.4.1.2 Protección de transformador

Los transformadores de potencia reducen la tensión de entrada de la red a valores de alimentación de la línea de contacto. Una de las salidas del secundario de estos transformadores se conecta a tierra y al carril A, mientras que la otra se une a las barras de distribución de la subestación eléctrica a través de un interruptor I y de un seccionador S motorizado con puesta a tierra para aislar la salida del transformador en caso necesario. Además, tienen instalados transformadores de tensión e intensidad para protección y medida.

Los tipos de protecciones más habituales instaladas en los transformadores son la protección diferencial, la protección de faltas a tierra, la protección térmica, la protección de mínima y máxima tensión, las protecciones contra sobretensiones mediante autoválvulas y las protecciones de Buchholz [Knights, 2013].

2.3.4.1.3 Protección a la salida de la subestación

Mediante los interruptores y seccionadores dispuestos a la salida de los transformadores se separan, cuando es necesario, los transformadores de las barras de salida de la subestación. Mediante estos dispositivos y el seccionador motorizado X es posible alimentar en caso de emergencia las dos secciones de la línea de contacto de la subestación con un solo transformador, al cerrar el seccionador X y abrir el seccionador del transformador averiado. Asimismo, abriendo los seccionadores de los transformadores en caso de fallo completo de la subestación, es posible alimentar la línea de contacto desde las subestaciones adyacentes dando servicio en modo degradado.

2.3.4.1.4 Protección de la línea de contacto

La conexión con las catenarias de vía desde las barras de la subestación se realiza mediante seccionadores motorizados para independizar la salida a cada vía y a cada sección. A continuación de cada seccionador se instala un interruptor, normalmente controlado por relés multifunción provistos de las protecciones adecuadas para cada disposición de la sección de vía, que recibe la información necesaria de los transformadores de tensión e intensidad instalados junto a cada interruptor.

Desde el edificio se disponen las salidas a las catenarias de vía, de forma que primero se agrupen en un pórtico de salida situado junto a las vías y provisto de seccionadores motorizados que en caso necesario aíslen completamente una sección de vía de la subestación. Así se consigue que, al mismo tiempo que las secciones que no están en falta permanezcan conectadas y sigan dando servicio, se desconecten las secciones dañadas.

Para aislar las distintas secciones de una misma vía, las zonas neutras disponen también de seccionadores motorizados. Éstos, que normalmente están abiertos, se cierran para dar tensión a dichas zonas neutras en casos necesarios excepcionales.

Como es lógico, el principal problema de la protección de la línea de contacto es detectar las faltas que ocurren en la posición más alejada del punto de medida, ya que la corriente medida de falta en la subestación puede ser de menor nivel que la corriente medida en el caso de que se produzca el arranque de un tren, y peor aún, el de varios trenes.

Se puede enumerar como principales protecciones de la línea de corriente alterna la protección de distancia, la protección de sobrecarga térmica, la protección por sobreintensidad de tiempo inverso, y la protección de cambio de fase en diferentes sectores [Knights, 2013].

2.3.4.2 Estructura en sistemas de tracción 2×25 kV

Al tener estos sistemas de tracción de corriente alterna un conductor negativo de -25 kV, además del positivo de +25 kV de alimentación al tren, este sistema necesita tener duplicados gran parte de los elementos que configuran sus protecciones, tal como se puede observar en el esquema simplificado de la figura 2.29 [Courtois, 1993-2].

Aunque es frecuente la utilización de interruptores de doble polo controlados con una única salida del relé, hay instalaciones en las que el polo positivo es independiente del polo negativo del interruptor, y están controlados individualmente por cada salida de dicho relé (mando unipolar). Asimismo, los seccionadores, normalmente motorizados, pueden abrir o cerrar los dos polos simultáneamente o individualmente según sea necesario en cada situación, permitiendo incluso, un funcionamiento aceptable en una sección con falta únicamente en el alimentador negativo desconectando este alimentador en la sección.

Las protecciones en las diferentes partes de las subestaciones en los sistemas 2×25 kV son muy similares a las que se han descrito para el sistema 1×25 kV, aunque a la salida de los transformadores ahora actúan sobre dos polos en lugar de únicamente el positivo.

Asimismo, en el sistema 2×25 kV las protecciones de línea son del mismo tipo que las del sistema 1×25 kV, aunque su complejidad aumenta debido a la duplicidad de elementos de medida y control. Además, existe una dificultad adicional importante, ya que el principal sistema de protección de línea en 1×25 kV, la protección de distancia, tiene unas características muy distintas en el sistema 2×25 kV, que hacen que su aplicación sea de manera diferente.

Figura 2.29: Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una subestación de tracción ferroviaria de corriente alterna 2×25 kV

Como es lógico, en este sistema la disposición de los elementos de entrada, salida y los transformadores, se hace de forma redundante para que, al igual que en los otros sistemas ferroviarios, se evite en lo posible la falta de servicio aunque haya que realizarlo con funcionamiento en modo degradado de la línea.

2.3.4.3 Estructura en autotransformadores en sistemas 2×25 kV

Al ser estas instalaciones del sistema 2×25 kV, también las protecciones tienen que actuar tanto sobre el conductor de alimentación positivo de +25 kV como sobre el de alimentación negativo de -25 kV [Menuet, 1993]. En la figura 2.30 se muestra un ejemplo de un esquema

simplificado de una estación de autotransformadores intermedia con dos autotransformadores AT, en la que normalmente uno está en servicio y otro de repuesto.

Figura 2.30: Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una estación de autotransformador intermedia de tracción ferroviaria de corriente alterna 2×25 kV

En caso de una estación de autotransformación final de sección, la disposición normal es que estén agrupados en el mismo edificio los dos conjuntos de dos autotransformadores, tal como está representado en la figura 2.31.

Figura 2.31: Ejemplo de la estructura simplificada de las protecciones en una estación de autotransformador final de 2×25 kV

Cada conjunto está conectado a una sección y entre ellos se instala un interruptor normalmente abierto con un seccionador a cada lado, que en caso necesario (por ejemplo, en caso de fallo en una subestación y que se active el servicio en funcionamiento degradado) se cierran y conecten las dos secciones de las subestaciones adyacentes.

Los tipos de protecciones más habituales instalados en los autotransformadores son: la protección diferencial, la protección de sobreintensidad instantánea y temporizada, la protección térmica, la protección de mínima y máxima tensión, la protección por cambio de fases, la protección contra sobretensiones mediante autoválvulas, la protección de Buchholz y la protección de faltas a tierra. En casos muy excepcionales debido a su alto costo, en algunas líneas se instalan protecciones de distancia en los autotransformadores para facilitar la localización del punto en el que ha ocurrido una falta.

2.3.5 Detección de faltas en líneas ferroviarias de corriente alterna

Ya se ha descrito anteriormente que, además de ser frecuentes por las características especiales de las líneas de contacto ferroviarias, las faltas que se producen en ellas tienen que ser detectadas y despejadas muy rápidamente debido al riesgo de ruptura del cable de contacto con el consiguiente peligro para las personas e instalaciones circundantes. Además, es de vital importancia, al igual que en cualquier tipo de línea eléctrica, saber en un tiempo muy corto la posición en que ha ocurrido la falta y acceder directamente al punto en que aquélla ha sucedido, evitando los costes asociados a la búsqueda por la línea por el personal ferroviario [Wales, 2004]. Se consigue de esta manera poder reparar la avería rápidamente y disminuir en gran medida el tiempo que no está en servicio la vía debido a la falta de alimentación.

Asimismo, se ha descrito anteriormente que el tipo de protección principal de línea en los sistemas ferroviarios de corriente alterna es la protección de distancia [Huang y otros, 2004]. Este tipo de protección es rápida, selectiva, sensible a cambios pequeños, y puede proporcionar protección de respaldo en caso necesario a las secciones adyacentes [Weller y Hindle, 1989]. La protección de sobreintensidad no es adecuada como protección principal ya que hay veces en que las corrientes de falta son bajas, sobre todo lejos de la subestación, con lo que disminuye la fiabilidad de la protección de sobreintensidad. Además, en caso de funcionamiento degradado con el consiguiente alargamiento de la línea alimentada desde una subestación, las aportaciones de corriente a las faltas serían todavía menores, agravándose la detección de dichas faltas. [Chamorro, 2005]

Sin embargo, la protección de sobreintensidad, además de usarse para la protección de faltas en barras de la subestación [Hewings y otros, 2008], se utiliza como protección de respaldo temporizada de la línea para el caso de funcionamiento no adecuado de la protección principal de distancia [Chamorro, 2005] [Caires, 2014]. Esta protección de respaldo de sobreintensidad, que instalada en paralelo con la de distancia, incrementa la seguridad y fiabilidad de las protecciones como resultado de la redundancia de los dos tipos de sistemas, es habitualmente del tipo de protección de sobreintensidad de tiempo definido. El ajuste de su tiempo de actuación debe hacerse asegurándose que los elementos del relé de protección de distancia actúen primero, de forma que la protección de sobreintensidad sólo dispare

cuando haya fallado aquella. Igualmente, la protección de sobreintensidad se activa como protección principal en los cortos periodos que sean necesarios para labores de mantenimiento, por ejemplo de los transformadores de tensión, en los que se bloquea la protección de distancia [Areva T&D, 2002].

Asimismo, en las líneas se instala una protección térmica de sobreintensidad, para evitar daños a la catenaria ocasionados por sobrecargas prolongadas o faltas de alta resistencia que no puedan ser detectadas por la protección principal ni la de respaldo. Para ello, los relés ferroviarios llevan implementada la función de protección térmica basada en un modelo que calcula el estado térmico de la misma en función del cuadrado de la intensidad en la catenaria integrado en el tiempo [Areva T&D, 2002].

Una protección complementaria que está empezando a incorporarse a los relés ferroviarios de corriente alterna está basada en el uso de detectores de velocidad de cambio de tensión dV/dt y de intensidad dI/dt . Estos detectores se usan para controlar los retardos asociados a los tiempos de actuación de las zonas de los relés de distancia cuya actuación no sea instantánea, obteniendo así mejor discriminación entre impedancias de carga y de falta [Areva T&D, 2002].

Por otra parte, en las líneas ferroviarias, a diferencia de las líneas de los sistemas de potencia, no es posible utilizar una protección diferencial entre extremos de la sección de línea debido a la presencia de cargas móviles variables circulando entre dichos extremos [Weller y Hindle, 1989].

2.3.5.1 Protecciones de distancia en líneas de corriente alterna

Las protecciones de distancia tienen una gran capacidad para permanecer estables para grandes corrientes de carga, al mismo tiempo que puede funcionar con niveles de corriente de falta muy bajos, del mismo orden de magnitud, e incluso menor que la intensidad máxima de carga [Chamorro, 2005], lo que las hace muy adecuadas para la protección de líneas ferroviarias de corriente alterna.

Los relés de distancia, normalmente instalados en las subestaciones, realizan la división vectorial entre la tensión V y la intensidad I para determinar la impedancia de carga, o de falta en caso de que se produzca. En los sistemas de corriente alterna con un solo conductor

de alimentación y otro de retorno ($1 \times 25 \text{ kV}$), la tensión V es la tensión catenaria-rail obtenida con un transformador de tensión, y la intensidad I se obtiene mediante un transformador de intensidad en el conductor de alimentación o catenaria. Ambos transformadores están instalados a la salida de la subestación hacia la línea. [Chamorro, 2005]. El resultado de la división se compara constantemente con la característica del relé ajustada a las necesidades de la instalación, produciéndose el disparo del relé en caso de que dicho resultado esté dentro de las zonas de disparo definidas [Caires, 2014].

2.3.5.2 Propiedades de los relés de distancia ferroviarios

La característica de operación de los relés de distancia viene determinada por la posición en el plano $R-X$ de la impedancia compleja medida. Esta funcionalidad de poder determinar el ángulo de fase de la impedancia medida por los relés de distancia hace posible distinguir entre impedancia mínima de carga y máxima impedancia de falta remota. De los diversos tipos de características existentes en los relés de distancia, como el de característica de mínima impedancia, el de característica mho , o el de característica poligonal, es este último el más adecuado para la protección del sistema ferroviario, ya que no presenta el problema inherente al relé de tipo circular de tener que reducir el alcance efectivo en caso de que haya una elevada resistencia de falta. En la figura 2.32 se representa la característica de un relé de distancia de los habitualmente empleados en líneas ferroviarias cuya característica es poligonal [Shenoy y otros, 2004].

La característica poligonal ofrece una gran flexibilidad en cuanto al alcance al poderse ajustar la resistencia límite independientemente del alcance [Maheshwari y Verma, 1997]. De esta manera, se consigue que la zona de protección más externa no llegue al área de carga, evitando así disparos no deseados [Caires, 2014]. Asimismo, también es necesario que las zonas de disparo eviten las zonas de carga regenerativa en caso de frenado de los trenes.

Las faltas de catenaria a tierra sin resistencia tienen impedancias que corresponden en la figura 2.32 a posiciones a lo largo de la línea discontinua. Esta línea forma con el eje resistivo un ángulo eléctrico que normalmente está comprendido entre 70° y 75° [Chamorro, 2005].

Figura 2.32: Característica típica de impedancia de un relé de distancia ferroviario

Es habitual ajustar los relés con tres zonas de protección con diferentes alcances y diferentes retrasos de actuación del relé. La zona Z1 es la de menor alcance inductivo y mayor resistivo, con un tiempo de actuación menor, prácticamente instantáneo, mientras que Z3 es la de mayor alcance inductivo, menor resistivo, y tiempo de actuación mayor. La figura 2.32 muestra que el alcance resistivo de la zona Z1 se separa del caso peor de la zona de carga en un razonable margen de entre el 10 y el 20%.

En los alcances inductivos de las diversas zonas de protección, normalmente las zonas con menor alcance, Z1 y Z2, se hacen completamente direccionales, de forma que sólo disparen ante faltas que ocurran en la línea en la dirección más alejada de la subestación de tracción. Sin embargo, para la zona de mayor alcance, Z3, suele permitirse un cierto alcance hacia atrás, en la dirección barras [Chamorro, 2005].

2.3.5.3 Características optimizadas de los relés de distancia

La característica poligonal de los actuales relés de distancia ferroviarios tiene una forma modificada de manera similar a la de la figura 2.33 consiguiéndose así una mejor

funcionalidad [Areva T&D, 2002].

Figura 2.33: Característica poligonal optimizada de impedancia de un relé de distancia ferroviario

Introduciendo una muesca en la forma de la característica del relé y un menor alcance resistivo R_g permite evitar que hubiera invasión de la característica del relé en el área de carga.

2.3.5.4 Configuración de la protección de distancia en las líneas

Aunque en los diferentes sistemas ferroviarios de corriente alterna, las protecciones de distancia sean la protección principal, dependiendo del tipo de línea ferroviaria de corriente alterna que se esté protegiendo, será diferente, tanto la forma de obtener dicha impedancia, como la manera de definir las zonas de la característica del relé.

2.3.5.5 Ajuste de alcances de zonas de protección en 1×25 kV

En las líneas con alimentación clásica de corriente alterna (1×25kV), el relé de distancia instalado a la salida de la subestación calcula la impedancia compleja Z mediante la división entre la tensión V_{CR} y la intensidad I_C , siendo V_{CR} la tensión catenaria-raíl en la salida a la línea medida mediante un transformador de tensión, e I_C la intensidad que circula por la catenaria en la salida a la línea medida con un transformador de intensidad. Dependiendo del valor de la impedancia medida, el disparo se producirá en un tiempo mayor o menor al situarse la impedancia dentro de las diferentes zonas de protección [Caires, 2014]. Los ajustes de los alcances de las zonas de protección suelen establecerse con el siguiente criterio:

Zona 1 (Z1): Para evitar errores de sobrealcance, que pueden ser debidos a desviaciones en las medidas de los relés, de los transformadores de tensión o intensidad, o de los datos de la impedancia de catenaria, es aconsejable que el alcance de la zona 1 no sea mayor que el 85% de la sección protegida.

El ajuste del tiempo de disparo de esta zona puede hacerse instantáneo al no necesitarse coordinación con el disparo en ninguna otra zona [Chamorro 2005].

Zona 2 (Z2): El último tramo del 15% no protegido por la Zona 1, se protege con la Zona 2 de disparo del relé de distancia. Para evitar errores de subalcance y asegurar que la Zona 2 cubra dicho último tramo, y por lo tanto la totalidad de la sección protegida, se ajusta el alcance de esta zona al menos al 115% de la longitud de dicha sección [Areva T&D, 2002].

El tiempo de operación de esta zona debe de coordinarse con el tiempo de despeje de faltas de zona 1 de las catenarias adyacentes más alejadas del relé. El tiempo mínimo de actuación del relé en zona 2 suele ser de 150 – 200 ms [Areva T&D, 2002] y [Chamorro, 2005].

Zona 3 (Z3): Esta zona se usa como protección de respaldo, tanto a la sección protegida como a la sección adyacente más alejada. El alcance de la Zona 3 suele por tanto ajustarse al menos al 115% de la combinación de la sección protegida y de la sección adyacente.

El tiempo de retraso en el disparo de la Zona 3 se ajusta con las mismas consideraciones hechas para el tiempo de retardo en la Zona 2, excepto que además hay que añadir el tiempo de coordinación con la Zona 2 de la sección adyacente más alejada. El tiempo de ajuste típico para la Zona 3 suele ser de un mínimo de 400 ms [Areva T&D, 2002].

Por otra parte, es habitual que haya una zona direccional inversa para proporcionar protección de respaldo para faltas en la barra local. Su alcance suele ser del 25% del alcance de la Zona 1 del relé, siendo normalmente la Zona 3 la que se ajusta incluyendo esta zona inversa [Areva T&D, 2002].

Otra situación en la que puede ser necesario zonas con alcance inverso es en el caso del frenado regenerativo de los trenes, en el que se ocasiona una corriente en dirección contraria, es decir, desde el tren a la catenaria [McQuillan, 1997]. Cuando un tren con frenado regenerativo contribuye a la corriente de falta, la impedancia de falta medida por el relé de distancia puede aumentar su ángulo hasta 10° sobre el valor del ángulo característico del relé [Areva T&D, 2002].

2.3.5.6 Ajuste de alcances de zonas de protección en 2×25 kV

También en estos sistemas la protección principal normalmente está encomendada a los relés de distancia [Chamorro, 2005] [Gao, 1993] aunque, como en todos los sistemas de corriente alterna, adicionalmente tienen una protección de respaldo mediante relés de sobreintensidad.

Cuando los interruptores instalados en la salida a la línea son unipolares, se puede utilizar un relé sólo para protección de la catenaria y otro sólo para la protección del conductor negativo o alimentador, ajustando las zonas de protección de la sección de forma similar a como se hace con el sistema de alimentación 1×25 kV. Sin embargo, la forma de protección más usada es utilizar un único relé de distancia en el caso de interruptores bipolares, que protege conjuntamente a la catenaria y al alimentador tal como se muestra en la figura 2.34 [Cesario y otros, 1993].

De esta forma, el relé mide la suma vectorial resultante de la corriente de catenaria I_c y la opuesta de la corriente de alimentador I_f . Es decir $I_{relé} = I_c - I_f$, que es igual que la corriente de carga, e igual a la corriente de falta en caso de que ocurra un cortocircuito a tierra. Si se utiliza una única entrada de intensidad del relé para la lectura de esta corriente, es necesario realizar externamente esta suma vectorial conectando los secundarios de los transformadores de intensidad en paralelo y respetando las polaridades. Asimismo, se pueden emplear relés con dos entradas de intensidad, con lo que se deben alimentar éstas independientemente y hacer la suma algebraica interiormente en el relé [Chamorro, 2005].

Figura 2.34: Esquema de protección de catenaria y alimentador con un único relé de distancia en una sección de un sistema de alimentación 2×25 kV

En cuanto a la tensión, normalmente el relé mide la tensión de catenaria- rail, ya que las variaciones de cada una de las dos tensiones, la de catenaria o la de alimentador, serán las mismas, y por tanto es válida la medida de cualquiera de ellas [Chamorro, 2005] [Areva T&D, 2002].

Al aplicar las zonas de protección de distancia a los sistemas 2×25 kV con lógica de disparo de dos polos y con medida del relé de la corriente combinada $I_c - I_f$, se puede observar que normalmente no es posible proporcionar un esquema de protección completamente selectiva. Esto es debido a que en el relé se pierde la linealidad entre la impedancia y la distancia a la falta, que es característica de las aplicaciones habituales de las protecciones de distancia y que sí es aplicable en los sistemas 1×25 kV.

Por tanto, generalmente es muy difícil en las protecciones de distancia 2×25 kV con medida de corriente combinada ajustar la Zona 1 en subalcance y la Zona 2 en sobrealcance de manera adecuada [Jung y otros, 2004]. Para conseguirlo se instalan las protecciones en las

subestaciones de tracción ajustadas para detectar todas las faltas que ocurran hasta la subestación del autotransformador final SATS [Chamorro, 2005] [Areva T&D, 2002].

En la figura 2.35 se muestra el diagrama de la impedancia en ohmios en la subestación en función de la distancia en km a la que ha ocurrido una falta por cortocircuito catenaria-tierra en una sección con vía única. Esta impedancia, que es la habitualmente medida por el relé de distancia de la subestación de tracción, está calculada utilizando la tensión catenaria-rail y la intensidad combinada de catenaria y alimentador ($I_c - I_f$) mencionada anteriormente [Chamorro, 2005].

En dicho diagrama se puede observar la falta de linealidad entre el módulo de la impedancia medida y la distancia entre la subestación y la falta, con mínimos de impedancia en los puntos en los que están situados los autotransformadores.

Figura 2.35: Diagrama del módulo de la impedancia combinada en subestación ST en función de la distancia de ST a una falta catenaria-tierra para una sección 2×25 kV de vía única

En el caso de una sección 2×25 kV de cuatro vías, el diagrama impedancia-distancia se representa en la figura 2.36, en la que puede notarse igualmente la relación no lineal entre la impedancia combinada en la subestación y la distancia, y además, que los mínimos del

módulo de la impedancia en las faltas que ocurren junto a los autotransformadores son mucho más acusados [Chamorro, 2005].

Figura 2.36: Diagrama del módulo de la impedancia combinada en subestación ST en función de la distancia de ST a la falta catenaria-tierra para una sección 2x25 kV de cuatro vías

Con estas consideraciones, el ajuste de los alcances de las zonas de protección se suele realizar (figura 2.36) con los siguientes criterios:

Zona 1 (Z1):

En ocasiones, como por ejemplo en funcionamiento de la alimentación de la línea en modo degradado, es necesario unir eléctricamente una sección a la sección adyacente mediante un interruptor instalado en el autotransformador final SATS de la sección. En estos casos, y para tener un margen de seguridad ante los errores que pueden surgir debidos a desviaciones en las medidas de los relés, de los transformadores de medida, o de los datos de la impedancia de catenaria, es aconsejable que el alcance de la zona 1 no sea mayor que el 85% del segmento CD (figura 2.36): $Z1 = 0,85 \underline{CD}$. Estas restricciones no son necesarias cuando se tenga la seguridad de que el interruptor en el autotransformador final SATS esté siempre abierto [Chamorro, 2005].

Zona 2 (Z2):

Según lo descrito para el ajuste de la zona 1, habrá un ajuste en zona 2 en el caso de que el interruptor en el SATS que conecta la sección a proteger con la sección adyacente esté cerrado o no se sepa su estado. Esta zona 2 deberá ver la impedancia de falta en cualquier punto de la línea protegida entre la subestación de tracción y la estación del autotransformador final de la sección SATS. El valor más alto posible del módulo de la impedancia medida por el relé de distancia es el punto más alto de la curva de impedancia de la última subsección entre ATS2 y SATS, señalado en la figura 2.36 como $Z_{\text{máx}}$. Por tanto, el valor mínimo del ajuste de impedancia correspondiente sería la longitud del segmento AB de dicha figura. Para evitar errores de subalcance por desviaciones de medidas, se aplica un margen de seguridad del 15%, de forma que el ajuste de la zona 2 tiene un valor $Z_2 = 1,15 \underline{AB}$ [Chamorro, 2005].

Zona 3 (Z3):

Con los ajustes para las zonas 1 y 2, los relés de la subestación de tracción proporcionan una protección completa entre la subestación de tracción y el autotransformador final SATS. Sin embargo, se puede ajustar una tercera zona para ofrecer un respaldo remoto frente a las faltas que ocurran más allá del SATS en caso de que el interruptor existente en esta instalación de autotransformador final de sección esté cerrado, y por lo tanto, la sección a proteger esté unida eléctricamente a la sección adyacente [Chamorro, 2005].

El ajuste del tiempo de disparo de las diferentes zonas normalmente se hace de la misma manera que se indicó para los sistemas 1×25 kV.

2.4 Localización de faltas a tierra en sistemas ferroviarios de corriente alterna

Como se ha indicado anteriormente, el modo de funcionamiento de los relés de distancia empleados en la detección de faltas de sistemas de alimentación ferroviaria de corriente alterna consiste en obtener el valor del cociente entre la tensión y la corriente vistas desde el relé, es decir la impedancia que el relé observa. Esta impedancia vista por el relé se utiliza, además de para realizar la detección de las faltas que suceden en la línea, para localizar el punto de dicha línea en el que han ocurrido.

2.4.1 Localización de faltas a tierra en sistemas 1×25 kV

En los sistemas de alimentación ferroviaria 1×25 kV, la localización de faltas cuando se produce un cortocircuito entre la catenaria y el carril o cualquier otro conductor unido a tierra, está basada en la relación prácticamente lineal existente entre el módulo de la impedancia vista por el relé de distancia y la distancia desde la subestación a la que está la falta [Millard y otros, 1995], [Pudney y Wales, 2001].

Dicha relación lineal, representada en la figura 2.37 permite que en los sistemas de un solo conductor (1×25kV), los relés de distancia, además de detectar la falta a tierra, calculen con bastante exactitud la distancia a la que ha ocurrido dicha falta y que este método sea el utilizado en estos sistemas para la localización de las faltas que ocurren en la línea.

Figura 2.37: Módulo de la impedancia vista desde la subestación en función de la distancia a la que ha sucedido una falta a tierra en un sistema 1×25 kV

2.4.2 Localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV

En el sistema de alimentación con un conductor positivo, otro negativo y el conductor de tierra (2×25 kV), al igual que en el sistema de un solo conductor y tierra (1×25 kV), la mayoría de las faltas se producen por cortocircuito entre el conductor positivo y tierra o el

conductor negativo y tierra [Weller y Hindle, 1989] [Richards, 1997] [Zhou y otros, 2012]. Sin embargo, los procesos de localización y eliminación de una falta eléctrica son mucho más complicados en los sistemas bifásicos más tierra, al estar unidos en cada subsección los tres conductores mediante autotransformadores [Chen y Hsu, 1998]. La localización de las faltas entre uno de los dos conductores, positivo o negativo y tierra, es el objetivo principal de esta tesis.

Se ha descrito anteriormente que en estos sistemas 2×25 kV, a diferencia de los sistemas 1×25 kV, la relación impedancia-distancia a la falta a tierra desde la subestación no es lineal, tal como se observaba en las figuras 2.35 y 2.36. Dicha falta de linealidad ocurre en diferentes configuraciones del sistema 2×25 kV [Li y Lin, 2012] [Lin y Li, 2010]. No es posible, por ello, deducir la distancia a la que ha ocurrido una falta midiendo el módulo de la impedancia en la subestación porque hay varios puntos en la línea en los que el valor medido es el mismo. En algunos valores de impedancia, puede haber tres puntos con diferente distancia a la subestación que tienen la misma impedancia como se puede constatar en las figuras 2.35 y 2.36 y en algunos casos, incluso, puede haber cuatro distancias a faltas cuyo valor del módulo de la impedancia es el mismo. Ni siquiera es posible establecer con dicha medida de impedancia en qué subsección entre autotransformadores ha ocurrido la falta a tierra ya que el mismo valor puede medirse en distancias a la falta pertenecientes a distintas subsecciones.

Es necesario, por tanto, implementar sistemas de localización que resuelvan esta ambigüedad.

2.4.3 Métodos de localización de faltas a tierra en 2×25 kV

Debido a las dificultades anteriormente expuestas para localizar el punto de la sección eléctrica en que ha ocurrido una falta a tierra, se han utilizado diversos métodos.

El método tradicionalmente más empleado es realizar la localización de la falta mediante la protección de distancia instalada en la subestación utilizando el protocolo descrito a continuación.

Cuando una falta ocurre, el relé de distancia registra una impedancia de valor menor a la de ajuste, enviando una orden de apertura a los interruptores automáticos en la subestación. Con ello se interrumpe el suministro eléctrico en todas las subsecciones y todos los autotransformadores de la sección completa que en condiciones normales se alimentan desde la subestación de tracción. Adicionalmente, se produce una desconexión automática de los autotransformadores debida a que éstos normalmente tienen instalados, además de una protección diferencial y otra de sobreintensidad, una protección de mínima y máxima tensión que los desconecta de la línea al producirse una falta de tensión en dicha línea. También es práctica habitual que se produzca la desconexión de los trenes que se encuentren circulando en la sección, pues éstos suelen llevar también instalados un relé de baja tensión.

Después de un tiempo establecido, se realiza un reenganche de forma automática, cerrándose los interruptores y restableciéndose la alimentación completamente para comprobar si la falta era temporal, volviéndose a la situación normal en ese caso. Si la falta persiste, el relé de distancia abre de nuevo los interruptores y desconecta los autotransformadores mediante unos seccionadores motorizados instalados en la entrada de aquéllos. Seguidamente cierra de nuevo el interruptor, y, al estar ya independizados los circuitos del alimentador positivo de los del negativo, se puede determinar si la falta es de catenaria-tierra, alimentador-tierra o catenaria-alimentador mediante un relé de sobreintensidad adicional que controla la intensidad en las líneas de catenaria y alimentador. Debido a que los autotransformadores de la sección se han desconectado antes del rearme, al producirse éste no circulará ninguna corriente excepto la de falta. Si esta intensidad ocurre únicamente en la catenaria, la falta es catenaria-tierra. Similarmente detecta la falta alimentador-tierra. Si la corriente circula en las dos líneas, será una falta catenaria-alimentador. El ajuste de este relé de sobreintensidad adicional puede hacerse a un nivel más bajo que la intensidad nominal de un tren debido a que los trenes que circulen en esta sección se habrán desconectado antes del rearme. Esta información no se usa para disparar el interruptor (función que realiza la protección a distancia), sino que se comunica a un controlador lógico programable (PLC). Cuando se utiliza este método, se utiliza también el relé de sobreintensidad para despejar de manera inmediata las faltas que suceden en puntos muy cercanos a la subestación [Sezi y Menter, 1999].

Además, es necesario identificar y aislar la subsección en la que la falta ha ocurrido. Para aislar la subsección en falta se emplea la información de dicha falta que aporta el relé de

distancia, en el que, al haber independizado los circuitos de los dos conductores, se obtiene por medio de la impedancia medida la distancia desde la subestación a la falta. Una vez aislada la subsección mediante los correspondientes seccionadores motorizados, se procede a alimentar el resto de las subsecciones que no tienen falta [Agarwal, 2002].

En cuanto al relé de sobreintensidad adicional integrado en las protecciones de la subestación de tracción, suele también tener activada la función de incremento elevado de intensidad en tiempo muy corto para proporcionar más sensibilidad en las faltas de alta impedancia. Asimismo, este relé se utiliza también como respaldo en zona 1 [Han y otros, 2010].

En caso de que, debido a la falta de precisión del cálculo de la distancia a la falta, se aisle una subsección situada a una distancia mayor o menor que la que realmente contiene dicha falta, se produce un alargamiento en el proceso de aislamiento de la subsección en falta. Si este alargamiento en el proceso supera un determinado tiempo, es necesario detener dicho proceso automático y, con la información obtenida, realizar las acciones necesarias para el restablecimiento del suministro eléctrico a la línea tan pronto como sea posible.

Aunque la energía cinética de los trenes permite que sigan circulando sin alimentación durante un cierto tiempo, todas estas operaciones de desconexión, medida y control, y reconexión hacen de este procedimiento un método excesivamente lento que ocasiona que dicha alimentación esté interrumpida más tiempo de lo razonable. Una alternativa para hacer más rápido este proceso se muestra en [Hewings y otros, 2008]. Debido al intenso tráfico que soporta la línea ferroviaria de la costa oeste de Inglaterra era necesario que el tramo que se aislara en caso de falta fuera de pequeña longitud y se hiciera de forma muy rápida con objeto de afectar lo mínimo posible a la circulación fuera de la zona con falta. Para ello se instalaron relés de distancia en todos los autotransformadores y puntos de seccionamiento. El problema de esta solución es que incrementa muchísimo el coste de la protección de la línea ferroviaria.

Otro método de localización de faltas a tierra muy empleado en los sistemas de tracción con autotransformadores en países asiáticos es el “Método de localización mediante la relación de intensidades de neutro en autotransformador” [Fujie y Miura, 1976]. Este método se utilizó por primera vez en la línea ferroviaria japonesa Sanyo Shinkansen, en el tramo entre Okayama y Hakata, y se basa en analizar los valores de intensidad que circulan en la conexión entre el carril unido a tierra y el punto medio de cada autotransformador cuando

ocurre una falta a tierra. De entre todas estas intensidades de neutro en los autotransformadores se busca cuál de ellas es la de más alto valor. Después, se analiza la intensidad de neutro de los dos autotransformadores adyacentes, eligiendo la de mayor valor de los dos. Este autotransformador y el de mayor valor de todos formará la subsección en la que se identifica la falta. Dichos valores de intensidades, que circulan en los puntos intermedios de estos dos autotransformadores, son los que se emplean para localizar la posición de la falta mediante la relación de intensidades de neutro definida como

$$x = \frac{|I_{i+1}|}{|I_i| + |I_{i+1}|} \quad (2.5)$$

Siendo x la distancia por unidad de la subsección en falta medida desde el autotransformador más cercano a la subestación de tracción, $|I_{i+1}|$ la intensidad de neutro en el autotransformador $i+1$ e $|I_i|$ la intensidad de neutro en el autotransformador i . Esta relación, que es aproximadamente lineal, sirve para localizar la posición de la falta.

Sin embargo, al ser la potencia del transformador de la subestación muy diferente de la de los autotransformadores, la corriente de neutro en la subestación tiende a ser mayor que en los autotransformadores, con lo que la identificación de la sección en falta resulta a veces errónea. En particular, esta característica presenta el problema de identificar como subsección en falta la comprendida entre la subestación y el primer autotransformador, cuando en realidad la que está en falta es la comprendida entre el primer y el segundo autotransformador. Para corregir este problema, en [Wang y Yin, 2012] se comparan las corrientes de neutro de los autotransformadores corregidas por un coeficiente.

Asimismo, otra causa de identificación errónea de la subsección en falta proviene de los valores reales de la intensidad de neutro en los autotransformadores de las subsecciones que no están en falta. Aunque idealmente las corrientes de neutro de estos autotransformadores deberían ser nulas, en realidad tienen ciertos valores que hay que tener en cuenta para identificar adecuadamente la subsección en falta. [Wang y Yin, 2012] proponen tener en cuenta para ello la suma de todas las intensidades de neutro a un lado y al otro de la subsección identificada como falta para poder confirmar su identificación.

Para mejorar la precisión de este método en la localización de la distancia a la falta, pero incrementando en gran medida la dificultad y el coste de la instalación de las protecciones, en [Lee y otros, 2006] [Lee y otros, 2009] se propone instalar sensores de la intensidad de

falta en las conexiones que cada kilómetro existen entre los raíles y los cables aéreos de retorno de tierra. Cuando ocurre una falta, se buscan los dos valores de intensidad de falta registrados en los sensores de la sección en falta cuyo valor sea más elevado y que sean contiguos. La sección ha sido determinada por la relación de intensidades de neutro. Una vez obtenidos los valores de los dos sensores con mayor valor, mediante la relación de las intensidades de éstos se obtendrá el punto de falta a tierra.

La localización de faltas mediante ondas progresivas es un método muy empleado en las líneas de distribución de energía eléctrica. Este método también se ha aplicado a las líneas de los sistemas eléctricos de tracción, ayudado por la progresión de los avances en la teoría de propagación de ondas, de la microelectrónica y de las técnicas de procesamiento de datos. Cuando se produce una falta en una línea, se genera una onda progresiva en el punto de falta que se propaga en ambas direcciones a lo largo de la línea a una velocidad cercana a la de la luz. Por tanto, midiendo el tiempo desde que ha ocurrido la falta que tarda la onda en llegar a cada extremo se puede obtener la posición de la falta. Dentro de este método existen diversos tipos de localización de la falta según se realice la detección de la onda progresiva generada por la falta en un extremo o en los dos extremos, y si se realiza mediante la propia onda generada o mediante un impulso inyectado en uno de los extremos cuando ocurre una falta.

Un estudio de localización de faltas en un sistema de tracción eléctrica ferroviaria mediante detección de ondas progresivas en un solo extremo se muestra en [Zhang y otros, 2009]. En dicho estudio se mide el tiempo que transcurre desde que llega a un extremo de la línea la primera onda producida por la ocurrencia de la falta hasta que llega al mismo extremo nuevamente la reflexión de la onda en dicho extremo y en el punto de falta. Para ello utiliza la señal de intensidad de la onda progresiva y un procesador de señal que la convierte en digital y puede ser analizada mediante la transformada de ondículas (wavelet) [Wang y otros, 2002].

Sin embargo, en [Duan y otros, 2010] se considera que la estructura de una línea de tracción ferroviaria es demasiado compleja, debido a bifurcaciones y cargas móviles, para poder obtener de manera precisa los datos de las ondas progresivas reflejadas y refractadas que se utilizan en el método de detección en un solo extremo. Además, se requiere que la velocidad de muestreo del conversor análogo-digital sea elevada y detecte señales muy débiles debido a las diferentes reflexiones. Para evitar estos inconvenientes, propone la localización

de la falta mediante ondas progresivas en los dos extremos de la línea mediante la señal de tensión de las ondas progresivas. Este método necesita dispositivos de adquisición de datos y de sincronización de tiempo (GPS) en los dos extremos de la línea de tracción para poder medir exactamente la diferencia de tiempos en que las ondas progresivas llegan a los dos extremos. Asimismo, necesita una línea de comunicaciones entre dichos extremos para intercambiar la información de los registros que contienen el momento de llegada de las ondas progresivas a cada extremo y así calcular la distancia a la falta.

En [Xia y Wu, 2009] se propone para mejorar la precisión un sistema híbrido de los dos métodos anteriores y del método de detección con inyección de pulso adicional. Este método inyecta, cuando se produce una falta, un pulso de detección de señal en un extremo de la línea y mide la diferencia de tiempos entre la llegada a dicho extremo de la primera y la segunda reflexión, obteniéndose así la distancia a la falta. Para faltas transitorias, el sistema híbrido allí descrito, usa como método principal el método de localización de faltas en un extremo comentado en primer lugar anteriormente, o el de detección en los dos extremos si el tramo está equipado con sistemas GPS para detectar faltas en las dos subestaciones de tracción. Pero si la falta es permanente, utiliza el método de inyección de pulso, empleando para la detección de la llegada de las ondas progresivas la transformada de ondículas (wavelet) como método de proceso de la señal, y el tiempo del módulo máximo de la ondícula como tiempo de llegada de la onda progresiva.

Sin embargo, los métodos de localización de faltas mediante ondas progresivas son de difícil aplicación debido a su limitada fiabilidad, compleja instalación y alto coste económico [Chen y otros, 2009]. Dicha dificultad se agrava a causa de las características específicas de las instalaciones de las líneas eléctricas de tracción ferroviaria con numerosas discontinuidades en la línea de contacto y múltiples cargas cambiando de posición [Guo, 2014].

En [Battistelli y otros, 2008] se analiza un método para análisis de faltas comparando un modelo en el dominio del tiempo en que cada componente está representado por una ecuación diferencial, con otro en el dominio de la frecuencia en que cada elemento está representado por una matriz de impedancias equivalente.

Otro método para la localización de faltas en las líneas de tracción ferroviarias es el propuesto en [Xu y otros, 2013] en donde se describe un método de localización de faltas a

tierra en el dominio de la frecuencia basado en las características de frecuencia del transitorio de falta. A partir del análisis de la impedancia equivalente vista desde el terminal de medida, obtiene la relación entre la distancia a la falta y los puntos extremos del espectro de frecuencias de la impedancia del sistema. Con ello obtiene la localización de la falta por medio de los valores de tensión e intensidad medidos en el terminal de medida de la línea.

Capítulo 3

DESCRIPCIÓN DEL NUEVO MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV

3.1 Introducción

Este nuevo método de localización de faltas a tierra, objetivo de esta tesis doctoral, permite obtener en tiempo real la posición en la que ha ocurrido una falta entre el conductor positivo y tierra o entre el conductor negativo y tierra en una línea ferroviaria con alimentación 2×25 kV. El método consta de dos etapas: La primera consiste en identificar, cuando ocurre una falta a tierra, la subsección entre autotransformadores en que ha sucedido la falta y si ha sido en el conductor positivo o negativo. Dicha identificación se obtiene de manera inmediata por el método de identificación de la subsección y el conductor con falta a tierra en líneas ferroviarias con alimentación eléctrica bifásica con autotransformadores (2×25 kV), que se describe a continuación. En la segunda etapa, los valores de intensidad en los devanados de los autotransformadores obtenidos en el momento de la falta se comparan con los valores de las tablas intensidad-distancia propios de la instalación a proteger previamente almacenados. Esta comparación se realiza teniendo en cuenta la información de la subsección y el conductor en los que ha ocurrido la falta a tierra, obteniéndose así la posición de la sección en que la falta ha tenido lugar.

3.2 Método de identificación de la subsección y el conductor con falta a tierra en líneas 2×25 kV

Se describe en primer lugar el fundamento teórico de este método de identificación. A continuación, su aplicación a secciones eléctricas ferroviarias con tres subsecciones, que son las más frecuentes. Y posteriormente se reseña su extensión a secciones con dos subsecciones, o con n (más de tres) subsecciones.

3.2.1 Fundamento del método

De acuerdo a la distribución teórica de intensidades en el sistema de alimentación 2×25 kV mostrado en la figura 3.1, el ángulo que forman las fases de la intensidad I_{Ai} y la tensión en catenaria V_{Ci} en cada autotransformador es cercano a los 180° en caso de carga resistiva, como se muestra en la figura 3.2a. En ese caso, la inductancia de catenaria (X_L) puede despreciarse.

Sin embargo, en caso de una carga inductiva, el ángulo de fase entre la intensidad y la tensión es cercano a 90° , tal y como se observa en la figura 3.2b.

Al ser el factor de potencia de los trenes de alta velocidad muy cercano a la unidad, la impedancia vista desde el autotransformador es predominantemente resistiva. Por ello, se puede considerar que la distribución de intensidades y tensiones en un sistema 2×25 kV en operación normal es similar al caso de carga resistiva mostrado en la figura 3.2a.

En el momento en que ocurre un cortocircuito entre el conductor positivo (catenaria) y tierra, el comportamiento de la intensidad es similar al que tiene en caso de carga inductiva, ya que la impedancia vista por el autotransformador es la inductancia de catenaria X_L . (Figura 3.2c).

Por tanto, el ángulo entre la intensidad y la tensión en la catenaria en los autotransformadores más cercanos a la falta es de unos 90° , debido a la existencia de intensidades reactivas. En esa situación la potencia del sistema de alimentación 2×25 kV es principalmente reactiva.

Figura 3.1: Diagrama simplificado de un sistema 2×25 kV y su distribución de intensidades en una sección con tres subsecciones

Finalmente, en la figura 3.2d, el caso representado es el de cortocircuito entre el conductor negativo (alimentador) y tierra, y es simétrico del caso anterior. Por lo tanto, el ángulo en este caso entre la intensidad en los autotransformadores más cercanos a la falta y la tensión en catenaria en dichos autotransformadores es de unos 270° .

Además, cuando se produce una falta por cortocircuito entre la catenaria y tierra o entre el alimentador y tierra en un sistema 2×25 kV, se produce un incremento importante en la intensidad que circula por los devanados en los autotransformadores situados a ambos lados de la posición en la sección donde ha ocurrido la falta. Este incremento puede detectarse fácilmente midiendo la intensidad que circula por dichos devanados. Dicho incremento de intensidad, junto con la variación del ángulo de las fases entre la intensidad y la tensión únicamente en los autotransformadores más cercanos al lugar de la falta, son los factores que identifican la subsección y el conductor en que ha ocurrido dicha falta.

a)

b)

Figura 3.2: Distribución teórica de intensidades y tensiones en un sistema 2×25 kV. a): carga resistiva; b): carga inductiva; c): cortocircuito catenaria-tierra; d) cortocircuito alimentador-tierra

3.2.2 Aplicación a secciones con tres subsecciones

En las figuras 3.3 y 3.4 se representa como varían los módulos y fases de la intensidad en los autotransformadores antes y después de ocurrir una falta entre catenaria y tierra en la subsección C. Al ocurrir la falta, el módulo de los fasores de las intensidades I_{A2} e I_{A3} se incrementarán de manera muy notable, mientras que el de la intensidad I_{A1} no sufrirá ninguna variación apreciable al no ser este autotransformador adyacente a la falta.

Figura 3.3: Distribución de intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en un sistema 2×25 kV en operación normal

Asimismo, sucede que los ángulos que forman dichas intensidades I_{A2} e I_{A3} con los ángulos de sus respectivas tensiones, V_{C2} y V_{C3} entre el conductor positivo y tierra, variarán en gran medida al producirse la falta.

Figura 3.4: Distribución de intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en un sistema 2x25 kV en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección C

En este caso, al ser la falta entre el conductor positivo y tierra, el ángulo entre I_{A2} y V_{C2} que en condiciones normales sin falta es de aproximadamente 180° (figura 3.3), se reduce a aproximadamente 90° (figura 3.4).

Igualmente, el ángulo entre I_{A3} y V_{C3} también se reduce a unos 90° desde los aproximadamente 180° que había inicialmente, no variando de forma apreciable el ángulo entre I_{A1} y V_{C1} por no ser este autotransformador adyacente a la falta, como se observa también en la figura 3.4.

En el caso de que la falta fuera en la misma subsección C, pero entre el alimentador negativo y tierra, el ángulo entre I_{A2} y V_{C2} pasaría de 180° a 270° , al igual que el ángulo entre I_{A3} y V_{C3} , mientras que no habría variación entre I_{A1} y V_{C1} (Figura 3.5).

Figura 3.5: Esquemas con las intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en los autotransformadores en caso de una falta alimentador-tierra en la subsección C

Si la falta ocurriera en la subsección B, el incremento de intensidad se produciría en I_{A1} e I_{A2} , mientras que no habría variación importante en I_{A3} . Asimismo, la variación del ángulo se produciría entre I_{A1} y V_{C1} e I_{A2} y V_{C2} , pero no entre I_{A3} y V_{C3} . Dichas variaciones de ángulo también serían de 180° a 90° en caso de falta entre el conductor positivo y tierra (figura 3.6), y de 180° a 270° si la falta es entre el conductor negativo y tierra.

Sin embargo, en caso de que la falta se produjera en la subsección A, solo habría incremento de intensidad en I_{A1} , pero no en I_{A2} ni en I_{A3} . La variación de ángulo, en este caso, sólo se produciría entre I_{A1} y V_{C1} , pero no en el resto de autotransformadores.

Esta variación únicamente en el autotransformador instalado al final de la primera subsección determina precisamente que la falta está en la primera subsección A [Serrano y otros, 2015].

Figura 3.6: Esquemas con las intensidades (I_A) y tensiones (V_C) en los autotransformadores en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección B

3.2.3 Extensión a secciones con n subsecciones

También se puede deducir que, en las instalaciones cuya sección tiene más de dos subsecciones, se podría evitar realizar medición alguna en la estación con autotransformador situada en el extremo de la última subsección (SATS), ya que cuando se produzca el incremento de intensidad y variación del ángulo únicamente en el autotransformador anterior (ATS_{N-1}), significa que la falta es en dicha última subsección n. En la figura 3.7 se representa una sección de más de dos subsecciones.

Esta sección tiene instalados dispositivos para medir la intensidad y el ángulo de ésta con la tensión en todas las estaciones de autotransformador excepto en la final (SATS).

Figura 3.7: Sección de n subsecciones alimentada desde la subestación de tracción (TS) con $n-1$ dispositivos medidores de tensión e intensidad

Este planteamiento se resume de una forma general en la tabla 3.1 para una sección con n subsecciones (cuando n sea mayor de dos). En ella se ve que si la variación del ángulo se produce únicamente en el autotransformador ATSN-1 instalado entre la subsección $n-1$ y la n , se deduce que la falta ha ocurrido en la subsección n . También se observa que, si la variación se produce únicamente en el autotransformador 1, la falta ocurre en la subsección 1, y que cuando se produce la variación en dos autotransformadores es porque la falta se produce en la subsección delimitada por dichos autotransformadores.

En el caso de que la sección sólo tenga dos subsecciones, es también necesario instalar un dispositivo que realice las medidas de tensión e intensidad en la estación de autotransformador final SATS. De esta forma, si hay variación de ángulos en ATS1 solamente, indica que la falta ha ocurrido en la primera subsección, mientras que si ocurre en la segunda subsección, dicha variación se produce tanto en ATS1 como en SATS.

Tabla 3.1: Variación del ángulo entre Ia y Vc en los diferentes autotransformadores en función de la subsección y el conductor en falta

	ATS1	ATS2	ATS3		ATSN-3	ATSN-2	ATSN-1
Falta en conductor positivo subsec. 1	90°	180°	180°	-----	180°	180°	180°
Falta en conductor negativo subsec. 1	270°	180°	180°	-----	180°	180°	180°
Falta en conductor positivo subsec. 2	90°	90°	180°	-----	180°	180°	180°
Falta en conductor negativo subsec. 2	270°	270°	180°	-----	180°	180°	180°
Falta en conductor positivo subsec.3	180°	90°	90°	-----	180°	180°	180°
Falta en conductor negativo subsec. 3	180°	270°	270°	-----	180°	180°	180°
-----	----	-----	----	-----	----	----	----
Falta en conductor positivo subs. n-3	180°	180°	180°	-----	90°	180°	180°
Falta en conductor negativo subs. n-3	180°	180°	180°	-----	270°	180°	180°
Falta en conductor positivo subs. n-2	180°	180°	180°	-----	90°	90°	180°
Falta en conductor negativo subs.n-2	180°	180°	180°	-----	270°	270°	180°
Falta en conductor positivo subs. n-1	180°	180°	180°	-----	180°	90°	90°
Falta en conductor negativo subs. n-1	180°	180°	180°	-----	180°	270°	270°
Falta en conductor positivo subs. n	180°	180°	180°	-----	180°	180°	90°
Falta en conductor negativo subs. n	180°	180°	180°	-----	180°	180°	270°

3.3 Localización de la posición de una falta a tierra en líneas 2×25 kV

Como se ha explicado anteriormente, la última etapa de este nuevo método de localización de la posición de una falta a tierra en líneas ferroviarias 2×25 kV utiliza, además del conocimiento previo de la subsección y el conductor en que ha ocurrido dicha falta a tierra, los valores de los módulos de las intensidades en los diferentes autotransformadores cuando ocurre una falta. El proceso completo de localización de la falta puede resumirse en la forma descrita en la figura 3.8.

Figura 3.8: Resumen del proceso completo del nuevo método de localización de una falta a tierra en sistemas 2×25 kV

En ella se observan los tres pasos necesarios para la obtención del punto en el que ocurre una falta a tierra: la obtención de los datos de intensidad y tensión en los autotransformadores, la identificación de subsección y conductor en falta (primera etapa del método de localización) y la localización de la falta (segunda etapa de dicho método).

Se observa en este diagrama que es necesario tener previamente calculados y almacenados en tablas los datos de la intensidad de los autotransformadores en función de la distancia a la falta cuando éstas ocurren en todas las posiciones de la sección específica en la que se va a efectuar la localización de la falta. Además, es necesario almacenar las tablas, tanto para faltas en catenaria, como para faltas en alimentador negativo [Serrano y otros, 2017].

3.3.1 Distribución característica de las intensidades en autotransformador en caso de falta a tierra

Debido a que los módulos de las intensidades en los autotransformadores tienen un valor determinado en función de la distancia a la subestación de tracción a la que ocurre una falta a tierra, se va en primer lugar a describir como es la corriente de los autotransformadores en función del punto donde se produce la falta. Esta característica es la que se va a emplear para completar la obtención del método de localización de la falta a tierra.

Cuando sucede una falta a tierra en el sistema 2×25 kV, los módulos de las intensidades en los devanados de los autotransformadores siguen un patrón determinado en función de la distancia desde la subestación de tracción a la falta cuando se realizan faltas en todos los puntos a lo largo de una sección. Como ejemplo, se representa en la figura 3.9 una sección en la que se realiza una falta catenaria-tierra.

Dicho patrón de comportamiento de los valores de los módulos de las intensidades se presenta tanto si la falta es entre la catenaria y tierra, como si es entre el alimentador y tierra. Este patrón [Chen y Hsu, 1998] [Noroozi y otros, 2015] es el representado en las figuras 3.10 y 3.11, en las que se muestran las intensidades en los devanados de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS para una típica sección de 30 km con tres subsecciones. Es decir, son los valores de intensidad en función de la distancia al corto desde la subestación de tracción cuando se realizan faltas a tierra en todos los puntos a lo largo de la sección.

En la figura 3.10 se observa la representación de las faltas que ocurren entre catenaria y tierra, mientras que la figura 3.11 es la representación de las faltas que suceden entre alimentador y tierra. La posición de las tres subsecciones A, B y C están representadas en las figuras, siendo A la primera subsección entre 0 y 10 km, B la segunda entre 10 y 20 km, y C la tercera entre 20 y 30 km. La línea I_{A1} muestra los valores de intensidades correspondiente al autotransformador ATS1, I_{A2} al autotransformador ATS2 y I_{A3} al autotransformador SATS.

Figura 3.9: Esquema de una sección de un sistema 2×25 kV en caso de una falta catenaria-tierra en la subsección C

En las figuras 3.10 y 3.11 se pone en evidencia que el valor del módulo de la intensidad en cada autotransformador es máximo cuando la falta ocurre junto al autotransformador correspondiente. Estos valores máximos, como es lógico, son mayores cuanto más cercano está el autotransformador a la subestación de tracción. La intensidad del devanado del primer autotransformador, I_{A1} , crece progresivamente hasta alcanzar su máximo en el punto donde se encuentra dicho elemento autotransformador ATS1, descendiendo desde entonces hasta alcanzar su valor mínimo.

Figura 3.10: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto. Falta catenaria – tierra

Figura 3.11: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto. Falta alimentador - tierra

Por otro lado, la intensidad I_{A2} , del autotransformador ATS2, crece en la segunda subsección, B, alcanzando su máximo en el km 20 que es donde se encuentra dicho autotransformador. Desde ese punto, decrece hasta alcanzar el final de la línea estudiada. Finalmente, la intensidad en el devanado del tercer autotransformador, I_{A3} , crece en la tercera subsección, C, hasta alcanzar su máximo en el kilómetro 30 que es donde se encuentra este autotransformador.

Asimismo, en la figura 3.10 se muestra que la intensidad de cada autotransformador se iguala con la del autotransformador adyacente en un punto situado aproximadamente en la mitad de la subsección delimitada por dichos autotransformadores. Estas características ocurren tanto cuando la falta es entre catenaria y rail como cuando es entre alimentador y rail, como también se puede observar en la figura 3.11.

3.3.2 Método de localización de faltas a tierra en 2×25 kV

Como ya se ha descrito, al producirse una falta entre uno de los conductores y tierra, se produce un incremento importante de los valores del módulo de la intensidad en los devanados de los autotransformadores más cercanos al punto donde ha ocurrido la falta, valores que puede ser leídos y analizados por un dispositivo de control. Este dispositivo, además de la información de dichos valores de los módulos de las intensidades en los devanados de los autotransformadores, recibe también, mediante el método descrito en el apartado 3.2, la información relativa al conductor (catenaria o alimentador) y la subsección A, B o C en que ha ocurrido la falta. Entonces, el dispositivo de control buscará dentro de las tablas almacenadas en su memoria los valores iguales a los de las intensidades recibidos en la tabla correspondiente al conductor y subsección en falta. Estas tablas, que constan del valor del módulo de la intensidad y posición por cada elemento, se habrán almacenado previamente en el dispositivo de control con los valores particulares obtenidos de las intensidades de los autotransformadores cuando se produce un cortocircuito entre uno de los conductores y tierra a lo largo todos los puntos de la sección eléctrica en la que aquéllos están instalados.

Como se puede observar en las figuras 3.10 y 3.11, en las líneas I_{A1} e I_{A2} correspondientes a las tablas con los valores de la intensidad en el autotransformador más cercano a la

subestación y en el intermedio, el mismo valor de la intensidad se obtiene para dos distancias diferentes de la subestación en cada una de dichas líneas. Además, este valor de intensidad corresponde a diferente distancia en caso de que la falta sea conductor positivo-tierra o conductor negativo-tierra. Por lo tanto, es fundamental conocer el conductor y la subsección en que ha ocurrido la falta para determinar de manera unívoca el valor de la distancia correspondiente al valor leído de las intensidades.

En la figura 3.12 se muestra un diagrama de flujo del proceso completo de localización en el que se reflejan con detalle los 3 pasos descritos en la figura 3.8. Conociendo el conductor y la subsección en que ha ocurrido la falta, el dispositivo de control obtendrá la posición de la falta mediante el siguiente procedimiento:

Si la subsección en falta es la primera (A, que se extiende en el circuito de esta simulación entre los km 0 y 10 de la sección), buscará el valor de la posición en falta mediante el valor de intensidad obtenido del autotransformador más cercano a la subestación. Con este valor, I_{R1} , buscará el mismo valor de la tabla en memoria correspondiente a la representada en la línea I_{A1} y al conductor positivo o negativo en falta dentro de la subsección A.

Si la subsección en falta es la B (la segunda subsección, que se sitúa entre el km 10 y el 20), el calculador comparará el valor leído de las intensidades del autotransformador más cercano a la subestación, I_{R1} , y del autotransformador intermedio, I_{R2} . Si es mayor la de aquél, determinará que la falta ocurrió en la primera mitad de la subsección B, y, para conseguir mayor precisión, determinará la posición cuando el valor de la intensidad leído en el autotransformador más cercano a la estación, I_{R1} , iguale al valor correspondiente en la línea I_{A1} dentro de la subsección B y de la tabla correspondiente al conductor positivo o negativo en falta. Por el contrario, si es mayor la intensidad I_{R2} medida en el autotransformador intermedio, la falta ocurrió en la segunda mitad de la subsección B, y, también para conseguir mayor precisión, se igualará el valor leído en el autotransformador intermedio, I_{R2} , con el correspondiente de la línea I_{A2} dentro de la subsección B y de la tabla que corresponde al conductor positivo o negativo en falta, para determinar la distancia a la subestación a la que ha ocurrido la falta.

Asimismo, si la subsección en falta es la C (la tercera, entre el km 20 y el 30), se compararán las intensidades del autotransformador intermedio I_{R2} y del autotransformador más alejado de la subestación I_{R3} . Si aquélla es mayor, la falta habrá ocurrido en la primera mitad de la

subsección C y la intensidad leída en el autotransformador intermedio, I_{R2} , se comparará con la línea I_{A2} dentro de la subsección C de la tabla de faltas en el conductor positivo o negativo obtenido previamente, para determinar la posición de falta. Si por el contrario es mayor la intensidad del autotransformador más alejado, I_{R3} , será este valor el que se iguale al correspondiente de la línea I_{A3} en la subsección C y tabla de conductor adecuado para obtener la distancia de la falta a la subestación.

Como es lógico, si ocurre que siendo la falta en la subsección B, las intensidades leídas en los dos autotransformadores correspondientes I_{R1} e I_{R2} son iguales, se obtendría la misma posición de falta comparando el valor obtenido de cualquiera de estos dos autotransformadores con el valor correspondiente de la tabla que tiene el calculador en memoria.

Asimismo, en caso de que la falta sea en la subsección C y las intensidades leídas en los dos autotransformadores I_{R2} e I_{R3} sean iguales, la comparación de la intensidad leída se puede hacer con cualquiera de las tablas en memoria correspondientes de estos dos autotransformadores.

Tal y como se describe en el siguiente capítulo, este método se ha simulado mediante ordenador con programas realizados con el software MATLAB® resolviendo mediante el método de análisis nodal modificado el circuito equivalente al representado en la figura 3.9. En dichos programas se introducen como datos de entrada la subsección y el conductor en falta, así como los valores I_{R1} , I_{R2} e I_{R3} de las intensidades en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en el momento de la falta, obteniéndose la posición de dicha falta de las tablas previamente grabadas en la memoria del ordenador, que contienen la intensidad de cada autotransformador en función de la distancia cada 0,1 km. Para ello, en el programa de ordenador se comparan los valores de las intensidades de entrada de los autotransformadores, I_R , con los valores de las intensidades almacenados en memoria de la tabla correspondiente de acuerdo a este nuevo método de localización de faltas a tierra. De la tabla de intensidad-distancia grabada en la memoria, se obtiene el resultado de la distancia de la falta a tierra desde la subestación.

Figura 3.12: Diagrama de flujo del método de localización de faltas a tierra

3.3.3 Extensión del método de localización para secciones con n subsecciones

El método descrito también es válido para cualquier sección que tenga dos o más subsecciones, ya que el patrón que siguen los valores de los módulos de las intensidades en dichos casos son totalmente similares a los que tienen en las secciones con tres subsecciones.

3.3.3.1 Análisis del método de localización para secciones 2×25 kV con dos subsecciones

En la figura 3.13 están representados los valores del módulo de la intensidad en función de la distancia al corto entre catenaria y tierra en una sección con dos subsecciones. Como se puede observar en dicha figura, en una sección con dos subsecciones también el valor máximo del módulo de la intensidad en cada autotransformador es máximo cuando la falta ocurre junto al autotransformador correspondiente, y es mayor cuanto más cercano está el autotransformador a la subestación de tracción. La intensidad del devanado del primer autotransformador, I_{A1} , crece progresivamente hasta alcanzar su máximo en el punto donde se encuentra dicho elemento autotransformador ATS1, descendiendo desde entonces hasta alcanzar su valor mínimo. Asimismo, la intensidad en el devanado del autotransformador más alejado, I_{A2} , crece en la última subsección, hasta alcanzar su máximo en el kilómetro 20 que es donde se encuentra este autotransformador.

De forma similar que en el caso de la sección con tres subsecciones, la intensidad del autotransformador ATS1 se iguala con la del autotransformador final SATS en un punto situado aproximadamente en la mitad de la subsección delimitada por dichos autotransformadores. Todas estas características ocurren tanto cuando la falta es entre catenaria y rail, como también cuando es entre alimentador y rail como se puede observar en la figura 3.14.

Figura 3.13: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con dos subsecciones. Falta catenaria - tierra

Figura 3.14: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con dos subsecciones. Falta alimentador - tierra

3.3.3.2 Análisis del método de localización para secciones 2×25 kV con cuatro subsecciones

Los valores del módulo de la intensidad en función de la distancia de la falta a la subestación en una sección con cuatro subsecciones están representados en las figuras 3.15 y 3.16, tanto para faltas entre catenaria y tierra como para faltas entre alimentador y tierra.

Como se puede apreciar en dichas figuras 3.15 y 3.16, el esquema de intensidades en una sección con cuatro subsecciones sigue el mismo patrón que con dos o tres subsecciones. Aquí también el valor del módulo de la intensidad en cada autotransformador es máximo cuando la falta ocurre junto al autotransformador correspondiente, y es mayor cuanto más cercano está el autotransformador a la subestación de tracción. También el crecimiento y disminución de las intensidades de cada autotransformador en función de la distancia sigue las mismas pautas que con dos o tres subsecciones y los valores de las intensidades de dos autotransformadores adyacentes se igualan en un punto cercano a la mitad de la subsección.

Figura 3.15: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con cuatro subsecciones. Falta catenaria - tierra

Figura 3.16: Intensidades en los autotransformadores en función del punto de defecto en una sección con cuatro subsecciones. Falta alimentador - tierra

De todo este análisis se puede deducir que este método de localización de faltas es aplicable a cualquier sección con dos o más subsecciones.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se ha descrito un nuevo método propuesto para la localización de faltas a tierra en una línea ferroviaria con alimentación 2×25 kV, el cual permite obtener en tiempo real la posición en la que ha ocurrido una falta entre el conductor positivo y tierra o entre el conductor negativo y tierra. Se han explicado en el capítulo las dos etapas que componen el método. La primera, de identificación del conductor y la subsección entre autotransformadores en que ha sucedido la falta a partir de los valores de intensidad en los autotransformadores y del ángulo que forman con los valores de tensión en catenaria en la conexión con esos autotransformadores. Y la segunda, de comparación de los valores de intensidad en los devanados de los autotransformadores obtenidos en el momento de la falta

con los valores de las tablas intensidad-distancia de la sección a proteger, previamente almacenados, teniendo en cuenta la información obtenida en la primera etapa.

También se ha detallado un esquema con el resumen de los pasos a realizar en la práctica cuando ocurre una falta: obtención de los valores de intensidad y tensión en módulo y ángulo en los autotransformadores, identificación de subsección y conductor a partir de los datos del paso precedente, y localización del punto de falta a tierra una vez conocidos todos los datos de los pasos anteriores.

Aunque en principio se ha definido el método para una sección con tres subsecciones, en el capítulo se ha hecho el análisis para secciones con dos y cuatro subsecciones, viéndose que es aplicable a secciones con n subsecciones.

Capítulo 4

SIMULACIÓN EN ORDENADOR DEL NUEVO MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV

4.1 Introducción

Este método de localización de faltas a tierra, descrito en el capítulo anterior, ha sido desarrollado mediante numerosas simulaciones por ordenador. Para llevar a cabo dichas simulaciones, se han realizado numerosos programas que analizan profundamente dicho método usando el software de programación de MATLAB®. Para conseguir tal propósito, se utilizó el circuito de la figura 4.1, que se resolvió mediante el método de análisis de circuitos nodal modificado [Wedepohl y Jackson, 2002] [Pastor y otros, 2003].

Figura 4.1: Diagrama del circuito utilizado para realizar la simulación de un sistema 2 x 25 kV en una sección con tres subsecciones

El circuito, que representa una sección con longitud 30 km de un sistema 2x25 kV, está alimentado desde un extremo con dos fuentes de corriente alterna de 27,5 kV cada una en contrafase, y consta de tres subsecciones A, B y C con una longitud de 10 km cada una.

4.1.1 Datos para la simulación

Para obtener unos valores adecuados de las impedancias por unidad de longitud de la catenaria Z_C , del alimentador negativo Z_F y del carril unido a tierra Z_R , así como los valores de las impedancias mutuas entre dichos conductores Z_{CR} , Z_{FR} y Z_{CF} se realizó un modelo con el programa ATP con la geometría de vía de 5 conductores representada en la figura 4.2 [Caires, 2014].

Figura 4.2: Configuración de vía para el modelo, calculado mediante el programa ATP

En dicho modelo se emplearon como valores de resistencia por unidad de longitud los valores representados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores de resistencia de los conductores en un sistema 2 x 25 kV por unidad de longitud

Conductor	Resistencia Ω/km
Cable de contacto (C.C.)	0,115
Cable portador (C.P.)	0,172
Alimentador negativo (A.N.)	0,062
Conductor de tierra aéreo (C.T.A.)	0,119
Carril	0,026

Con estos datos incorporados al modelo ATP, se obtuvieron los valores de impedancia propias y mutuas por unidad de longitud mostrados en la tabla 4.2.

En el circuito de simulación, el transformador de la subestación principal tiene una potencia nominal de 60 MVA y una impedancia de cortocircuito del 10%. La potencia nominal de los autotransformadores empleados fue de 15 MVA y se consideraron ideales por ser de muy baja impedancia (del orden del 1%).

Asimismo, la potencia de cortocircuito de la red se consideró infinita, ya que se calculó que las variaciones de dicha potencia sólo implicaban una variación de aproximadamente un 1% en los resultados. Para ello se consideraron potencias de cortocircuito entre 5.000 y 40.000 MVA, correspondientes a redes de 220 kV y 400 kV, aunque el valor de la tensión asignada de la red de alimentación no se tiene en cuenta en el modelo.

Tabla 4.2: Valores de impedancias propias y mutuas de los conductores del sistema 2×25 kV por unidad de longitud

Conductor		Impedancias propias Ω/km
Catenaria	Z_C	0,1197+j0,6224
Alimentador negativo	Z_F	0,1114+j0,7389
Carril	Z_R	0,0637+j0,5209
Conductores		Impedancias mutuas Ω/km
Catenaria-Alimentador	Z_{CF}	0,0480+j0,3401
Catenaria-Carril	Z_{CR}	0,0491+j0,3222
Alimentador-Carril	Z_{FR}	0,0488+j0,2988

4.1.2 Esquema para la simulación

Los datos obtenidos, y reflejados en la tabla 4.2, se aplicaron a un circuito equivalente al circuito de la figura 4.1, que es el reflejado en la figura 4.3.

En él están representados los nudos y las ramas empleados para aplicar el método de análisis de circuitos nodal modificado. Mediante MATLAB, se resolvió el circuito basándose en dicho método, y realizándose simulaciones de cortocircuitos a lo largo de todos los puntos de las tres subsecciones A, B, y C de la sección de 30 km con intervalos de 0,1 km. Estos cortocircuitos se efectuaron, tanto entre el conductor positivo o catenaria y el carril unido a tierra, como es el ejemplo de cortocircuito que se muestra en la figura 4.1, como entre el conductor negativo o alimentador y el carril unido a tierra.

Figura 4.3: Esquema del circuito utilizado para realizar la simulación mediante el método nodal modificado en una sección con tres subsecciones

Para conseguir la resolución del circuito simulando las faltas, los cortocircuitos catenaria-tierra se hicieron uniendo con una rama sin resistencia los nodos C y E en la primera subsección, los I y K en la segunda subsección y los P y S en la tercera subsección. De igual manera, las faltas alimentador-tierra se hicieron uniendo los nodos D y E en la subsección primera, los J y K en la segunda y los R y S en la tercera.

Para simular la posición de la falta dentro de la primera subsección se fue incrementando la longitud de las ramas 1 y 3, y disminuyendo la de las ramas 4 y 6. Para conseguirlo en la subsección segunda, se realizó el mismo proceso con las ramas 7 y 9 y las ramas 10 y 12, y en la subsección tercera con las ramas 13 y 15 y las ramas 16 y 18. Del mismo modo, las faltas entre alimentador y tierra se hicieron modificando la longitud de las ramas 2 y 3 y las ramas 5 y 6 en la primera subsección, de las ramas 8 y 9 y las ramas 11 y 12 en la segunda subsección y de las ramas 14 y 15 y las ramas 17 y 18 en la tercera subsección.

4.2 Simulación de la impedancia vista desde la subestación en función de la distancia a la que ocurren las faltas

Tal y como se ha descrito en capítulos anteriores, la principal protección en los sistemas ferroviarios de corriente alterna es la protección de distancia. En dicha protección se utilizan los relés de distancia, que normalmente instalados en la subestación de tracción, realizan la división vectorial entre la tensión y la corriente de alimentación de la línea para obtener su impedancia cuando ocurre una falta, y en función de esta impedancia tomar las acciones de protección adecuadas. Asimismo, se indicó en el apartado 2.4 (localización de faltas) que esta protección, que es la forma de localización de faltas más extendida en los sistemas de tracción de un solo conductor (1 x 25 kV), no se puede aplicar a la localización de faltas en los sistemas 2 x 25 kV. Esto es debido a la no linealidad de la impedancia en función de la distancia desde la subestación de tracción a la falta. Esta no linealidad se ha simulado en el ordenador con el circuito de la figura 4.3, y se muestra el resultado del módulo de la impedancia en función de la distancia en la figura 4.4 cuando la falta es entre catenaria y tierra. La impedancia calculada es la relación entre la tensión en catenaria en la subestación y la suma algebraica de las intensidades en catenaria y alimentador a la salida de la subestación.

Asimismo, se hizo la simulación de la impedancia en subestación en función de la distancia a la falta en caso de que ésta fuera entre el alimentador y tierra. El resultado se puede observar en la figura 4.5. También en este caso la impedancia calculada es la relación entre la tensión en catenaria en la subestación y la suma algebraica de las intensidades en catenaria y alimentador. En dicha figura 4.5 se puede constatar de nuevo la falta de relación lineal entre la impedancia y la distancia desde la subestación al punto donde se produce la falta.

Figura 4.4: Impedancia en función de la distancia. Faltas entre catenaria y tierra

Figura 4.5: Impedancia en función de la distancia. Faltas entre alimentador y tierra

4.3 Simulación del Método de identificación de la subsección y el conductor con falta a tierra en líneas 2x25 kV

De acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior, el método propuesto de localización de faltas a tierra consta de dos etapas, siendo la primera de ellas el método de identificación de la subsección entre autotransformadores en que ha sucedido una falta a tierra y si ha sido en el conductor positivo o negativo. Dicha identificación se obtiene mediante la medida del ángulo que forma la intensidad y la tensión en cada uno de los autotransformadores cuando aquéllas ocurren.

El paso inicial del proceso es, por tanto, la obtención de los ángulos que forman la intensidad en los devanados de los autotransformadores I_A con la tensión existente en las conexiones de dichos autotransformadores a la catenaria V_c cuando se producen faltas a tierra a lo largo de todos los puntos de la sección. La comprobación de estos ángulos se ha llevado a cabo mediante la simulación de faltas entre catenaria y tierra y entre alimentador y tierra en todos los puntos de las tres subsecciones del circuito de la figura 4.3.

Los valores obtenidos de los ángulos entre la intensidad I_A y la tensión V_c en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia a la falta, entre el conductor positivo y tierra, desde la subestación, se representan en la figura 4.6, cuyo eje de abscisas está graduado de 0 a 30 km y el de ordenadas de 0 a 360°. Se puede observar que si la falta ha ocurrido en la subsección A (primeros 10 km), el ángulo que forma la intensidad con la tensión en ATS1 es de aproximadamente 90°, mientras que en ATS2 y SATS el ángulo es de 180°. Asimismo, si la falta es en la subsección B (entre 10 y 20 km), el ángulo será de unos 90° en ATS1 y ATS2, mientras que en SATS es de 180°. También se observa que si la falta es en la subsección C (entre 20 y 30 km), el ángulo es de unos 90° en ATS2 y SATS, mientras que en ATS1 es de unos 180°. Es decir, el ángulo que forman la intensidad y la tensión en los autotransformadores más cercanos a la falta es de aproximadamente 90°.

Figura 4.6: Ángulo entre I_A y V_C en los diferentes autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra

En caso de que la falta sea entre el conductor negativo y tierra, tal como se preveía en el estudio teórico, los resultados son similares con la excepción de que los ángulos entre I_A y V_C son de 270° en vez de 90° , tal como se observa en la figura 4.7.

Se puede observar en dicha figura 4.7 que la variación de los ángulos entre I_A y V_C en función de la distancia a la falta desde la subestación se produce de la misma manera que ocurría en el caso de faltas catenaria-tierra, pero ahora con valores de aproximadamente 270° . Es decir, el ángulo que forman la intensidad y la tensión en los autotransformadores más cercanos a la falta es de alrededor de 270° con faltas alimentador-tierra.

Estas simulaciones confirman el estudio teórico descrito en el capítulo anterior, y generalizado para una sección con n subsecciones en la tabla 3.1. Se produce una variación del ángulo entre la intensidad en el devanado del autotransformador y la tensión en el punto

de contacto con la catenaria únicamente en los autotransformadores adyacentes al punto de falta. Variación de ángulo que será negativa si la falta se produce entre el conductor positivo y tierra, y que será positiva si la falta se produce entre el alimentador negativo y tierra.

Figura 4.7: Ángulo entre I_A y V_C en los diferentes autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor negativo-tierra

4.4 Simulación de la localización de la posición de las faltas a tierra en sistemas de alimentación 2 x 25 kV

Como ya se describió anteriormente en el capítulo 3, la segunda etapa de este método de localización de la posición de una falta a tierra en líneas ferroviarias 2 x 25 kV utiliza los valores de los módulos de las intensidades en los diferentes autotransformadores cuando ocurre una falta. Asimismo, se describió que los valores de dichos módulos siguen un patrón

determinado en función de la distancia a la subestación de tracción a la que ocurre una falta a tierra, características que después se empleaban para obtener la localización de dicha falta.

Para realizar las simulaciones por ordenador de estos valores de los módulos de los autotransformadores, se utilizó el mismo circuito de una sección eléctrica que se representó en la figura 4.1 y que se implementó mediante la resolución del esquema mostrado en la figura 4.3. También se emplearon los mismos valores de tensiones de alimentación e impedancias de línea que se han descrito en el apartado 4.1.1.

Dicho circuito se ha resuelto realizando cortocircuitos entre conductor y tierra en todas las posiciones de las tres subsecciones que componen la sección. Estos cortocircuitos se realizaron de la misma forma que se describe en el apartado 4.1.2, y con intervalos de 0,1 km a lo largo de los 30 km de la sección. De esta manera, se han obtenido los valores de los módulos de las intensidades en los autotransformadores cuando hay faltas catenaria- tierra en todos los puntos de la sección, tal y como se representa en la figura 4.8.

Figura 4.8: Valores de intensidad en los arrollamientos de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección en caso de falta catenaria-raíl

Asimismo, cuando el cortocircuito es entre alimentador negativo y raíl, los resultados están representados en la figura 4.9. La figura 4.8 es la representación de los valores de las intensidades I_{A1} , I_{A2} y I_{A3} en caso de falta catenaria-tierra y la figura 4.9 muestra dichas intensidades cuando la falta es alimentador-tierra.

Como se puede observar, los valores obtenidos confirman el patrón de la distribución de intensidades en función de la distancia descrito en el capítulo anterior y representado en las figuras 3-10 y 3-11. Estos valores de las tablas intensidad-distancia almacenados en la memoria del dispositivo de control serán los valores de referencia para obtener la posición de la falta al confrontar con ellos los valores de intensidad leídos en el momento de la falta, tal como se describe en el capítulo anterior. La simulación de este proceso de localización también se realizó mediante ordenador, al introducir como valores de entrada en el programa unos determinados valores de intensidades de los autotransformadores, la sección A, B o C y el conductor en que había ocurrido la falta, dando como resultado el valor de distancia a la subestación en kilómetros y metros a la falta.

Figura 4.9: Valores de intensidad en los arrollamientos de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección en caso de falta alimentador-raíl

4.5 Simulación de la generalización del método de localización de la posición de faltas a tierra a secciones con n subsecciones

Tanto al describir el método de identificación de la subsección y el conductor en falta a tierra como al describir la obtención de la posición de dicha falta, se explicó que, aunque el estudio inicial se había hecho sobre una sección con tres subsecciones, el método de localización de faltas a tierra era válido para secciones con n subsecciones. Para comprobarlo, se ha realizado la simulación de obtención de los ángulos entre intensidades y tensiones en los autotransformadores y de los valores de intensidades en función de la distancia a la falta para secciones con dos y cuatro subsecciones.

4.5.1 Simulación de faltas a tierra en secciones con dos subsecciones

En la figura 4.10 se muestra el esquema que representa una sección con dos subsecciones.

Figura 4.10: Esquema utilizado para realizar la simulación de un sistema 2×25 kV en una sección con dos subsecciones

Con este esquema se ha realizado la simulación para obtener los ángulos entre intensidades y tensiones en los autotransformadores y los valores de los módulos de las intensidades en ellos en función de la distancia de la subestación a las faltas a tierra.

En la figura 4.11 se puede observar la distribución de ángulos entre I_{A1} y V_{C1} e I_{A2} y V_{C2} en función de la distancia a la falta en caso de falta catenaria-tierra.

Figura 4.11: Ángulo entre I_A y V_C en los dos autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra

Asimismo, en la figura 4.12 se muestran los valores de los módulos de la intensidad I_{A1} e I_{A2} en los dos autotransformadores también en caso de falta catenaria-tierra en función de la distancia de la falta a la subestación.

Figura 4.12: Valores de intensidad en los autotransformadores AT1 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción en caso de falta catenaria-raíl

Si la falta fuera alimentador-tierra, los valores de los ángulos entre intensidades y tensiones en los dos autotransformadores en función de la distancia a la falta se muestran en la figura 4.13.

De la misma manera, en la figura 4.14 se han obtenido los valores de los módulos de la intensidad I_{A1} e I_{A2} en los dos autotransformadores también en caso de falta alimentador negativo-tierra en función de la distancia de la falta a la subestación.

Figura 4.13: Ángulo entre I_A y V_C en los dos autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor negativo-tierra

Figura 4.14: Valores de intensidad en los autotransformadores AT1 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción en caso de falta alimentador-raíl

4.5.2 Simulación de faltas a tierra en secciones con cuatro subsecciones

En la figura 4.15 se puede observar el esquema que representa una sección con cuatro subsecciones. Resolviendo con el método nodal modificado también este esquema, se ha realizado la simulación para obtener los ángulos entre intensidades y tensiones en los autotransformadores y los valores de las intensidades en ellos en función de la distancia a las faltas, tanto para faltas catenaria-tierra como para faltas alimentador-tierra.

Figura 4.15: Esquema utilizado para realizar la simulación de un sistema 2 x 25 kV en una sección con cuatro subsecciones

En la figura 4.16 se muestra la distribución de ángulos entre I_{A1} y V_{C1} , I_{A2} y V_{C2} , I_{A3} y V_{C3} e I_{A4} y V_{C4} en función de la distancia a la falta en caso de falta catenaria-tierra.

Figura 4.16: Ángulo entre I_A y V_C en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra

Asimismo, en la figura 4.17 se han obtenido los valores de los módulos de la intensidad I_{A1} , I_{A2} , I_{A3} e I_{A4} en los cuatro autotransformadores también en caso de falta catenaria-tierra en función de la distancia de la falta a la subestación.

Figura 4.17: Valores de los módulos de intensidad en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta conductor positivo-tierra

Cuando las faltas son entre alimentador negativo y tierra, el comportamiento de los ángulos y los módulos de las intensidades en los autotransformadores también sigue el mismo patrón que tiene para secciones con dos o tres subsecciones. La distribución de ángulos obtenida entre I_{A1} y V_{C1} , I_{A2} y V_{C2} , I_{A3} y V_{C3} e I_{A4} y V_{C4} en función de la distancia a la falta en caso de falta alimentador-tierra está reflejada en la figura 4.18.

Figura 4.18: Ángulo entre I_A y V_C en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta alimentador negativo-tierra

De manera similar, en la figura 4.19 se muestran los valores resultantes de los módulos de intensidad I_{A1} , I_{A2} , I_{A3} e I_{A4} en los cuatro autotransformadores también en caso de falta alimentador negativo-tierra en función de la distancia de la falta a la subestación.

Figura 4.19: Valores de los módulos de intensidad en los cuatro autotransformadores en función de la distancia a la falta desde la subestación, en caso de falta alimentador-tierra

De los resultados mostrados en las figuras se observa una total similitud en el comportamiento de ángulos e intensidades en los autotransformadores cuando las secciones tienen dos, tres o cuatro subsecciones. Por tanto, podemos concluir que este método de localización de faltas a tierra es aplicable a cualquier sección con n (dos o más) subsecciones.

4.6 Simulación de la influencia de la potencia consumida por los trenes de alta velocidad sobre el método de localización de faltas a tierra

Para estudiar las variaciones que experimentan los ángulos entre la intensidad y la tensión y los módulos de la intensidad en los autotransformadores cuando ocurren faltas a tierra en una sección en la que están los trenes circulando, y por tanto demandan potencia, se han

realizado simulaciones modificando el circuito de la figura 4.1 en la forma representada en la figura 4.20.

Figura 4.20: Representación del circuito utilizado para realizar la simulación de la influencia del consumo por circulación de trenes en los ángulos entre intensidades y tensiones y en los módulos de intensidad en los autotransformadores

En este circuito se han añadido fuentes de corriente I entre catenaria y carril para simular trenes circulando en diferentes posiciones de la sección de la línea ferroviaria. En la figura 4.20 se representa un tren circulando en el punto medio de la subsección B. El valor de intensidad asignado a la fuente de corriente fue de 616 A, calculado para un tren de composición doble con una potencia de 16 MW con un factor de potencia de 0,95 y situado en el punto medio de la primera subsección. Este valor no tiene gran influencia sobre el método en la realidad, ya que al producirse la falta a tierra la tensión entre catenaria y tierra descenderá, y los trenes tienen instalado un interruptor automático que desconecta su alimentación de la catenaria cuando la tensión en ésta es menor que un determinado umbral.

4.6.1 Simulación de la influencia del consumo de los trenes sobre los ángulos intensidad-tensión

Con la inclusión de las fuentes de intensidad en las diferentes subsecciones reproduciendo la circulación de los trenes, numerosas simulaciones se realizaron con faltas a lo largo de toda la sección para obtener los ángulos entre intensidad y tensión en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS, mostrándose a continuación varios ejemplos de los resultados obtenidos. En la figura 4.21 se representan dichos ángulos con un tren circulando en el punto medio de la subsección A con faltas entre catenaria y tierra.

Figura 4.21: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Tren en el punto medio de la subsección A

Los valores de los ángulos con un tren circulando en dicha subsección A cuando se realizan faltas entre alimentador negativo y tierra se muestran en la figura 4.22.

Figura 4.22: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador y tierra. Tren en el punto medio de la subsección A

Asimismo en la figura 4.23 se muestran los ángulos I_A-V_C para faltas entre catenaria y tierra con un tren en el punto medio de la subsección B.

Figura 4.23: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Tren en el punto medio de la subsección B

Cuando la falta es entre alimentador negativo y tierra circulando un tren en el punto medio de la subsección C, los ángulos I_A-V_C en función de la distancia de la falta a la subestación se pueden observar en la figura 4.24.

Figura 4.24: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador negativo y tierra. Tren en el punto medio de la subsección C

También se ha realizado la simulación para el caso en que hubiera dos trenes circulando en la sección. En la figura 4.25 podemos ver los datos de los ángulos en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra en caso de que hubiera un tren circulando en el punto medio de la subsección A, y otro circulando en el punto medio de la subsección B.

Figura 4.25: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre catenaria y tierra. Dos trenes, uno circulando en el punto medio de la subsección A y el otro circulando en el punto medio de la subsección B

Y en el caso de que la falta fuera entre alimentador y tierra, en la figura 4.26 se puede ver como quedarían los ángulos estando dos trenes consumiendo intensidad, uno en el punto medio de la subsección A y otro en el punto medio de la subsección C.

A la vista de estos resultados se puede decir que la influencia de la circulación de trenes sobre los ángulos en que está basado el método de identificación de subsección y conductor aquí expuesto es pequeña. Solamente, cuando la falta a tierra se produce en los puntos cercanos a los autotransformadores, en algún caso se puede observar que se produce una ligera desviación sobre el teórico decremento de 90° si la falta es catenaria-rail o sobre el teórico incremento de 90° en caso de falta alimentador-tierra. Dicha ligera desviación no es un obstáculo importante para el funcionamiento de este método de identificación de la subsección en que ha ocurrido la falta, ya que, como se describirá mas adelante, el método se implementa mediante relés direccionales de sobreintensidad en los que se ajusta el ángulo

de disparo con un margen de aproximadamente $\pm 30^\circ$, aunque este valor se fija en función de las necesidades de cada sección eléctrica en particular en que se realice la instalación.

Figura 4.26: Ángulo entre I_A y V_C en ATS1, ATS2, y SATS en función de la distancia a la falta entre alimentador negativo y tierra. Dos trenes, uno circulando en el punto medio de las subsección A y el otro circulando en el punto medio de la subsección C

4.6.2 Simulación de la influencia del consumo de los trenes sobre los módulos de la intensidad en los autotransformadores

Para estudiar también la influencia de la circulación de los trenes sobre la segunda etapa del método de localización de faltas a tierra, que se basa en los valores de los módulos de intensidades en los autotransformadores, de la misma manera que se describió en la figura 4.20 se han incluido igualmente fuentes de intensidad entre catenaria y tierra en el circuito de simulación. El método para estudiar la influencia de los trenes sobre las intensidades en los autotransformadores es igual que el que se hizo para simular su influencia sobre los ángulos intensidad-tensión en los autotransformadores. Con estas fuentes de intensidad

situadas en las diversas subsecciones simulando la circulación de trenes en diferentes puntos de la sección, se resolvió nuevamente el circuito de la figura 4.20, obteniéndose las gráficas de la figura 4.27. En ella se muestra la variación de los valores de la intensidad en los autotransformadores en función de la distancia a la falta en caso de faltas catenaria-tierra. En dicha figura se comparan los valores de las intensidades en caso de faltas cuando no hay circulación de trenes (I_{Ai}), cuando hay un tren circulando en el punto medio de la subsección C (I_{Ait1}), y cuando hay dos trenes circulando en los puntos medios de las subsecciones A y B (I_{Ait2}). Como se puede observar, los valores de la intensidad son bastante similares, haya o no circulación de trenes, en todas las posiciones de ocurrencia de faltas catenaria-tierra.

Figura 4.27: Valores de intensidad de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección, para faltas entre catenaria y raíl, en caso de que no haya trenes circulando (I_{Ai}), cuando hay un tren circulando en el punto medio de la subsección C (I_{Ait1}), y cuando hay dos trenes circulando en los puntos medios de las subsecciones A y B (I_{Ait2})

También se ha estudiado la influencia de la circulación de los trenes sobre los valores de los módulos de intensidad en los autotransformadores en el caso de faltas alimentador-tierra. En

la gráfica de la figura 4.28 se muestra la variación de dichos valores de intensidad en función de la distancia a la falta cuando no hay circulación de trenes (I_{Ai}), cuando hay un tren circulando en el punto medio de la subsección C (I_{Ai1}), y cuando hay dos trenes circulando en los puntos medios de las subsecciones B y C (I_{Ai2}). Las intensidades son muy ligeramente superiores en caso de que no haya trenes, pero como se puede observar, los valores de la intensidad también aquí son bastante similares, haya o no circulación de trenes, en todas las posiciones de ocurrencia de faltas alimentador-tierra.

Figura 4.28: Valores de intensidad de los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en función de la distancia del corto a la subestación de tracción de la sección, para faltas entre alimentador y raíl, en caso de que no haya trenes circulando (I_{Ai}), cuando hay un tren circulando en el punto medio de la subsección C (I_{Ai1}), y cuando hay dos trenes circulando en los puntos medios de las subsecciones B y C (I_{Ai2})

De acuerdo a los resultados mostrados en las gráficas, se deduce que la influencia de la circulación de trenes sobre los módulos de las intensidades de los autotransformadores en los cuales está basado el método de localización de faltas a tierra objeto de esta tesis doctoral es pequeña, tanto si la falta es catenaria-tierra como si es alimentador-tierra. Por tanto, se

puede afirmar que el método para localizar la falta a tierra es válido tanto en el caso de que se produzca cuando haya trenes circulando, como en el caso en que no los haya.

4.7 Simulación del método de localización de faltas a tierra en caso de vía doble ferroviaria

Asimismo se han realizado simulaciones del método aplicadas a una sección con vía doble, obteniéndose unos resultados similares a los obtenidos en caso de vía única. Para ello se utilizó un esquema, que es una variante del de la figura 4.3, y que se muestra en la figura 4.29. En este esquema también se realizó la simulación mediante el método nodal modificado en una sección con tres subsecciones. En este apartado se hizo la simplificación de no considerar las impedancias mutuas entre los conductores, sino únicamente las impedancias propias.

Figura 4.29: Esquema empleado para simular una sección de vía doble de tres subsecciones con el método nodal modificado

Se muestran a continuación, los resultados obtenidos en algunos ejemplos.

4.7.1 Faltas entre catenaria y tierra con vía doble

En la figura 4.30 se muestran los ángulos intensidad-tensión en función de la distancia a la falta cuando ocurren faltas entre catenaria y tierra en una vía doble.

Figura 4.30: Ángulos entre la intensidad en los autotransformadores y la tensión en catenaria en función de la distancia con faltas catenaria-tierra en vía doble

Asimismo, los valores de los módulos en los autotransformadores con faltas catenaria-tierra se muestran en la figura 4.31 en una sección con vía doble.

Figura 4.31: Intensidades en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en caso de falta catenaria-tierra en vía doble

4.7.2 Faltas entre alimentador y tierra con vía doble

Tanto los ángulos entre la intensidad y la tensión en los autotransformadores como la intensidad que circula por éstos en caso de faltas entre el alimentador negativo y carril en función de la distancia, también se han simulado en caso de vía doble.

En la figura 4.32 se pueden observar los ángulos intensidad-tensión en los autotransformadores para faltas alimentador-carril en función de la distancia en vía doble.

Figura 4.32: Ángulos intensidad-tensión en los autotransformadores en función de la distancia con faltas alimentador-tierra. Para vía doble

Y también se muestran en la figura 4.33 los valores de los módulos de las intensidades en los autotransformadores en vía doble cuando la falta es entre el alimentador y el carril.

Como se puede observar en la comparación de las figuras 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33 de vía doble con sus correspondientes 4.6, 4.8, 4.7 y 4.9 de vía única, los resultados obtenidos, tanto para los ángulos intensidad-tensión en los autotransformadores como para las intensidades en los mismos en caso de faltas a tierra, son muy similares.

Figura 4.33: Intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas alimentador-tierra en vía doble

4.8 Simulación de la influencia de la resistencia de defecto sobre el método de localización de faltas a tierra

Dentro de las simulaciones realizadas, también se ha revisado el caso de que hubiera resistencia de arco en la falta a tierra. Se ha considerado que la distancia L entre el cable de catenaria o de alimentador y el poste de sustentación del conjunto es de 40 cm. De acuerdo a los diferentes modelos (A.Warrington, R.Mason, Y.Goda, J.Blackburn) descritos en [Andrade y Sorrentino, 2010], para esa distancia y una intensidad de cortocircuito I superior a 2500 A, la resistencia de arco de mayor valor se obtiene con el método de Mason mediante la fórmula

$$R = \frac{1804,46 L}{I} \quad (4.1)$$

Con un valor de intensidad I de 2500 A, el valor que se obtiene de la resistencia de arco R es de $0,2887136 \Omega$. Se han simulado con este valor de resistencia de falta de $0,29 \Omega$ los diagramas de ángulos e intensidades en los autotransformadores en función de la distancia y se ha estudiado la comparación de los obtenidos anteriormente con una resistencia de falta nula.

4.8.1 Influencia de la resistencia de falta sobre los ángulos intensidad-tensión en autotransformador

En la figura 4.34 se puede observar el diagrama del ángulo entre las fases de intensidad y tensión en los autotransformadores en función de la distancia en caso de falta catenaria – tierra con una resistencia de defecto de $0,29 \Omega$.

Figura 4.34: Ángulos I_A-V_C en función de la distancia con faltas con resistencia catenaria-tierra

Asimismo, en la figura 4.35 se muestra el ángulo intensidad-tensión en los autotransformadores en caso de falta con resistencia de defecto de $0,29 \Omega$ cuando la falta es alimentador-tierra.

Figura 4.35: Ángulos I_A-V_C en función de la distancia con faltas con resistencia alimentador-tierra

Se puede observar que en los dos casos los ángulos se mantienen dentro de los márgenes descritos para faltas sin resistencia, excepto cuando las faltas tienen lugar en los puntos muy cercanos a la subestación o a los autotransformadores.

4.8.2 Influencia de la resistencia de falta sobre las intensidades de los autotransformadores

El módulo de la intensidad en los autotransformadores cuando ocurre una falta con resistencia de $0,29 \Omega$ entre catenaria y tierra se muestra en la figura 4.36.

Figura 4.36: Intensidades en los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS en caso de falta con resistencia catenaria-tierra

Asimismo, los módulos de las intensidades en los autotransformadores con faltas con resistencia entre alimentador y tierra están reflejados en la gráfica de la figura 4.37.

Como se muestra en las figuras 4.36 y 4.37, la influencia de la resistencia de falta es muy pequeña, sobre los valores de intensidad en los autotransformadores comparada con los valores de intensidad sin resistencia de falta, ya que la diferencia de las intensidades es menor del 1,5 % en los puntos de valor máximo, que es donde más divergen.

Figura 4.37: Intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas con resistencia alimentador-tierra

4.9 Conclusiones

Los procesos de simulación por ordenador del nuevo método de localización de faltas a tierra en una línea ferroviaria con alimentación 2×25 kV han sido detallados en este capítulo, mostrándose los esquemas y la forma de programación con los que se han llevado a cabo dichos procesos.

En primer lugar, se ha comprobado con la simulación que la impedancia vista desde la subestación cuando ocurre una falta, no es proporcional a la distancia a la que ocurre dicha falta en estos sistemas 2×25 kV, por lo que no es posible la localización de la falta con la protección de distancia. A continuación, se han simulado los procesos de las etapas de identificación y localización de las que consta el nuevo método. Para la primera etapa de identificación de subsección y conductor, se han obtenido los valores de los ángulos entre las intensidades y las tensiones en catenaria en los autotransformadores cuando ocurren faltas a tierra en todos los puntos de una sección con tres subsecciones. Para la segunda etapa

de localización de la posición de la falta, se han obtenido los valores de los módulos de las intensidades en los autotransformadores cuando, asimismo, ocurren faltas a tierra en todas las posiciones de la sección.

La extensión del método a secciones con n subsecciones se ha validado al realizar las anteriores simulaciones en secciones con dos subsecciones y en secciones con cuatro subsecciones.

También se ha simulado la influencia de la potencia consumida por los trenes en funcionamiento normal en la sección cuando ocurre una falta a tierra. Para ello se han simulado faltas a tierra en la sección con un tren o dos circulando en ella, obteniéndose los valores mencionados anteriormente de los ángulos entre intensidad y tensión y los módulos de las intensidades en los autotransformadores. Se ha ampliado, además, la simulación al caso, más frecuente, de que la sección tuviera vía doble, realizándose las mismas medidas de ángulos y módulos en los autotransformadores. Finalmente, se ha simulado que hubiera resistencia de arco en la falta a tierra, obteniendo de nuevo los valores de ángulos e intensidades en los autotransformadores. El análisis de la influencia de todos estos factores demuestra que su influencia en el método es pequeña, lo que confirma la validez del método de localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV.

Capítulo 5

ENSAYOS EN LABORATORIO PARA VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE LOCALIZACIÓN DE FALTAS A TIERRA EN SISTEMAS 2×25 kV

5.1 Introducción

Para verificar el nuevo método de localización de faltas en sistemas ferroviarios 2×25 kV en el laboratorio, se desarrolló un simulador de una sección de línea con autotransformadores. Esta sección de laboratorio se ha implementado con un circuito similar a la estructura de sección analizada en el capítulo de simulación. Es decir, comprendida entre una subestación y una zona neutra en la que está instalado un autotransformador final, incluyendo dos autotransformadores intermedios, y estando todos separados 10 km. Por tanto, la longitud total de la sección se ha simulado de 30 km, y tiene tres subsecciones, tal como se puede observar en la figura 5.1.

Como ya se ha explicado anteriormente, el método de localización de faltas a tierra consta de dos etapas. En la primera, se identifica la subsección en que ha sucedido la falta y si ha sido en el conductor positivo o negativo mediante el ángulo que forman la intensidad y la tensión en los autotransformadores en el momento de la falta. Y en la segunda etapa, se obtiene el valor de la posición de la falta mediante los valores de intensidad medidos en los devanados de los autotransformadores en el momento en que ocurre dicha falta. Por tanto, aunque se ha empleado en gran medida el mismo simulador para la realización de los ensayos en las dos etapas, hay diferentes instrumentos de medida en cada etapa, ya que en la primera

se usaron dispositivos para la medición de ángulos intensidad-tensión y en la segunda instrumentación para medida de módulos de intensidades.

Figura 5.1: Esquema de una sección 2×25 kV con tres subsecciones

5.2 Simulador de laboratorio para obtención de subsección y conductor en falta

En orden a realizar en laboratorio la obtención de la subsección y el conductor en que ha ocurrido una falta a tierra, se escogió el circuito que se describe en la figura 5.2. Esta disposición eléctrica es equivalente a la de la línea ferroviaria de alta velocidad con autotransformadores, con alimentación positiva por catenaria y negativa mediante un hilo alimentador.

En este circuito de simulación en el laboratorio, la impedancia distribuida de catenaria y alimentador de la línea se implementó con impedancias concentradas con alta componente reactiva, Z , que simulan únicamente dichas impedancias de catenaria y alimentador negativo, ya que se hizo la simplificación de considerar despreciable en las pruebas de laboratorio la impedancia del carril. Cada elemento Z , que tiene una impedancia de $0,5 + j5 \Omega$, simula la impedancia de un tramo de cinco km, lo que representa un valor de impedancia de $0,1 + j \Omega/\text{km}$ tanto para catenaria como para alimentador.

Figura 5.2: Disposición simplificada de la instalación en laboratorio para los ensayos de obtención de la subsección y el conductor en falta en una línea 2×25 kV

La subestación está implementada por las dos fuentes de tensión alterna V1 y V2 en contrafase, siendo todos los autotransformadores de relación 1:1. En el circuito se muestra también la disposición de los dispositivos de medida y control.

Como se observa en la figura 5.2, no se ha instalado dispositivo de medida y control en el último autotransformador, pues de acuerdo a lo descrito en el apartado 3.2.3, para obtener la identificación del conductor y la subsección en falta en secciones con más de dos subsecciones no es necesario realizar las medidas en el autotransformador situado en la posición más alejada de la subestación (SATS). Esto es debido a que, cuando ocurre una falta en la última subsección, la variación del ángulo entre intensidad y tensión ocurre en el último y en el penúltimo autotransformador. Si no se instala el dispositivo de medición en el último autotransformador, cuando la variación del ángulo se obtenga únicamente en el

penúltimo autotransformador, se determinará claramente que la falta ha ocurrido en la última subsección.

Cada dispositivo de medida y control situados en el autotransformador más cercano y en el intermedio, consta de un transformador de tensión, un transformador de intensidad y un relé de sobreintensidad direccional, y miden las tensiones e intensidades tanto en situación normal como cuando ocurre una falta.

Los transformadores de tensión, situados en la catenaria, están identificados como VT1C el del primer autotransformador y VT2C el del segundo y miden la tensión entre la catenaria en el punto de conexión con el autotransformador y el conductor que representa el carril unido a tierra.

Respecto a los transformadores de intensidad, se han dispuesto para que midan la intensidad que entra en los autotransformadores tanto desde catenaria como desde alimentador. CT1C y CT2C miden la corriente que entra en los autotransformadores desde la catenaria, y CT1F y CT2F las que entran desde el alimentador negativo.

Aunque no están representados en la figura 5.2, para protección de la instalación completa cuando se hicieron los cortocircuitos que simulaban las faltas a tierra, también se instalaron transformadores de intensidad a la salida de las fuentes de tensión conectados a otro relé de sobreintensidad. Esta protección se describe en el apartado 5.2.1.4.2 “módulo de medida y corte en subestación”.

Además, los relés se conectaron a un controlador lógico programable (PLC) y, éste a su vez, a un ordenador para presentar en una pantalla el conductor y la subsección que están en falta cuando ésta ocurre.

En la figura 5.3 se muestra una fotografía del simulador completo de laboratorio empleado en los ensayos en esta primera etapa.

Figura 5.3: Vista general del simulador empleado en los ensayos de laboratorio

Se puede observar a la izquierda dos fuentes de alimentación V_1 y V_2 conectadas en tándem. En primer plano en el centro, se disponen los doce módulos Z correspondientes a las impedancias concentradas con alta componente reactiva que simulan la impedancia de línea. En segundo plano se observan los tres relés $P127$, y más a la derecha el ordenador de control. En el plano del fondo se distinguen los tres módulos de medida, el módulo de autotransformadores ATS , y el PLC .

5.2.1 Esquema de la implementación en el laboratorio

El esquema que refleja el simulador empleado en los ensayos en el laboratorio se representa en la figura 5.4. No se muestran en esta figura los relés de protección que se conectan a los módulos de medida, ni el ordenador y ni el PLC que se mostró en la figura 5.2. Se describen seguidamente los diferentes componentes de este demostrador y su forma de conexionarlos.

Figura 5.4: Esquema que muestra las conexiones de los distintos módulos de la maqueta realizada en el laboratorio para la obtención de la subsección y el conductor en falta

5.2.1.1 Fuentes de Alimentación

Para conseguir simular la alimentación positiva de catenaria y la negativa del hilo alimentador, se conectaron dos variadores de corriente alterna en tándem y funcionando en modo monofásico. Se consigue de esta manera una tensión de alimentación positiva alterna con respecto a un conductor neutro (conductor que simula una vía con tensión 0), y una tensión negativa alterna con respecto a dicho conductor en contrafase con la positiva. Mediante esta disposición, y graduando la salida del segundo variador para que dé una tensión mitad de la que le ha llegado a la entrada, se consigue que se obtengan las dos tensiones positiva y negativa variable pero del mismo valor, con sólo modificar la tensión de salida de la primera fuente. Esta conexión en tándem se muestra en la figura 5.5.

Figura 5.5: Conexión de dos fuentes en tándem para conseguir la tensión de catenaria y alimentador

Aunque para los ajustes de todos los dispositivos que configuran el simulador se emplearon distintas tensiones de salida de esta fuente de alimentación variable, para realizar los ensayos de identificación del conductor y la subsección en falta se utilizó una tensión de salida de la fuente entre el conductor positivo que simula la catenaria y el de 0 V que simula el carril de valor 50 V, y una tensión de salida entre el conductor de 0 V y el conductor negativo que simula el alimentador negativo también de 50 V.

5.2.1.2 Autotransformadores

Los autotransformadores ATS1, ATS2 y SATS de relación 1:1 se implementaron mediante un variador de tensión trifásico cuyos tres arrollamientos se unieron por el punto intermedio, tal como se puede observar en la figura 5.6.

A su vez este punto intermedio es el que se conecta al punto 0 de la tensión de salida de las fuentes. Esta conexión simula el carril de una vía ferroviaria de un sistema 2×25 kV.

Figura 5.6: Módulo de autotransformadores en laboratorio

5.2.1.3 Impedancias de línea

El valor supuesto en el circuito de una impedancia, tanto para catenaria como para alimentador, de $0,1 + j$ ohm/km se obtiene a partir de disponer de impedancias concentradas con un valor de $0,5 + j 5$ ohm que simulan 5 km de conductor. El hecho de haber puesto dos impedancias Z en cada subsección, tanto en la catenaria como en el alimentador negativo, permite hacer conexiones para simular faltas a tierra en el punto medio de cada una de las subsecciones.

5.2.1.4 Módulos de medida

Los transformadores de tensión e intensidad se integraron en tres módulos, uno situado en la subestación, otro en el ATS1 y el tercero en el ATS2. Dichos módulos contienen además interruptores de corte que pueden abrir el circuito tanto manualmente como por medio de una determinada señal.

5.2.1.4.1 Módulo de medida en autotransformador intermedio

En la figura 5.7 se puede observar las conexiones de los dispositivos en cada uno de los dos autotransformadores intermedios. Los números representados en la figura son los números de los terminales del relé de sobreintensidad direccional MiCOM P127 que se conectan, a la

entrada del relé, a los terminales del módulo de medida, y a la salida del relé, al dispositivo de control.

Figura 5.7: Conexiones del relé MiCOM P127 de autotransformador intermedio al módulo de medida de ATS y al PLC

En este caso, los módulos de medida de catenaria y alimentador, agrupados en un único módulo de medida ATS por cada autotransformador intermedio (aunque en el esquema de la figura 5.4 esté cada módulo representado en dos partes separadas, la de catenaria y la de alimentador), envían la información de la corriente de catenaria y alimentador a las fases A (terminales 41 y 42) y C (terminales 45 y 46) respectivamente del relé MICOM P127 de sobreintensidad direccional de cada autotransformador intermedio.

Asimismo, dichos módulos envían la tensión de catenaria a la fase B del relé (terminal 71), cortocircuitando los terminales de tensión de las fases A (terminales 69 y 70) y C (terminales 73 y 74), y uniéndolas al otro terminal (72) de la fase B. Con ello se consigue que la tensión V_{BC} comparada por el relé en su actuación direccional por sobreintensidad en la fase A sea igual a V_B y que la tensión V_{AB} comparada en la fase C sea igual a $-V_B$.

En la figura 5.8 se observan los tres módulos de medida utilizados en el laboratorio. El situado en la parte superior izquierda, que es el módulo de la subestación, tiene también conexionado la función de interruptor de corte para protección de la línea más allá de la subestación.

Figura 5.8: Vista de los módulos de medida. El superior izquierda es el módulo de medida y corte de subestación. El módulo superior derecha es el módulo de medida correspondiente al autotransformador ATS1 y el inferior derecha es el del ATS2

5.2.1.4.2 Módulo de medida y corte en subestación

De acuerdo a lo explicado en el circuito teórico, el módulo de medida ubicado en la subestación mide, mediante dos transformadores de intensidad las corrientes que fluyen desde la subestación al resto de la línea por la catenaria y el alimentador respectivamente. Asimismo, mediante dos transformadores de tensión, el módulo mide las tensiones en esos dos conductores a la salida de dicha subestación.

Con objeto de conseguir protección para el circuito en caso de faltas, la información proporcionada por los transformadores de tensión e intensidad situados en la subestación en catenaria y alimentador, se conectan a las entradas de las fases A y B de un relé de sobreintensidad MICOM P127 en la subestación, según se muestra en la figura 5.9.

Figura 5.9: Conexiones del módulo de medida y corte de subestación al relé MiCom P127 de subestación

A su vez, la salida del relé se lleva a los interruptores de corte para conseguir, por detección de sobreintensidad, la protección de la línea a la salida de la subestación.

En el laboratorio, los módulos de medida de subestación para alimentador y catenaria y el módulo interruptor de corte de la figura 5.9 estaban agrupados en un único módulo de medida y corte en subestación, tal como está representado en la figura 5.4.

5.2.1.5 Relés de sobreintensidad

La figura 5.10 muestra uno de los relés MiCOM P127 empleados en el montaje. Se utilizan estos relés de dos formas diferentes según se empleen en la subestación ó en los autotransformadores intermedios.

5.2.1.5.1 Relé en subestación

Como se ha comentado, su función es la protección de la línea, siendo su conexión la representada anteriormente en la figura 5.9.

Figura 5.10: Vista del relé MiCOM P127 con disparo en la fase A

Cuando se produce una falta, se eleva grandemente la intensidad en catenaria y alimentador, y al estar el relé MiCOM P127 parametrizado para actuar por sobreintensidad sin tener en cuenta su dirección, provoca una apertura del contacto RL7 que tiene salida por los terminales 9 y 11 del relé. Este contacto, que normalmente está abierto y se cierra cuando se activa, se ha parametrizado en la instalación en todos los relés MiCOM P127 para que actúe al contrario, abriéndose cuando se activa. Para conseguirlo, se ha puesto a 1 el bit de los relés de seguridad activa 6, 7 y 8 en el apartado Relés de salida del menú de CONFIGURACIÓN del MiCOM P127.

Para conseguir que el relé responda a la sobreintensidad, se activaron los parámetros del menú PROTECCIÓN G1 – SOBREINTENSIDAD DE FASE para sobreintensidad $I >$ y temporización constante. Asimismo, para efectuar el disparo del relé, se activó en AUTOMATISMOS – ORDEN DISPARO el disparo por sobreintensidad $\text{Disp } tI >$, y en AUTOMATISMOS – CONTACTOS SALIDA se puso a 1 el bit 7 (es el del contacto RL7) en los parámetros $tIA >$ y $tIB >$ relativos a la sobreintensidad en las fases A y B que puede llegarle a través de los terminales 41,42,43 y 44.

De esta manera, cuando ocurre una falta, y por tanto una sobreintensidad, el relé de subestación la detectará en la entrada en sus terminales de las fases A (41 y 42) y B (43 y

44). Entonces, envía, por medio del contacto RL7 y los terminales 9 y 11, una señal de apertura temporizada a los interruptores de corte, dispuestos en la catenaria y alimentador en la subestación, y protegiendo así el resto de la sección hasta el autotransformador final.

5.2.1.5.2 Relé en autotransformador intermedio

Como se ha comentado en la descripción teórica, y es el fundamento de esta etapa de identificación de subsección y conductor en falta, al ocurrir una falta a tierra se produce una variación del ángulo que forma la intensidad con la tensión en los autotransformadores más cercanos a la falta. Al mismo tiempo, se eleva grandemente el módulo de la intensidad en los devanados de dichos autotransformadores. Variación del ángulo y sobreintensidad que pueden ser detectados por medio de un relé.

Según se observó teóricamente y se ha comprobado experimentalmente, cuando la falta ocurre en la primera subsección (entre la subestación y el primer autotransformador), la sobreintensidad y variación del ángulo sólo se produce en el primer autotransformador intermedio; cuando ocurre en la tercera subsección (entre el segundo autotransformador y el final), sólo se produce en el segundo autotransformador intermedio al no haberse instalado dispositivos de medición en el tercer autotransformador; y, cuando la falta ocurre en la segunda subsección (entre el primer y segundo autotransformador intermedio), se produce la sobreintensidad y variación del ángulo en estos dos autotransformadores intermedios.

Cuando se realizaba en el laboratorio una falta entre el conductor positivo o negativo y el conductor considerado como 0 voltios (ver figura 5.4) en la primera o segunda subsección, el ángulo que formaba la intensidad (I_{A1}) y la tensión de catenaria en el nodo F (U_F) en el primer autotransformador intermedio ATS1 en condiciones de carga normales (unos 160°), se modificaba hasta formar un ángulo de aproximadamente 110° en las faltas catenaria-tierra ó de unos 290° en las faltas alimentador-tierra, tal como se observa en las figuras 5.11 (falta catenaria-tierra) y 5.12 (falta alimentador-tierra). Si la falta era en la segunda o tercera subsección, lo mismo ocurría entre la intensidad (I_{A2}) y la tensión de catenaria en el nodo L (U_L) del segundo autotransformador intermedio ATS2 de la figura 5.4.

Figura 5.11: Ángulos entre intensidades y tensiones en autotransformadores con falta catenaria-tierra. La figura de la izquierda muestra los ángulos en el autotransformador intermedio ATS1, mientras que la de la derecha los muestra en el autotransformador intermedio ATS2

Figura 5.12: Ángulos entre intensidades y tensiones en autotransformadores con falta entre alimentador y tierra. La figura de la izquierda muestra los ángulos en el autotransformador intermedio ATS1, mientras que la de la derecha los muestra en el autotransformador intermedio ATS2

De modo recíproco, el ángulo que formaba la intensidad (I_{F1}) que entraba en el primer autotransformador ATS1 desde el alimentador (intensidad que es igual a la que entra desde

la catenaria) y la tensión de alimentador en el nodo G (U_G) (que es igual a la de catenaria multiplicada por -1) era de unos 290° en las faltas catenaria-tierra y de unos 110° en las faltas alimentador-tierra cuando la falta es en la primera o segunda subsección. Y lógicamente, también ocurría lo mismo entre la intensidad (I_{F2}) y la tensión de alimentador en el nodo M (U_M) del segundo autotransformador ATS2 de la figura 5.4 cuando la falta era en la segunda o la tercera subsección.

Para comprobar el valor de dichos ángulos se emplearon oscilografías obtenidas partir de los datos del registro de faltas generado por el relé P127. Para ello, en un ordenador conectado al relé se ejecutaron los programas de extracción de datos de dichos registros de la aplicación MICOM S1 y de visualización de dichos datos del programa WaveWin. Un ejemplo de dichas gráficas se puede observar en la figura 5.13.

Figura 5.13: Oscilografía del registro de datos de falta generados por el relé P127. Muestra la intensidad y la tensión en un autotransformador durante una falta entre catenaria y tierra

Por tanto, midiendo dichos ángulos y sus variaciones, se pudieron detectar las faltas anteriormente comentadas y la subsección y conductor en que ocurrían. Como se ha expuesto, la forma de llevarlo a cabo fue por medio del relé de sobreintensidad direccional de cada autotransformador intermedio. Para ello, se parametrizaron los relés MiCOM P127 instalados en los autotransformadores intermedios para que actuaran en modo sobreintensidad direccional.

En orden a conseguir que el relé responda en este modo, se activaron los parámetros del menú PROTECCIÓN G1 – SOBREINTENSIDAD DE FASE para sobreintensidad

direccional $I > \text{DIR}$, y temporización constante. Esta temporización se ajustó para que fuera menor que la del relé en subestación, para que actúe antes de que dicho relé en subestación corte la intensidad de la línea para protección. El parámetro $I > \text{ángulo de par}$ se ajustó a 100° y el parámetro $I > \text{zona de disparo}$ se fijó entre $+35^\circ$ y -35° . Asimismo, para efectuar el disparo del relé, se activó en AUTOMATISMOS – ORDEN DISPARO el disparo por sobreintensidad $\text{Disp } tI > .$ Y también, en AUTOMATISMOS – CONTACTOS SALIDA se puso a 1 el bit 6 (es el del contacto de salida RL6) en el parámetro $tIA >$ relativo a la sobreintensidad direccional en la fase A (entrada por los terminales 41 y 42), y el bit 8 (es el del contacto de salida RL8) en el parámetro $tIC >$ relativo a la sobreintensidad direccional en la fase C (entrada por los terminales 45 y 46).

Con estos parámetros, al recibir el relé en ATS1 una sobreintensidad por la fase A, el relé actuará si, además, $I_A \wedge U_{BC}$ (el ángulo entre la intensidad en la fase A y la diferencia de tensión entre la tensión en la fase B y la tensión en la fase C del relé en ATS1) = $I_A \wedge U_B$ (por tener los terminales de tensión 73 y 74 de la fase C cortocircuitados) = $I_{A1} \wedge U_F$ (ángulo entre la intensidad entrante en el autotransformador desde catenaria y la tensión en el nodo F de la figura 5.4) está entre 65° y 135° (ángulo de par más ángulo de zona de disparo). Esto ocurrirá cuando haya una falta catenaria-tierra en la primera ó segunda subsección, resultando una señal de apertura del contacto RL6.

Asimismo, el relé en ATS1 actuará con una sobreintensidad por la fase C si, además de esta sobreintensidad, el ángulo $I_C \wedge U_{AB}$ (el ángulo entre la intensidad en la fase C y la diferencia de tensión entre la tensión en la fase A y la tensión en la fase B del relé en ATS1) = $I_C \wedge (-U_B)$ (por tener los terminales de tensión 69 y 70 de la fase A cortocircuitados) = $I_{F1} \wedge (-U_F)$ (ángulo entre la intensidad entrante en el autotransformador desde alimentador y la tensión en el nodo G de la figura 5.4) = $I_{F1} \wedge U_G$ está entre 65° y 135° . Esto ocurrirá cuando haya una falta alimentador-tierra en la primera ó segunda subsección, resultando una señal de apertura del contacto RL8.

De análoga manera, en el relé del segundo autotransformador intermedio se producen los mismos sucesos. Se compara la intensidad I_{A2} con la tensión U_L , y la intensidad I_{F2} con la tensión U_M , produciéndose una apertura del contacto RL6 si ocurre una falta catenaria-tierra en la segunda ó tercera subsección, y una apertura del contacto RL8 si ocurre una falta alimentador-tierra en la segunda ó tercera subsección.

Por tanto, la activación de los contactos de los relés según sea el tipo de faltas se puede describir con la siguiente tabla 5.1:

Tabla 5.1: Relación entre la activación de los relés en ATS1 y ATS2 y las causas que han provocado dichas activaciones. Por ello, se procesaron estas activaciones con esta tabla, para mostrar en un ordenador cual es la causa de una determinada activación

	RL6 ATS 1	RL8 ATS 1	RL6 ATS 2	RL8 ATS 2
Falta en catenaria subsección 1	SI	NO	NO	NO
Falta en alimentador subsección 1	NO	SI	NO	NO
Falta en catenaria subsección 2	SI	NO	SI	NO
Falta en alimentador subsección 2	NO	SI	NO	SI
Falta en catenaria subsección 3	NO	NO	SI	NO
Falta en alimentador subsección 3	NO	NO	NO	SI

Cada uno de los dos relés, envían la señal de salida de RL6 por los terminales 5 y 7 y la de RL8 por los terminales 13 y 15. Estos terminales se conectan a un controlador lógico programable (PLC) de la forma anteriormente representada en la figura 5.7.

5.2.1.6 Controlador lógico programable

El PLC es un TSX3722, que recibiendo las señales de los dos relés en un módulo de entrada/salida, envía la señal procesada, por medio de un programa en lenguaje de contactos y mediante una conexión RS232, a un ordenador de control, según se muestra en la figura 5.14.

Figura 5.14: Esquema del conexionado de los módulos de medida y relés de los dos autotransformadores intermedios con el PLC y el ordenador de control (PC)

Una de las salidas de cada relé de contacto RL6 y RL8 (terminales 7 y 15 de los relés de ATS1 y ATS2) se conectan al terminal 17 de +24V del módulo E/S del PLC, del que se muestra una vista en la figura 5.15.

Figura 5.15: Vista del controlador lógico programable empleado: un TSX3722

La otra salida (terminales 5 y 13 de cada relé) se conecta cada una a una entrada del PLC (conexiones 11, 12, 13 y 14).

El programa en lenguaje de contactos instalado en el PLC recibe las señales en estas cuatro entradas correspondientes a los relés de contacto RL6 y RL8 de ATS1 y ATS2, y las procesa según se describe en la tabla 5.1. Debido a la corta duración de la apertura de los contactos RL6 y RL8, insuficiente para que el PLC pudiera procesar pulsos tan cortos, se programó el PLC para que procesara la señal de cada relé de contacto cuando detecte el flanco de bajada del pulso.

Por tanto, en función de los contactos activados, el programa puede dar una de las seis salidas reflejadas en la referida tabla 5.1, salidas que se muestran de forma gráfica en un ordenador. En la pantalla de dicho ordenador se mostrará la información de en qué subsección de las tres ha ocurrido la falta conductor-tierra y si ha ocurrido en el cable de catenaria ó en el del alimentador.

Un ejemplo del resultado en esta pantalla se puede observar en la figura 5.16, en la que el ordenador de control informa de que ha ocurrido una falta alimentador-tierra en la segunda subsección o tramo.

Una vez despejada la falta y pulsado el botón “cancelar mensaje”, la pantalla vuelve al estado de reposo, tal como se muestra en la figura 5.17.

Figura 5.16: Resultado en la pantalla del ordenador de control. El mensaje y los grafismos en color rojo informan de una falta alimentador-tierra en la subsección comprendida entre los dos autotransformadores intermedios

Figura 5.17: Pantalla que aparece en el ordenador de control en caso de ausencia de faltas a tierra en la sección de línea controlada

Todos estos procesos desarrollados en el laboratorio confirman la simulación por ordenador realizada en el capítulo anterior de identificación de la subsección y el conductor en que ha ocurrido una falta a tierra, que es la primera etapa del método de localización de faltas a tierra en sistemas ferroviarios 2×25 kV.

5.3 Simulador de laboratorio para obtención de la posición de la falta

Tal y como ya se ha descrito, la segunda etapa del método de localización de la posición de una falta a tierra en sistemas 2×25 kV se basa en los valores de los módulos de las intensidades en los autotransformadores en el momento de la falta. Asimismo, se ha explicado anteriormente que para obtener la posición de una falta a tierra con este método, es necesario que el ordenador de cálculo compare los valores leídos de las intensidades en los autotransformadores con los valores en memoria de la tabla de intensidad-distancia adecuada al conductor y la subsección en falta. Para obtener los valores de dichas tablas se hicieron mediciones en el laboratorio de los valores de intensidad en los autotransformadores simulando faltas cada 0,5 km. En orden a obtener dichas medidas, se realizó una instalación en el laboratorio que desarrolla un circuito similar al que se describió en la figura 5.2 pero con ciertas diferencias. Este circuito, que permite medir las intensidades cuando las faltas a tierra ocurren en todos los puntos de la sección eléctrica, se muestra en la figura 5.18.

Como se ha mencionado, existen algunas diferencias entre este simulador y el empleado en la primera etapa de identificación del conductor y subsección en falta. La principal diferencia de este circuito respecto al anterior consiste en que algunas de las impedancias de línea empleadas en este circuito son variables en vez de todas fijas como eran las que se usaban en el circuito de la figura 5.2. Esto dio lugar a que en la primera etapa de identificación de subsección y conductor en falta, solo se hicieran medidas cuando las faltas ocurrían en el punto medio de cada subsección.

Figura 5.18: Circuito de la instalación en laboratorio empleado en los ensayos de obtención de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta

También es de resaltar que otra importante diferencia es que aquí se instalaron dispositivos de medida también en el autotransformador final (SATS) para poder obtener la intensidad en dicho autotransformador al realizar las faltas. Se puede observar también otra diferencia, aunque esta vez poco relevante, y es que para la alimentación del circuito, en vez de dos fuentes de alimentación en tándem, se emplearon dos transformadores conectados a una fuente de alimentación, tal y como se describe posteriormente. Aunque no están representados en la figura 5.18, al igual que en el primer simulador, para protección de la instalación completa también se instalaron transformadores de intensidad a la salida de las fuentes de tensión conectados a otro relé de sobreintensidad, de manera similar a como se describió en el apartado 5.2.1.4.2 “módulo de medida y corte en subestación”.

5.3.1 Descripción del simulador de laboratorio para medición de intensidades en los autotransformadores

Los dispositivos empleados en el simulador de laboratorio utilizado en esta segunda etapa de obtención de la posición de la falta a tierra mediante los valores de intensidad en los

autotransformadores, se pueden clasificar en dispositivos de instalación de la línea y dispositivos de medida y protección.

5.3.1.1 Dispositivos de instalación de la línea

En la figura 5.19 se muestra el esquema de la instalación en el laboratorio para la obtención de las tablas intensidad en autotransformadores–distancia a la falta realizando cortocircuitos cada 0,5 km.

Figura 5.19: Esquema de la instalación en el laboratorio para la obtención de las tablas intensidad medida en autotransformadores-distancia a la falta

Los elementos de la instalación que están numerados en dicho esquema corresponden a los que se muestran en la instalación real del simulador de laboratorio de la figura 5.20.

Figura 5.20: Disposición de los elementos del simulador en el laboratorio para la obtención de las tablas intensidad en los autotransformadores-distancia a la falta

El elemento marcado como número 1 corresponde a la fuente de tensión empleada en el laboratorio. En este caso, simulando a la red de alta tensión que recibe la subestación de tracción por el primario del transformador, se regula la tensión que genera a 132 V.

Los elementos 2 y 3 del simulador son dos transformadores encargados de bajar la tensión desde 132 V a 25 V entre catenaria y carril y 25 V entre carril y alimentador, que es la tensión de alimentación de la sección de línea simulada en esta etapa de localización.

Los dispositivos que conforman el elemento 4 son los autotransformadores.

El elemento número 5 se corresponde con las impedancias utilizadas para simular el efecto mayoritariamente inductivo que tienen las líneas eléctricas a lo largo del recorrido.

Al igual que en el simulador de laboratorio de la primera etapa, se han empleado impedancias de $0,5 + j5$ ohm y se han utilizado dos por cada subsección, tanto en la catenaria como en el

alimentador negativo. Así, se consigue un total de $1 + j10$ ohm por subsección de 10 km, siendo por tanto la equivalencia de $0,1 + j \Omega/\text{km}$.

El elemento número 6 es del mismo tipo que el elemento anterior, pero en este caso las impedancias son variables. De esta forma, se obtiene en cada uno de estos dispositivos una impedancia variable que va desde 0 a $0,5 + j5$ ohmios en pasos de $0,05 + j0,5 \Omega$. En el simulador, lo que se hace es sustituir una impedancia fija de $0,5 + j5 \Omega$ por estas dos variables, haciendo que ambas sumen siempre esos mismos $0,5 + j5$ ohmios. Su función es la siguiente: para poder ir variando el punto de la catenaria o alimentador donde tiene lugar el cortocircuito, se instala el interruptor que hace de cortocircuito entre ambas impedancias variables, de modo que se puede ir avanzando de medio kilómetro en medio kilómetro a lo largo de la sección..

Así, como ejemplo, para provocar el fallo en el kilómetro 1,5 de la catenaria, se instalan estas impedancias variables al principio de la catenaria, teniendo la primera $0,15 + j1,5 \Omega$ y la segunda $0,35 + j3,5 \Omega$, sumando ambas $0,5 + j5 \Omega$ que, con los $0,5 + j5 \Omega$ de la impedancia fija, abarcan los $1 + j10 \Omega$ de la primera subsección. Esta pareja de impedancias variables van sustituyendo en función de donde interese el cortocircuito a las demás impedancias fijas y así se consigue avanzar el cortocircuito entre catenaria y carril o entre carril y alimentador a lo largo de la subsección. Realizando el mismo proceso en las demás subsecciones, tanto en catenaria como en alimentador negativo, se consigue simular la falta a tierra en todos los puntos de los dos conductores en la sección completa. La figura 5.21 muestra físicamente y en esquema eléctrico a una de estas impedancias variables.

El elemento número 7 es el interruptor que simulaba los posibles cortocircuitos que se podrían producir entre catenaria y carril y entre alimentador negativo y carril.

Figura 5.21: Foto y esquema de las impedancias variables Z1 y Z2 empleadas en la instalación, de valor $10 \times (0,05 + j0,5 \text{ ohm})$

5.3.1.2 Dispositivos de medida y protección

Al igual que se comentó en la primera etapa de la simulación y debido al carácter de los ensayos, para tener un control en todo momento de las sobreintensidades que pudieran ocurrir en la instalación, fue necesario instalar un módulo de medida y corte a la salida de los transformadores de la subestación. De esta manera, se protege a los demás elementos del simulador de las sobreintensidades en los conductores que simulan la catenaria, el alimentador o el carril y que podrían dañarlos. Asimismo, se necesitan obtener los valores de las intensidades en los autotransformadores cuando se realizaron los cortocircuitos simulando las faltas a tierra en todos los puntos de la sección. Por ello, se instalaron varios dispositivos de medida y protección del circuito.

En las figuras 5.22 y 5.23 se muestran los instrumentos de medida y protección utilizados en el simulador de laboratorio. En la figura 5.22 se muestra el esquema eléctrico en el que

se indica la ubicación de los instrumentos de protección y medida mientras que en la figura 5.23 se muestra la disposición física de dichos instrumentos en el simulador.

Figura 5.22: Esquema de la instalación en el laboratorio en el que se muestran los dispositivos de medida y protección empleados

El dispositivo de medida y protección situado a la salida de la subestación es el módulo de medida y corte en subestación definido en el apartado 5.2.1.4.2. Como se explicó en dicho apartado se trata de un conjunto que contiene los transformadores de intensidad y el interruptor de corte empleados para la protección de la línea y está numerado como el dispositivo número 2 en estas figuras. El dispositivo numerado como 1 es un relé de sobreintensidad P127 que controla el disparo del interruptor de corte en función de la intensidad leída por los transformadores de intensidad del módulo de medida y corte. En esta segunda etapa, además de medir la intensidad de los conductores de catenaria y alimentador, se midió en la entrada de la fase C del relé, la intensidad del conductor que simulaba el carril. Cuando se produce el cortocircuito, los transformadores de intensidad envían la información al relé que, en función del valor de la intensidad recibida y los ajustes introducidos, puede disparar por sus contactos de salida el interruptor de corte.

Figura 5.23: Disposición de los elementos de medida y protección del simulador en el laboratorio

Para ello, se configuró el relé de forma que disparase el interruptor cuando se superase el valor de un amperio por alguna de sus fases, desconectando la subestación de los demás elementos del sistema que constituyen la línea ferroviaria.

Este relé es de suma importancia cuando se provocan los cortocircuitos en la primera subsección de 10 km y, sobre todo, cerca de la subestación ya que en esas situaciones las intensidades que lee el relé son muy elevadas y se evitan así problemas en la línea y en sus elementos.

El aparato de medida 3 es un multímetro cuya única función es medir en todo momento la tensión a la salida del transformador entre la catenaria y el carril o entre carril y alimentador

para garantizar que, siempre que no haya un cortocircuito, estamos alimentando al sistema con 25 V en cada circuito.

El aparato de medida con el número 4 es un relé de sobreintensidad P127, utilizado en este caso para obtener los valores de las intensidades en los devanados de los tres autotransformadores cuando se realizan los cortocircuitos.

El dispositivo de medida 5 es el módulo de medida de la intensidad en los autotransformadores. En esta etapa se empleó un solo módulo que contenía los tres transformadores de intensidad (CTC) necesarios para la obtención de las intensidades y se conectaron en la entrada a los autotransformadores por la conexión de catenaria según la disposición mostrada en la figura 5.18. Cada transformador de intensidad se conectó a una fase del relé. Para conseguir obtener las lecturas de las intensidades en el relé se configuró éste para que disparase cuando la intensidad de las fases superase 0,1 amperios, de modo que se pudiesen obtener los valores de las intensidades en ese momento en las tres fases.

En los casos en los que las intensidades de cortocircuito eran tan pequeñas que los relés no disparaban pero era necesario medir las intensidades que circulaban por los conductores y los autotransformadores cuando se producían estos cortocircuitos, se dispusieron también de pinzas amperimétricas. En concreto, estos cortocircuitos que provocaban corrientes de magnitud tan pequeña que no disparaban los relés, eran los que se realizaban en los kilómetros finales de la línea.

5.3.2 Ensayos de laboratorio realizados para la obtención de intensidades en los autotransformadores

Como se describió anteriormente, para obtener los valores de las tablas de intensidad en los autotransformadores en función de la distancia de la falta a tierra a la subestación, se hicieron mediciones en el laboratorio de los valores de intensidad en los autotransformadores simulando faltas cada 0,5 km. de acuerdo al circuito que se muestra en la figura 5-18 y a los dispositivos descritos en el apartado 5.3.1.

Además, para estudiar la influencia del consumo de potencia, motivado por la circulación de trenes, sobre los valores de intensidad en los autotransformadores en el momento en que

ocurría la falta, se realizaron asimismo ensayos en el laboratorio al igual que se hizo en la simulación por ordenador. Como se describirá posteriormente, se simuló que circulaban uno o dos trenes en la sección mediante la conexión de una resistencia entre catenaria y carril, cuando se realizaban los cortocircuitos que simulaban las faltas a tierra a lo largo de toda la sección.

5.3.2.1 Ensayos de intensidades en los autotransformadores sin circulación de trenes

Con los elementos del simulador de laboratorio descrito anteriormente, se hicieron ensayos para la obtención de las tablas de intensidad en los autotransformadores en función de la distancia a la falta, realizando los cortocircuitos cada 0,5 km a lo largo de los 30 km de la sección, tanto entre catenaria y carril como entre alimentador y carril sin que hubiera circulación de ningún tren en la sección.

5.3.2.1.1 Faltas entre catenaria y carril

Los ensayos de faltas catenaria-tierra sin circulación de trenes se realizaron de acuerdo al proceso que se muestra en los esquemas de la figura 5.24.

En ella se puede observar, tal y como se comentó anteriormente en el apartado 5.3.1.1, el proceso para realizar los cortocircuitos entre la catenaria y el carril en posiciones que simulaban intervalos de 0,5 km a lo largo de las tres subsecciones de la sección completa. Según se describió en dicho apartado, esto se consigue ajustando e instalando las impedancias variables $Z1$ y $Z2$ en las posiciones adecuadas, tal y como se muestra en la figura 5.24.

En ella también se puede observar que esta instalación y ajuste se debe de ir realizando de manera que las impedancias a la izquierda y derecha de la falta reflejen los valores de las impedancias en todas las posiciones de la sección de línea. De esta forma, y midiendo en cada posición el valor de los módulos de las intensidades en los tres autotransformadores en el momento de hacer el cortocircuito en todos los puntos de la sección, se obtienen los gráficos que muestran dichas intensidades I_{A1} , I_{A2} e I_{A3} en función de la distancia a las faltas

en catenaria sin circulación de trenes en la sección. Estos gráficos se muestran en la figura 5.25.

Figura 5.24: Esquema para realización de faltas catenaria-tierra a lo largo de la sección eléctrica ferroviaria sin circulación de trenes

Figura 5.25: Distribución de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a las faltas entre catenaria y carril sin que haya circulación de trenes

Se comentó en la descripción del método de localización en el apartado 3.3.1, y se comprobó en el capítulo de simulación por ordenador en el apartado 4.4 que, cuando sucede una falta a tierra en el sistema 2×25 kV, los módulos de las intensidades en los devanados de los autotransformadores siguen un patrón determinado en función de la distancia desde la subestación de tracción a la falta cuando se realizan faltas en todos los puntos a lo largo de una sección. Esta característica de la intensidad en función de la distancia también se manifiesta en los ensayos de laboratorio de manera muy similar, como se puede observar en la figura 5.25.

La intensidad del primer autotransformador, I_{A1} , crece progresivamente con la distancia a la falta hasta alcanzar su máximo valor cuando la falta ocurre en el punto donde se encuentra dicho autotransformador, descendiendo a partir de ese punto. Por otro lado, la intensidad en el autotransformador intermedio, I_{A2} , aumenta su valor en la segunda subsección, alcanzando su máximo en el km 20 que es donde se encuentra dicho autotransformador. Desde ese punto, decrece hasta alcanzar el final de la línea estudiada. Finalmente, la intensidad en el

autotransformador más alejado, I_{A3} , crece hasta alcanzar su máximo en el kilómetro 30 que es donde se encuentra dicho autotransformador.

A su vez, se comprueba que los máximos alcanzados por las intensidades de los tres autotransformadores decrecen a medida que el autotransformador se encuentra más alejado de la subestación de tracción. Esto tiene sentido ya que, a medida que nos alejamos de la subestación, hay más impedancia de línea, con lo que disminuye la intensidad en los autotransformadores.

Como se comentó en apartados anteriores, cuando las faltas tenían lugar en determinadas posiciones de la sección, las intensidades en alguno de los autotransformadores no eran lo suficientemente elevadas como para hacer disparar los relés, haciéndose necesario el uso de pinzas amperimétricas y multímetros para poder realizar la medición de dichas intensidades.

5.3.2.1.2 Faltas entre alimentador y carril

De la misma forma que se describió en el apartado anterior de faltas entre catenaria y carril, el proceso de conseguir realizar las faltas alimentador-tierra a lo largo de toda la sección también se realizó mediante la instalación y ajuste adecuados de las impedancias $Z1$ y $Z2$, pero en este caso a lo largo del conductor alimentador negativo.

El proceso que se realizó cuando las faltas eran alimentador-tierra sin circulación de trenes fue totalmente similar al proceso representado en la figura 5.24 relativo a obtener las intensidades en los autotransformadores cuando las faltas que sucedían a lo largo de toda la sección eran catenaria-tierra. En la figura 5.26 se representa el esquema con el que se hicieron los ensayos de faltas entre alimentador negativo y tierra sin circulación de trenes. La figura muestra la instalación de las impedancias para la realización de las faltas a lo largo de la primera mitad de la subsección intermedia.

Con el esquema descrito, se obtienen los gráficos que muestran dichas intensidades I_{A1} , I_{A2} e I_{A3} en función de la distancia a las faltas en alimentador y sin circulación de trenes en la sección, y que están mostrados en la figura 5.27.

Figura 5.26: Esquema para realización de faltas alimentador-tierra a lo largo de la sección ferroviaria sin circulación de trenes

Figura 5.27: Distribución de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a las faltas entre alimentador y carril sin que haya circulación de trenes

Como se puede observar, la gráfica sigue una evolución similar con respecto a los ensayos de faltas entre catenaria y carril. También en este caso sucede que la intensidad del primer autotransformador crece hasta el kilómetro 10 donde alcanza su máximo y desde entonces decrece; la intensidad del autotransformador dos crece hasta el kilómetro 20 y desde ese máximo decrece hasta el kilómetro 30; y la intensidad del tercer autotransformador crece hasta alcanzar su máximo al final de la sección estudiada que coincide con el punto donde se encuentra dicho autotransformador.

La similitud encontrada en los resultados de las intensidades en ambos casos, faltas catenaria-carril y faltas alimentador-carril tiene sentido, ya que en el circuito se han empleado las mismas impedancias de línea para catenaria y alimentador, y no hay consumo de potencia por circulación de trenes en la sección.

5.3.2.2 Ensayos de intensidades en los autotransformadores cuando hay circulación de trenes

Se realizaron ensayos acerca de la influencia del consumo de potencia de los trenes sobre las intensidades en los autotransformadores cuando se producen faltas a tierra a lo largo de toda la sección. La circulación de los trenes se simuló mediante la conexión de una resistencia entre catenaria y carril, ya que el factor de potencia de los trenes en la actualidad es muy próximo a la unidad. Para estudiar dicha influencia cuando los trenes circulaban en las distintas subsecciones se hicieron estas conexiones en los puntos medios de las tres subsecciones. Incluso, se hicieron dos conexiones a la vez para simular la circulación de dos trenes en la sección mientras se realizaban los cortocircuitos a lo largo de toda la sección. Estos ensayos se hicieron tanto con faltas catenaria-tierra como con faltas alimentador-tierra en todos los puntos de la sección.

En la figura 5.28 se puede observar la resistencia R conectada entre catenaria y carril simulando un tren que circula por la subsección intermedia.

Figura 5.28: Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la sección mediante la resistencia R

La disposición física de esta resistencia en el simulador de laboratorio se muestra en la figura 5.29. Se observa en ella que está formada por dos resistencias en serie. El resto de los elementos del simulador y su disposición son los mismos que cuando se realizaron los ensayos de obtención de intensidades de los autotransformadores en función de la distancia sin circulación de trenes.

5.3.2.2.1 Faltas entre catenaria y carril con un tren

Los ensayos de faltas catenaria-tierra se realizaron de acuerdo al esquema que se muestra de la figura 5.30. En el caso mostrado en ella, el tren se situó en el punto medio de la sección, aunque los ensayos completos se hicieron con el tren situado en el punto medio de cada una de las tres subsecciones.

Figura 5.29: Disposición física de las resistencias que simulaban la circulación de trenes en los ensayos de laboratorio para la obtención de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta

Figura 5.30: Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la subsección intermedia con faltas catenaria-carril a lo largo de toda la sección

5.3.2.2.1.1 Tren en la primera subsección

Los valores del módulo de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta en catenaria que se midieron en el laboratorio cuando el tren simula su circulación por la mitad de la primera subsección se pueden observar en la figura 5.31.

Figura 5.31: Diagrama de intensidad-distancia con faltas catenaria-tierra. Un tren circulando en el punto medio de la primera subsección

5.3.2.2.1.2 Tren en la segunda subsección

En la figura 5.32 se muestran las intensidades en los autotransformadores cuando se realizan faltas catenaria-carril cada 0,5 km manteniendo en todo momento la resistencia que simula la circulación de un tren en el punto medio de la subsección intermedia.

Figura 5.32: Distribución de intensidades en los autotransformadores en los ensayos con tren en la segunda subsección con faltas entre catenaria y carril

5.3.2.2.1.3 Tren en la tercera subsección

El valor de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta cuando había un tren circulando en la mitad de la tercera subsección con faltas catenaria-tierra a lo largo de toda la sección se muestran en la figura 5.33.

5.3.2.2.2 Faltas entre alimentador y carril con un tren

Los ensayos de faltas entre alimentador negativo y tierra se realizaron de acuerdo al esquema que se muestra de la figura 5.34.

Figura 5.33: Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con tren en la tercera subsección con faltas entre catenaria y carril

Figura 5.34: Esquema de la simulación de un tren circulando por el punto medio de la primera subsección con faltas alimentador-carril a lo largo de toda la sección

En el ejemplo que se muestra en dicha figura, el tren se situó en el punto medio de la primera subsección, aunque los ensayos también se hicieron con el tren situado en el punto medio de las otras dos subsecciones.

5.3.2.2.2.1 Tren en la primera subsección

Los valores resultantes del módulo de las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia a la falta en alimentador que se midieron en el laboratorio cuando el tren circula por la mitad de la primera subsección se pueden observar en la figura 5.35.

Figura 5.35: Distribución de intensidades en los autotransformadores en los ensayos con tren en la primera subsección con faltas entre alimentador y carril

5.3.2.2.2.2 Tren en la segunda subsección

En la figura 5.36 se muestran los resultados obtenidos de las intensidades en los autotransformadores con un tren circulando en la segunda subsección cuando se hicieron las faltas entre el alimentador y el carril a lo largo de todas las posiciones de la sección.

Figura 5.36: Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con tren en la segunda subsección con faltas alimentador-tierra

5.3.2.2.2.3 Tren en la tercera subsección

Los valores del módulo de las intensidades en los autotransformadores que se midieron en el laboratorio, cuando el tren simula su circulación por la mitad de la tercera subsección, en función de la distancia a la falta alimentador – tierra se pueden observar en la figura 5.37.

Figura 5.37: Diagrama de intensidad-distancia con faltas alimentador-tierra. Un tren circulando en el punto medio de la tercera subsección

5.3.2.2.3 Faltas con dos trenes circulando

Como se puede observar en la figura 5.38, también se han hecho ensayos en el laboratorio para medir las intensidades en los autotransformadores en función de la distancia de la falta a tierra a la subestación de tracción en el caso de que estén circulando al mismo tiempo dos trenes dentro de la misma sección. La disposición con la que se hicieron estos ensayos fue con un tren circulando por el punto medio de la primera subsección y el otro en la tercera subsección. En la figura 5.38 se puede ver la situación de los trenes dentro de la sección cuando ocurre una falta entre alimentador y tierra.

Para conseguir realizar de manera práctica la simulación en el laboratorio de este segundo tren se dispuso la conexión de una segunda resistencia R igual a la de la figura 5.28 conectada entre los conductores de catenaria y carril.

Los ensayos se hicieron, tanto con faltas a lo largo de toda la sección entre catenaria y tierra, como con faltas, también en todas las posiciones de la sección, entre alimentador y tierra.

Figura 5.38: Esquema de la simulación de dos trenes circulando por el punto medio de la primera y la tercera subsección con falta alimentador-carril

5.3.2.2.3.1 Faltas entre catenaria y carril

Los resultados de las intensidades en los autotransformadores con faltas catenaria-tierra cuando hay dos trenes circulando, uno en el punto medio de la primera sección, y otro en el punto medio de la tercera, se muestran en la figura 5.39.

5.3.2.2.3.2 Faltas entre alimentador y carril

Asimismo, en la figura 5.40 se pueden observar los valores de los módulos de intensidad en los autotransformadores en función de la distancia a la falta alimentador-tierra cuando hay dos trenes circulando, uno en la primera subsección y otro en la tercera.

Figura 5.39: Valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia en los ensayos con trenes en la primera y tercera subsección con faltas entre catenaria y carril

Figura 5.40: Valores de intensidades en los autotransformadores en función de

la distancia en los ensayos con dos trenes en la primera y tercera subsección
con faltas alimentador-tierra

5.3.3 Comparación de los resultados de las intensidades en autotransformadores obtenidas en laboratorio

De los valores obtenidos en el laboratorio que se han representado en las gráficas de las páginas anteriores, se ha realizado una comparación entre los resultantes de diferentes situaciones de circulación de los trenes cuando ocurren las faltas a tierra, observándose las diferencias en orden a obtener la localización de faltas en las diversas situaciones. En particular, se han realizado dos comparaciones mediante las gráficas de las figuras 5.41 y 5.42.

Se puede apreciar en la figura 5.41 las diferencias existentes en las intensidades I_{A1} , I_{A2} e I_{A3} de los autotransformadores en caso de que no haya ningún tren circulando (0t) y en caso de un tren circulando en la subsección intermedia (1t2) cuando ocurren faltas entre catenaria y tierra.

Figura 5.41: Comparación de valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas entre catenaria y tierra. Ensayos comparando faltas

cuando no hay circulación de trenes (0t) con faltas cuando circula un tren en la segunda subsección (1t2)

Asimismo, en la figura 5.42 se muestran las intensidades I_{A1} , I_{A2} e I_{A3} en los autotransformadores en función de la distancia de la falta a la subestación cuando se producen faltas entre alimentador y tierra. En ella se comparan tres casos con diferentes circulaciones de trenes. En el primer caso se muestran los valores obtenidos cuando no hay circulación de trenes (0t), en el segundo los medidos cuando un tren circula por la subsección más alejada (1t3), y los valores obtenidos en el tercer caso reflejan la situación de dos trenes circulando (2t1y3), uno en la subsección más cercana y otro en la más alejada.

Figura 5.42: Comparación de valores de intensidades en los autotransformadores en función de la distancia con faltas entre alimentador y tierra. Ensayos comparando faltas cuando no hay circulación de trenes (0t), cuando circula un tren en la tercera subsección (1t3), y con dos trenes, uno en la primera subsección y otro en la tercera (2t1y3)

De la comparación expuesta en las dos últimas gráficas se puede deducir que las variaciones de los módulos de las intensidades en los autotransformadores son muy poco importantes en las diversas situaciones de circulación de los trenes cuando ocurren faltas a tierra, tanto entre catenaria y carril como entre alimentador y carril. Que las variaciones encontradas sean de pequeña magnitud, coincide con los resultados de la simulación expuestos en el capítulo anterior. Es por lo que se puede decir que este método de localización de la posición de una falta a tierra en sistemas 2×25 kV no se ve prácticamente afectado por las diferentes situaciones de circulación de los trenes en la sección estudiada.

5.4 Conclusiones

Los ensayos realizados en el laboratorio, en orden a corroborar los resultados obtenidos en la simulación por ordenador de este nuevo método de localización de faltas a tierra en sistemas 2×25 kV, se han descrito en este capítulo.

Se ha detallado en primer lugar el esquema del circuito y los componentes empleados para el ensayo a escala en el laboratorio de una instalación de un sistema 2×25 kV. A continuación, se han definido los dispositivos empleados para la medida de los resultados obtenidos, así como para la protección del circuito de ensayo en laboratorio. A causa de que el método consta de dos etapas en las que es necesario medir parámetros diferentes en la primera etapa que los medidos en la segunda, la descripción de los dispositivos de medida y de los ensayos se ha realizado particularizándolos para cada etapa.

En los ensayos de la primera etapa, de obtención del conductor y subsección en falta, se han obtenido las medidas de los ángulos que formaban las intensidades con las tensiones en catenaria en los autotransformadores cuando sucedían faltas a tierra, tanto catenaria-carril como alimentador-carril. Con dichos ángulos calculados en un relé de sobreintensidad se activan, según sean los valores de dichos ángulos, determinadas salidas del relé. Estas salidas se envían a un ordenador lógico programable (PLC), que, en función de una tabla previamente programada, obtiene en qué subsección y en qué conductor ha ocurrido la falta, y envía el resultado a un ordenador para su presentación en una pantalla de información al operador.

Para la realización de los ensayos de la segunda etapa en el laboratorio, se hicieron modificaciones en el simulador en orden a la obtención de las intensidades en los autotransformadores cuando ocurrían faltas a tierra, entre catenaria y carril y entre alimentador y carril, en todos los puntos de la sección. En primer lugar, se obtuvieron los valores de dichas intensidades cuando se realizaban las faltas a tierra sin añadir al circuito ningún componente que simulara algún tren en circulación en algún punto de la sección. Posteriormente se hicieron las medidas de los valores de intensidad en los autotransformadores cuando se instalaba una resistencia entre catenaria y tierra en diversos puntos de la sección, simulando la circulación de un tren en dicha sección cuando ocurrían las faltas a tierra. También se hicieron ensayos con la instalación de dos resistencias en orden a simular la circulación de dos trenes en puntos diferentes de la sección.

La comparación de las intensidades de los autotransformadores obtenidas en el laboratorio se muestra en las gráficas del apartado 5.3.3. Estas gráficas reflejan la pequeña variación sufrida en los distintos casos y muestran la validez del método con la circulación de estos trenes en la sección. Asimismo, corroboran los resultados obtenidos en la simulación por ordenador.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

En esta tesis se ha desarrollado un nuevo método de localización de faltas a tierra en sistemas de electrificación ferroviaria alimentados mediante corriente alterna en 2×25 kV. Este sistema 2×25 kV tiene instalados autotransformadores a intervalos regulares en la línea eléctrica de alimentación ferroviaria. Por ello, para localizar la posición de una falta a tierra no es posible utilizar el tradicional método con relés de distancia que se emplea en otros sistemas de alimentación de corriente alterna. En el análisis del estado del arte se analizan diversos métodos que emplean técnicas diferentes. El método aquí descrito está basado en la obtención en el momento de la falta a tierra del valor de las intensidades en los autotransformadores y de las tensiones en el conductor positivo de alimentación ferroviaria en los puntos de contacto con los autotransformadores.

De acuerdo con el capítulo 3, una vez realizado el primer paso de obtener las medidas de intensidades y tensiones en los autotransformadores en el momento en que ocurre la falta a tierra, el proceso de localización consta de dos etapas. La primera consiste en identificar en qué conductor, positivo o negativo, y en qué subsección está el punto en que ha ocurrido la falta. En este método las subsecciones están delimitadas por los autotransformadores incluidos en una sección, siendo la subestación de tracción la que alimenta una sección en cada dirección. Para identificar la subsección y el conductor en falta se comparan los valores de los módulos de las intensidades en los devanados de los autotransformadores, así como los ángulos entre las intensidades en los autotransformadores y las tensiones en catenaria en la unión con los autotransformadores. La subsección en falta será la comprendida entre los dos autotransformadores que hayan sufrido un fuerte incremento en sus valores de intensidad

al ocurrir la falta a tierra, así como una variación importante de los ángulos. En el caso en que solamente en el primer autotransformador se produzca el notable incremento del valor de su intensidad y la variación del ángulo, la falta se habrá producido en la primera subsección, es decir, entre la subestación de tracción y el primer autotransformador. Para obtener el conductor en el que ha sucedido la falta a tierra, se comparan los ángulos que había en el momento de la falta entre la fase de la intensidad en el devanado de cada autotransformador y la fase de la tensión entre el conductor positivo o catenaria y tierra en el punto de conexión a cada autotransformador. Según se ha expuesto, se produce en el momento de la falta a tierra un incremento positivo o negativo de aproximadamente 90° de dichos ángulos únicamente en los autotransformadores que delimitan la subsección en que ha ocurrido la falta a tierra. Si dicho incremento es negativo, la falta a tierra ha sucedido entre el conductor positivo y tierra. Y viceversa, si el incremento es positivo, la falta habrá acontecido entre el conductor negativo y tierra. De igual manera que con el módulo de la intensidad, en caso de que la falta sea en la primera subsección se producirá un incremento positivo o negativo del ángulo intensidad-tensión únicamente en el primer autotransformador.

En la segunda etapa, los valores de intensidad en los devanados de los autotransformadores obtenidos en el momento de la falta se comparan con los valores de las tablas intensidad-distancia de esa sección en particular, previamente almacenados en la memoria de un ordenador y teniendo en cuenta la información de la subsección y el conductor en los que ha ocurrido la falta a tierra. Dependiendo de la identificación del conductor realizado en la primera etapa, se realizará la comparación de la intensidad obtenida con los valores de la tabla en memoria correspondiente a la de faltas a tierra de ese conductor en particular. Y dependiendo de la identificación de la subsección obtenida, se comparará el valor de las intensidades obtenidas en el momento de la falta de los dos autotransformadores que delimitan la subsección en falta con los valores de dichos autotransformadores en esa tabla de memoria. Del valor de distancia en esta tabla correspondiente a la intensidad, se obtendrá la localización del punto de falta según el procedimiento detallado en el capítulo 3. En el caso de que la falta sea en la primera subsección, únicamente se hará la comparación de la intensidad obtenida en el primer autotransformador con la intensidad correspondiente de la tabla de memoria, para obtener la posición de la falta a tierra.

6.2 Aportaciones originales

Este método de localización tiene como característica emplear los valores de los ángulos de fase de las intensidades de los autotransformadores y los de la fase de las tensiones en el conductor positivo (aunque es completamente equivalente si las medidas se toman en el conductor negativo teniendo en cuenta el cambio en la variación de los ángulos de fase).

Otra característica del método es la gran ventaja que supone obtener de manera rápida la subsección y el conductor en falta, ya que la información obtenida en la primera etapa de dicho método permite aislar solamente y de manera rápida el intervalo de ese conductor afectado, sin interferir en el resto de la circulación de trenes.

Asimismo, el método únicamente necesita tener instalados dispositivos que normalmente están ya incluidos en el equipamiento inicial de las estaciones de autotransformadores, como son los relés de sobreintensidad direccional, las líneas de comunicaciones y el sistema informático en el Centro de Control de tráfico ferroviario. En el caso de que las estaciones de autotransformadores no tuvieran equipamiento inicial del relé de sobreintensidad direccional, este método continuaría siendo económico ya que el coste de instalar dichos relés sería mucho menor que el coste de instalar en ellas relés de distancia que utilizan otros métodos.

Como se puede observar en el capítulo de simulación por ordenador en el que se han hecho las comprobaciones en secciones con dos, tres y cuatro subsecciones, este método es válido para cualquier número de subsecciones en una sección que tenga conductores positivo y negativo de alimentación y autotransformadores.

6.3 Trabajos futuros

Aunque se puede observar que también se ha simulado el funcionamiento del método con factores externos que puedan influir en su comportamiento y se han efectuado numerosas pruebas en el laboratorio, es preciso realizar una prueba de campo en una sección de una

línea de alta velocidad para comprobar de manera fehaciente el funcionamiento y la viabilidad de este método.

Bibliografía

Agarwal, K.K. (2002). “Automatic fault location and isolation system for the electric traction overhead lines”. En: *ASME/IEEE Joint Railroad Conference, 2002*, Washington, USA, pp.117-122.

Andrade, V. de; Sorrentino, E. (2010). “Typical expected values of the fault resistance in power systems”. En: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, Sao Paulo, pp. 602-609.

Areva T&D (2002). “Network Protection & Automation Guide”. 1ª ed., Jul. 2002, Cap. 20, pp.353-369.

Bhalja, B. ; Maheshwari, R.P. (2007). “High speed protection scheme for traction OHE of 25 kV AC Indian railway system”. En: *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, IEEE, New Orleans, USA, pp. 904-910.

Battistelli y otros (2008). “Short Circuit Modelling and Simulation of 2×25 kV High Speed Railways”. En: *2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, IEEE, pp. 702-707.

Caires, L. de (2014). “Estudio de protecciones eléctricas en sistemas ferroviarios de alta velocidad”. Trabajo fin de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2014.

Capasso, A.; Ghilardi, G.; Buffarini, G.G. (2010). “Bologna - Florence High speed railway line: MV emergency traction power supply, operating conditions and PQ issues”. En: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, IEEE, 2010, Bologna, Italia, pp 5.

Cesario, P.; Firpo, P. ; Savio, S. (1993), “Protection setting in 2x25 kV 50 Hz railway traction systems by digital simulation”. *Transactions on Engineering Sciencies*, vol.3, 1993 WIT Press, ISSN 1743-3533, pp. 297-306.

Chamorro, A. (2005). “Protecciones de distancia: guía de aplicación”. Madrid, Areva T&D Ibérica, 1ª ed., may. 2005.

Chang, C.S.; Feng, T.; Khambadkone, A.M. y Kumar, S. (2000). “Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform”. En: *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, IET, 2000, vol. 147, no. 6, pp. 520-526.

Chen, T.; Hsu, Y. (1998). “Systematized short-circuit analysis of a 2×25 kV electric traction network”. *Electric Power Systems Research*, 1998, vol. 47, pp. 133–142.

Chen, P.; Xu, B.; Li, J. (2009). “The Optimized Combination of Fault Location Technology Based on Traveling Wave Principle”. En: *Power and Energy Engineering Conference. APPEEC 2009*. Asia-Pacific, Wuhan, China, pp. 5.

Cornah, T. y otros. (2008). “Short circuit analysis tool using 3rd generation (3G) mobile technology”. En: *IET 9th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2008)*, Glasgow, UK, p. 643 – 647.

Cosulich, G.; Firpo, P.; Savio, S. (1996). “Electrical substation dependability analysis for high speed railway systems: a simplified approach”. *Transactions on the Built Environment* vol 18, 1996 WIT Press, ISSN 1743-3509, pp. 139- 148.

Courtois, C. (1993-1). “Why the 2x25 kV alternative? (autotransformer traction supply)”. En: *IEE Colloquium on 50kV Autotransformer Traction Supply Systems - the French Experience*, IET, 1993, London,UK, pp. 1/1 – 1/4.

Courtois, C. (1993-2). “Earthing, protection, miscellaneous (of railway power systems)”. En: *IEE Colloquium on 50kV Autotransformer Traction Supply Systems - the French Experience*, IET, 1993, London,UK, pp. 4/1 – 4/3.

Duan, J.; Xue, Y.; Xu, B.; Sun, B. (2010). “Study on technology of traveling wave method fault location in traction power supply system”. En: *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change*, Manchester, UK, pp. 5.

Fujie, H.; Miura, A. (1976). “Fault Location System in Autotransformer Feeding Circuit of ac Electric Railways”. *Electrical Engineering in Japan*, 1976, Vol. 96, No 5, pp. 96-105.

- Gao S.; He W.; Chen X. (1993). "Study on complex grounding fault protection with high-impedance for AT feeding traction system". En: *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, IET, 1993, York, UK, pp. 264-266.
- Guo, W. (2014). "Application of traveling wave in fault location of traction power system". En: *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, pp. 3.
- Han, Z.; Liu, S.; Gao, S.; Bo, Z. (2010). "Protection scheme for China high-speed railway". En: *10th IET International Conference on, Developments in Power System Protection (DPSP 2010)*. Managing the Change, Manchester, pp. 5.
- Han, Z.; Zhang, Y.; Liu, S.; Gao, S. (2011). "Modeling and simulation for traction power supply system of high-speed railway". En: *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC 2011 - Proceedings*, IEEE, Wuhan, China, pp. 4.
- Han, Z.; Dong, Z.; Gao, S.; Bo, Z. (2012). "Protection scheme for out-of-phase short-circuit fault of traction feeding network". En: *11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*, IET, Birmingham, UK, pp. 4.
- Hewings, D. B.; Chen J.; Storey A.P. (2008). "Application of a New Distance Protection Scheme to a Single-Pole Autotransformer Electrification System on the UK West Coast Main Line Railway". En: *2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008)*, Glasgow, pp. 56-61.
- Hill, R.J. (1994). "Electric railway traction. Part 3. Traction power supplies". *Power Engineering Journal*, 1994, vol. 8, no. 6, pp. 275-286.
- Hill, R.J.; Cevik, I.H. (1993). "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1993, vol. 42, no. 3, pp. 365-372.
- Huang, Y. y otros. (2004). "Research of implementing least squares in digital distance relaying for AC electrified railway". En: *Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, IET, 2004, Amsterdam, Netherlands, pp. 116-118.

Jiménez, O.R. (2015) “Laboratorio Protecciones. Módulo II-5 Transformadores de instrumentos”. Disponible en: <http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/SE/5.pdf>.

Jung, H. y otros. (2004) “A study on relay setting for AT feeding system protection using PSCAD/EMTDC”. Disponible en <http://joa.csee.org.cn/Public/DownloadFile.aspx?FileStorageId=e94545b9-edd3-404e-98c8-617cee36a1b2>.

Kiessling, F.; Puschmann, R.; Schneider, A. (2001). “Contact Lines for Electric Railways”. Munich: Siemens Aktiengesellschaft, 2001, ISBN: 3-89578-152-5.

Kneschke, T.A.; Hong, J.; Natarajan, R.; Naqvi, W. (1995). “Impedance calculations for SEPTA's rail power distribution system”. En: *Proceedings of the 1995 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, Baltimore, USA, pp. 79-85.

Knights, D.C. (2013). “Protection for DC substations and AC track feeder stations”. En: *Proceedings of the 6th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems*, 2013, London, UK, pp. 97-107.

Kuipers, K.; Tschiedel, H.; König, F. (2008). “25 kV AC Railways Overhead Contact System Protection - A Comparison Between the Traditional Approach and Alternative Low-Cost Solution”. En: *2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008)*, Glasgow, UK, pp. 62-67.

Lee, S.; Kim, J.; Jung, H. (2004). “Analysis of catenary voltage of an AT-fed AC HSR system”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, vol. 53, no. 6, pp. 1856-1862.

Lee, H.; Kim, G.; Oh, S.; Jang, G.; Kwon, S. (2006), “Fault analysis of Korean AC electric railway system”, *Electric Power Systems Research*, 2006, vol. 76, no. 5, pp. 317-326.

Lee, H.; Oh, S.; Kim, G.; An, C. (2009). “A Study on the Equivalent Conductor Representation of AC Electric Railway System”. En: *2009 International Conference on Information and Multimedia Technology*, IEEE, Jeju Island, South Korea, pp. 33-37.

Li, G.; Lin, G.S. (2012). “Short Circuit Impedance Analysis for Novel AT Power Traction Network”. En: *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, IEEE, Shanghai, China, pp. 5.

Lin, G.S.; Li, Q.Z. (2010). “Impedance Calculations for AT Power Traction Networks with Parallel Connections”. En: *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, IEEE, Chengdu, China, pp. 5.

Maheshwari, R.P.; Verma, H.K. (1997). “Adaptive digital relay for comprehensive distance protection of traction overhead equipment”. En: *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection* (Conf. Publ. No. 434), IET, 1997, Nottingham, UK, pp. 331-337.

Marchi, M.; Leonhardt, G.; Rivetti, G. (2000). “¿SF6 o vacío? En busca del interruptor idóneo para Tensión Media”. *Revista ABB*, N° 4, 2000, págs. 26-34, ISSN 1013-3135.

Martínez, M. (2006). “Técnicas modernas de protección de líneas de transporte utilizando transformaciones tiempo-frecuencia y herramientas de reconocimiento de patrones”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2006.

McQuillan, D.J. (1997). “Development in protection for 25 kV AC electrified lines on British Railways “En: *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection* (Conf. Publ. No. 434), IET, 1997, Nottingham, UK, pp. 327-330.

Menter, F.; Kaltenbach, M. (1999). “Considerations for AC railway traction power equipment-cost or performance-contradiction or challenge?”. En: *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999 IEEE*, Edmonton, pp. 463-465.

Menuet, J.P. (1993). “The autotransformer and other equipment (for railway power supply)”. En: *IEE Colloquium on 50kV Autotransformer Traction Supply Systems - the French Experience*, IET, 1993, London, UK, pp. 3/1-3/4.

Millard, A.; Taylor, I. A.; Weller, G. C. (1995). “AC Electrified railways – protection and distance to fault measurement”. En: *1995 International Conference on Electric Railways in a United Europe*, IET, Amsterdam, Netherlands, pp. 73-77.

Montané, P. (1988). “Protecciones en las instalaciones eléctricas: evolución y perspectivas”. Barcelona, Marcombo, 1988.

Natarajan, R. y otros. (1997). “Short circuit currents of the SEPTA traction power distribution system”. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1997, vol. 3, no. 6, pp. 52-59.

Nikouee, S.; Ledbetter, T. (2006). “DC traction power supply and distribution system for MARTA's Armour Yard Rail Services Facility”. En: *Proceedings of the 2006 IEEE/ASME Joint Rail Conference*, Atlanta, USA, pp. 241-252.

Noroozi, N. y otros. (2015). “Fault analysis on AC railway supply system”. En: *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*, IEEE, 2015, Tehran, Iran, pp. 567-572.

Pastor, A.; Ortega, J.; Parra, V.; Pérez, A. (2003). “Circuitos Eléctricos”. Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2003, vol.1, pp. 243-253.

Pilo, E. (2003). “Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad”. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Pontificia de Comillas. Madrid, 2003.

Pilo, E; Rouco, L.; Fernández, A. (2003).” A reduced representation of 2x25kV electrical systems for high-speed railways”. En: *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference*, Chicago, USA, pp. 199-205.

Pudney, E.; Wales, R. (2001). “Optimised overhead line maintenance on 25 kV electrified railways using remotely monitored distance protection”. En: *2001 Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE)*, Amsterdam, Netherlands, pp. 495-498.

Richards, S.H. (1997). “Application benefits of modern microprocessor distance protection for AC electrified railways”. En: *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*, IET, 1997, Nottingham, UK, pp. 338-341.

Serrano, J.; Platero, C.A.; López-Toledo, M; Granizo, R. (2015). “A Novel Ground Fault Identification Method for 2×25 kV Railway Power Supply Systems”. *Energies*, 2015, vol. 8, pp. 7020–7039.

Serrano, J.; Platero, C.A.; López-Toledo, M; Granizo, R. (2017). "A New Method of Ground Fault Location in 2×25 kV Railway Power Supply Systems". *Energies*, 2017, vol. 10, no.340

Sezi, T. y Menter, F.E. (1999). "Protection scheme for a new AC railway traction power system". En: *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference*, New Orleans, USA, pp.388-393.

Senol, I.; Gorgun, H. y Aydeniz, M. (1998). "General comparison of the electrical transportation systems that are fed with 1×25 kV or 2×25 kV and expectations from these systems". En: *9th Mediterranean Electrotechnical Conference, 1998. MELECON 98*, IEEE, Tel Aviv, Israel, vol. 2, pp. 885-887.

Shahnia, F. y Esmailzadeh, R. (2005). "Voltage unbalance problems and solutions for electrified railway systems". En: *7th International Conference Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe (MET) 2005*, Research Repository, Warsaw, Poland, pp. 5.

Shenoy, U.J. y otros. (2004). "Matlab/psb based modeling and simulation of 25 KV AC railway traction system- A particular reference to loading and fault conditions". En: *2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004*, Chiang Mai, Thailand, vol. C, pp. 508-511.

Steimel, A. (2012). "Power-electronic grid supply of AC railway systems". En: *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, IEEE, 2012, Brasov, Romania, pp.16-25.

Suárez, J.M. (2011). "Protección de instalaciones y redes eléctricas". Santiago de Compostela: Andavira Editora, 2ª ed., 2011.

UNE 21302-601/1M (2000). "Vocabulario electrónico. Producción, transporte y distribución de la energía eléctrica. Generalidades". *AENOR*, 2000.

UNE-EN 60044-1 (2000). "Transformadores de medida. Parte 1: Transformadores de intensidad". *AENOR*, 2000.

Wales, R.; Pudney, E. y Lumley, B. (2004). "Protection at the heart of railway asset management". En: *2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection*, IET, Amsterdam, Netherlands, vol. 1, pp. 307-310.

Wang, X.; Qian, Q y Chen, W. (2002). “Analyzing fault-induced transients with wavelets“. En: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002*, Chicago, USA, vol. 3, pp. 1090-1093.

Wang, C. y Yin, X. (2012). “Comprehensive Revisions on Fault-Location Algorithm Suitable for Dedicated Passenger Line of High-Speed Electrified Railway”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2415-2417.

Wedepohl, L.M. y Jackson, L. (2002). “Modified nodal analysis: an essential addition to electrical circuit theory and analysis”. *Engineering Science and Education Journal*, 2002, vol. 11, no. 3, pp. 84–92.

Weller,G.C. y Hindle,P.J. (1989). “Microprocessor based protection for AC railway supplies”. En: *International Conference on Main Line Railway Electrification 1989*, IET, York, UK, pp. 144-148.

White, R. D. (2010). AC/DC “Railway electrification and protection”. En: *2010 IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, London, UK, pp. 233-258.

Wu, K. y otros (2011). “Fast practical short-circuit current calculation method based on sequence component in V/v structure traction transformer for electrified railway”. En: *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, IEEE, Weihai, China, pp. 1407-1411.

Xia, M. y Wu, M. (2009). “Traveling wave fault location scheme for Jing-Jin Dedicated Passenger Line electric railway traction system”. En: *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG '09*, IEEE, 2009, Lisboa, Portugal, pp. 447-449.

Xu, G.; Zhou, Y. y Chen, Y. (2013). “Model-Based Fault Location with Frequency Domain for Power Traction System”. *Energies*, 2013, vol. 6, pp. 3097–3114.

Zhang, D.; Wu, M. y Xia, M. (2009). “Study on traveling wave fault location device for electric railway catenary system based on DSP”. En: *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09, IEEE, 2009*, Nanjing, China, pp. 4.

Zhao, T. y Wu, M. (2011). “Electric power characteristics of all-parallel AT traction power supply system”. En: *2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE)*, IEEE, Changchun, China, pp. 895-898.

Zhou, Y.; Xu, G. y Chen, Y. (2012). “Fault location in power electrical traction line system”. *Energies*, 2012, vol. 5, pp. 5002-5018.