

**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  

---

**ESCUELA POLITÉCNICA  
SUPERIOR DE JAÉN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**

**TESIS DOCTORAL  
PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA  
MEDIANTE TÉCNICAS BASADAS EN LA  
TRANSFORMADA WAVELET**

**PRESENTADA POR:  
CARLOS LUIS SÁNCHEZ MARTOS**

**DIRIGIDA POR:  
DR. D. FRANCISCO JURADO MELGUIZO  
DR. D. MANUEL GÓMEZ GONZÁLEZ**

**JAÉN, 28 DE SEPTIEMBRE DE 2017**

**ISBN 978-84-9159-309-6**



---

**PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA MEDIANTE TÉCNICAS BASADAS EN LA  
TRANSFORMADA WAVELET**

---

Por

CARLOS LUIS SÁNCHEZ MARTOS

Vº Bº de los directores de la tesis:

Fdo: Francisco Jurado Melguizo

Fdo: Manuel Gómez González

Trabajo presentado para optar al grado de Doctor por la Universidad de Jaén



## Resumen

Durante la conexión de un transformador a la red se presentan unas intensidades por los devanados del primario muy elevadas con relación a la intensidad asignada y con un gran contenido en armónicos debido al fenómeno transitorio de creación del campo magnético dentro de la máquina así como a la saturación del núcleo durante el mismo.

Éste fenómeno, también conocido como energización del transformador, presenta varios efectos negativos, entre ellos el disparo intempestivo de la protección diferencial asociada al transformador. Se trata de una actuación no deseable del sistema de protección diferencial ya que la conexión a la red de un transformador es una maniobra usual y no supone una situación que suponga un peligro para el mismo.

Esta tesis tiene como principal objetivo el desarrollo de un sistema de protección diferencial de transformadores que evite el disparo no deseado de la protección en la energización del transformador utilizando la transformada wavelet como método de discriminación de intensidades de conexión.

Para ello se desarrolla un modelo de relé diferencial completo que es sometido a ensayo de comportamiento de diferentes situaciones de funcionamiento del transformador de potencia. El modelo así como todos los ensayos se realizan mediante la herramienta informática Matlab/Simulink.

Para ello esta tesis se estructura en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se presentan los antecedentes y el desarrollo histórico de la protección de transformadores, centrándose fundamentalmente en la protección diferencial y los problemas relacionados con la misma.
- Capítulo 2: Transformada wavelet. En este capítulo se presenta la transformada wavelet como herramienta matemática para el análisis de señales que permite obtener información de las mismas tanto en el campo de la frecuencia como en el campo del tiempo.
- Capítulo 3: Algoritmo de discriminación y modelado del relé. En este capítulo se presenta un novedoso algoritmo que permite diferenciar las intensidades de energización de las intensidades de falta del transformador, y que es la base de este trabajo. Además se realiza el modelado completo del relé diferencial que implementa dicho algoritmo de discriminación.
- Capítulo 4: Simulación del modelo. En este capítulo se presentan los resultados de los diferentes casos de estudio llevados a cabo para la comprobación del comportamiento del relé ante diversas situaciones de funcionamiento del

transformador, energización, falta interna y falta externa. Los casos de estudio fueron realizados para tres tipos de transformadores diferentes.

- Capítulo 5: Conclusiones y futuras realizaciones. En este capítulo se presentan las conclusiones extraídas de esta tesis así como las futuras realizaciones que se derivan de la misma.

---

## 1. Tabla de contenido

<b>2. Introducción.....</b>	<b>17</b>
2.1. Antecedentes.....	17
2.2. Desarrollo histórico.....	18
2.2.1. El transformador eléctrico.....	18
2.2.2. Sistemas de protección.....	19
2.3. La protección diferencial.....	23
2.3.1. Evolución histórica de la protección diferencial.....	23
2.3.2. Principios básicos.....	24
2.3.3. Protección diferencial utilizando relés de sobreintensidad temporizados.....	29
2.3.4. Protección diferencial utilizando relés diferenciales de porcentaje .	29
2.3.5. Frenado por armónicos.....	31
2.3.6. Bloqueo por armónicos.....	33
2.3.7. Métodos de reconocimiento de la forma de onda.....	35
2.3.8. Método de detección de baja corriente.....	35
2.3.9. Método de bloqueo por corriente continua.....	36
2.3.10. Relé de bloqueo lógico.....	37
2.4. Protección diferencial digital.....	38
2.4.1. Métodos de discriminación.....	39
<b>3. Transformada wavelet.....</b>	<b>45</b>
3.1. Introducción.....	45
3.2. Bases de la función escala.....	46
3.3. Bases Wavelet.....	47

3.3.1. Transformada Wavelet.....	48
3.3.2. Wavelets ortogonales y discretas.....	48
3.3.3. Descomposición Wavelet.....	50
3.3.4. Reconstrucción Wavelet.....	53
3.3.5. Tipos de familias de transformada wavelet.....	54
<b>4. Algoritmo propuesto de discriminación y modelado del relé.....</b>	<b>63</b>
4.1. Algoritmo propuesto de discriminación. ....	63
4.2. Modelado del Relé. ....	67
4.2.1. Unidad de adaptación p.u. ....	68
4.2.2. Unidad porcentual. ....	69
4.2.3. Unidad de análisis wavelet. ....	71
<b>5. Simulación del modelo.....</b>	<b>77</b>
5.1. Casos de estudio. ....	81
5.1.1. Energización del transformador con secundario en vacío.....	81
5.1.2. Energización del transformador con secundario en carga. ....	88
5.1.3. Falta interna con el transformador en vacío.....	92
5.1.4. Falta interna con el transformador en carga.....	99
5.1.5. Falta externa con el transformador en vacío. ....	105
5.1.6. Falta externa con el transformador en carga.....	109
5.1.7. Comportamiento del relé con otros transformadores. ....	112
5.1.8. Casos de estudio para faltas no usuales.....	146
<b>6. Conclusiones y futuras realizaciones. ....</b>	<b>169</b>
6.1. Conclusiones.....	169
6.2. Futuras realizaciones. ....	169
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>171</b>
<b>8. Publicaciones derivadas de la tesis.....</b>	<b>175</b>



## Listado de figuras

---

Fig. 2-1 Esquema de bloques de un relé digital (fuente: [13]).	22
Fig. 2-2 Esquema básico de una protección diferencial (fuente: [13]).	24
Fig. 2-3 Esquema básico de una falta externa (fuente: [13]).	25
Fig. 2-4 Falta externa [fuente: [13]).	26
Fig. 2-5 Falta interna - alimentación por un extremo (fuente: [13]).	26
Fig. 2-6 Falta interna - alimentación por ambos extremos (fuente: [13]).	27
Fig. 2-7 Función de frenado de un relé diferencial (fuente: [13]).	27
Fig. 2-8 Lógica de un elemento diferencial para frenado por 2 <sup>o</sup> y 5 <sup>o</sup> armónico (fuente: [*]).	32
Fig. 2-9. Bloqueo de relé diferencial mediante el reconocimiento de la duración de los intervalos de baja corriente (fuente: [*]).	35
Fig. 2-10. Diagrama lógico del bloqueo por corriente continua.	36
Fig. 2-11. Esquema de bloqueo lógico para relé diferencial numérico.	37
Fig. 3-1. Esquema de descomposición en series Wavelet (fuente: [7]).	53
Fig. 3-2. Ejemplo de descomposición de una señal por DWT (fuente: [7]).	53
Fig. 3-3 Wavelet Haar para la función psi (fuente: [7]).	54
Fig. 3-4 Wavelets Daubechies para la función psi (fuente: [7]).	55
Fig. 3-5 Menú wavelet MATLAB (fuente: captura de pantalla).	56
Fig. 3-6 Descomposición de una señal mediante Daubechies por menú (fuente: captura de pantalla).	57
Fig. 3-7 Descomposición de una señal mediante Daubechies por comando (fuente: captura de pantalla).	58
Fig. 3-8 Segunda descomposición de una señal mediante Daubechies por comando (fuente: captura de pantalla).	59
Fig. 3-9 Wavelets Biorthogonal para la función psi (fuente: [7]).	60
Fig. 3-10 Wavelets Coiflets para la función psi (fuente: [7]).	60

Fig. 3-11 Wavelets Symlets para la función psi (fuente: [7]).....	61
Fig. 4-1. Diagrama de flujo del algoritmo de protección del relé diferencial. ....	63
Fig. 4-2. Señales de la intensidad diferencial y detalle de nivel uno para una corriente de conexión y para una falta interna.....	64
Fig. 4-3. Tiempos bajo umbral para un intervalo del detalle de la intensidad diferencial para falta interna. ....	66
Fig. 4-4. Tiempos bajo umbral para un intervalo del detalle de la intensidad diferencial para energización del transformador.....	66
Fig. 4-5. Bloques constitutivos del relé diferencial.....	67
Fig. 4-6. Constitución interna del bloque de la unidad de adaptación p.u. ....	68
Fig. 4-7. Bloques constituyentes de la unidad porcentual. ....	70
Fig. 4-8. Comparación de las intensidades diferencial y circulante.....	71
Fig. 4-9. Retardo en la salida de la señal de la unidad porcentual para permitir la acumulación de datos durante un semiciclo.....	71
Fig. 4-10. Componentes de la unidad wavelet. ....	72
Fig. 5-1. Modelo de Simulink empleado para el ensayo del relé.....	77
Fig. 5-2. Bloques Simulink para la fuente trifásica programable, la impedancia de la línea y el interruptor trifásico de conexión del transformador.....	78
Fig. 5-3. Bloques de implementación de los transformadores de intensidad del lado primario y del secundario.....	79
Fig. 5-4. Bloque de simulación de faltas internas y dialogo de configuración. .	79
Fig. 5-5. Bloques de impedancia de línea en el secundario, bloque de simulación de faltas externas, interruptor trifásico de conexión de la carga secundaria y carga secundaria.....	80
Fig. 5-6. Bloque del transformador trifásico de potencia con ambos lados conectados en estrella. ....	81
Fig. 5-7. Intensidades primarias y secundarias en energización del transformador en vacío. ....	83
Fig. 5-8. Intensidades diferenciales en la energización del transformador en vacío.....	84
Fig. 5-9. Evolución de los disparadores del relé diferencial para energización del transformador en vacío. ....	85

---

Fig. 5-10. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A. ....	86
Fig. 5-11. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase B. ....	86
Fig. 5-12. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase C. ....	87
Fig. 5-13. Intensidades primarias y secundarias para la energización del transformador en carga. ....	89
Fig. 5-14. Intensidades diferenciales en la energización del transformador en carga. ....	90
Fig. 5-15. Disparadores del relé en la energización del transformador en carga. ....	91
Fig. 5-16. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para energización del transformador en carga. ....	92
Fig. 5-17. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en el transformador. ....	93
Fig. 5-18 Intensidades diferenciales para falta interna del transformador en vacío. ....	94
Fig. 5-19. Evolución de los disparadores del relé para falta interna con el transformador en vacío. ....	95
Fig. 5-20. Evolución de los disparadores desde el inicio de la falta hasta el disparo del relé con el transformador en vacío. ....	96
Fig. 5-21. Señal de detalle de la transformada wavelet discreta de la intensidad diferencial de la fase A para el intervalo desde 1000 hasta 1010 ms desde el inicio de la simulación. ....	97
Fig. 5-22. Ampliación de la señal mostrada en la Fig. 4-21. ....	98
Fig. 5-23. Segundo intervalo de 10 ms de la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para falta interna con el transformador en vacío. ....	99
Fig. 5-24. Intensidades primarias y secundarias para falta interna con el transformador en carga. ....	100
Fig. 5-25. Intensidades diferenciales para falta interna con el transformador en carga. ....	101

---

Fig. 5-26. Señales en los disparadores para falta interna del transformador en carga. ....	102
Fig. 5-27. Evolución de los disparadores desde el inicio de la falta hasta el disparo del relé para falta interna con el transformador en carga. ....	103
Fig. 5-28. Señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para el intervalo desde 1000 hasta 1010 ms desde el inicio de la simulación. ....	104
Fig. 5-29. Ampliación de la señal mostrada en la Fig. 4-28.....	104
Fig. 5-30. Segundo intervalo de 10 ms de la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para falta interna con el transformador en carga. ....	105
Fig. 5-31. Intensidades primarias y secundarias para falta externa del transformador en vacío. ....	106
Fig. 5-32. Intensidades diferenciales para falta externa con el transformador en vacío. ....	107
Fig. 5-33. Evolución de los disparadores del relé para falta externa con el transformador en vacío. ....	108
Fig. 5-34. Intensidades primarias y secundarias para falta externa con el transformador en carga.....	109
Fig. 5-35. Intensidades diferenciales para falta externa con el transformador en carga.....	110
Fig. 5-36. Evolución de los disparadores para falta externa con el transformador en carga.....	111
Fig. 5-37. Intensidades primarias y secundarias para energización en vacío del transformador 2. ....	113
Fig. 5-38. Intensidades diferenciales para la energización en vacío del transformador 2. ....	114
Fig. 5-39. Evolución de los disparadores para energización en vacío del transformador 2.....	115
Fig. 5-40. Intensidades primarias y secundarias para la energización en carga del transformador 2. ....	116
Fig. 5-41. Intensidades diferenciales para la energización en carga del transformador 2.....	117

---

Fig. 5-42. Evolución de los disparadores para energización en carga del transformador 2.....	118
Fig. 5-43. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en vacío del transformador 2. ....	119
Fig. 5-44. Intensidades diferenciales para falta interna en vacío del transformador 2.....	120
Fig. 5-45. Evolución de los disparadores para falta interna en vacío para el transformador 2.....	121
Fig. 5-46. Detalle del tiempo de activación de los disparadores para falta interna en vacío del transformador 2.....	122
Fig. 5-47. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en carga para el transformador 2.....	123
Fig. 5-48. Intensidades diferenciales para falta interna en carga del transformador 2.....	124
Fig. 5-49. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2.....	125
Fig. 5-50. Detalle del tiempo de activación de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2. ....	126
Fig. 5-51. Intensidades primarias y secundarias para falta externa en carga para el transformador 2.....	127
Fig. 5-52. Intensidades diferenciales para falta externa en carga del transformador 2.....	128
Fig. 5-53. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2.....	129
Fig. 5-54. Intensidades primarias y secundarias para energización en vacío del transformador 3. ....	130
Fig. 5-55. Intensidades diferenciales para energización en vacío del transformador 3.....	131
Fig. 5-56. Evolución de los disparadores para energización en vacío del transformador 3.....	132
Fig. 5-57. Intensidades primarias y secundarias para energización en carga del transformador 3.....	133

---

Fig. 5-58. Intensidades diferenciales para energización en carga del transformador 3.....	134
Fig. 5-59. Evolución de los disparadores para energización en carga del transformador 3.....	135
Fig. 5-60. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en vacío del transformador 3.....	136
Fig. 5-61. Intensidades diferenciales para falta interna en vacío del transformador 3.....	137
Fig. 5-62. Evolución de los disparadores para falta interna en vacío del transformador 3.....	138
Fig. 5-63. Detalle de la evolución de los disparadores de la figura Fig. 7-56.	139
Fig. 5-64. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en carga del transformador 3.....	140
Fig. 5-65. Intensidades diferenciales para falta interna en carga del transformador 3.....	141
Fig. 5-66. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 3.....	142
Fig. 5-67. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-60.....	143
Fig. 5-68. Intensidades primarias y secundarias para falta externa en carga para el transformador 3.....	144
Fig. 5-69. Intensidades diferenciales para falta externa en carga en el transformador 3.....	145
Fig. 5-70. Evolución de los disparadores para falta externa en carga del transformador 3.....	146
Fig. 5-71. Intensidades primarias y secundarias para falta bifásica en carga del transformador 3.....	148
Fig. 5-72. Intensidades diferenciales para falta bifásica del transformador 3.	149
Fig. 5-73. Evolución de los disparadores para falta interna bifásica del transformador 3.....	150
Fig. 5-74. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-67.....	151
Fig. 5-75. Intensidades primarias y secundarias para falta externa bifásica del transformador 3.....	152

---

Fig. 5-76. Intensidades diferenciales para falta externa bifásica en el transformador 3. ....	153
Fig. 5-77. Evolución de los disparadores para falta externa bifásica en el transformador 3. ....	154
Fig. 5-78. Intensidades primarias y secundarias para falta bifásica a tierra del transformador 3. ....	155
Fig. 5-79. Intensidades diferenciales para falta interna bifásica a tierra en el transformador 3. ....	156
Fig. 5-80. Evolución de los disparadores para falta interna bifásica a tierra en el transformador 3. ....	157
Fig. 5-81. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-74. ....	158
Fig. 5-82. Intensidades primarias y secundarias para falta externa bifásica a tierra del transformador 3. ....	159
Fig. 5-83. Intensidades diferenciales para falta externa bifásica a tierra en el transformador 3. ....	160
Fig. 5-84. Evolución de los disparadores para falta externa bifásica a tierra en el transformador 3. ....	161
Fig. 5-85. Intensidades primarias y secundarias para falta interna trifásica en el transformador 3. ....	162
Fig. 5-86. Intensidades diferenciales para falta interna trifásica en el transformador 3. ....	163
Fig. 5-87. Evolución de los disparadores para falta interna trifásica en el transformador 3. ....	164
Fig. 5-88. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-81. ....	165
Fig. 5-89. Intensidades primarias y secundarias para falta externa trifásica en el transformador 3. ....	166
Fig. 5-90. Intensidades diferenciales para falta externa trifásica del transformador 3. ....	167
Fig. 5-91. Evolución de los disparadores para falta externa trifásica del transformador 3. ....	168





## **2. Introducción.**

---

En este capítulo se presentan los antecedentes y el desarrollo histórico de la protección de transformadores, centrándose fundamentalmente en la protección diferencial y los problemas relacionados con la misma.

### **2.1. Antecedentes.**

Los transformadores de potencia constituyen un componente esencial en los sistemas de energía eléctrica moderna, y por tanto, su protección es muy importante y fundamental para el desarrollo de nuevas técnicas que son más eficientes con el fin de protegerlos. Si se produce una falta en un transformador de potencia es necesario aislar el transformador con la mayor brevedad posible, de modo que el daño que pueda sufrir el transformador sea mínimo. Los transformadores de potencia están sujetos a muchos tipos de faltas internas y externas. Por otra parte, la corriente de conexión generada en el momento de la energización del transformador se asemeja a la condición de una falta interna. Este fenómeno de irrupción dispara el transformador de potencia si el sistema de protección utilizado no está diseñado para contener este tipo de falsos disparos. El método más eficaz utilizado para proteger los transformadores de potencia es la técnica de protección diferencial.

Los relés diferenciales se podrían clasificar en tres tipos principales: relés electromecánicos, relés electrónicos analógicos y relés digitales. Hoy en día, los ordenadores hacen que el diseño de los relés digitales sea más fácil y cómodo.

La investigación se centra en la mejora de las técnicas de software sin los cambios de hardware. Se han introducido muchos enfoques de protección digital desde el primer microprocesador, el cual fue introducido en 1971.

Muchas de las técnicas de inteligencia, como la lógica difusa, las redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos, se han propuesto para su aplicación en la protección diferencial de transformadores de potencia. La transformada de Fourier ha sido el método en el que se han basado para el análisis de la señal durante un largo tiempo hasta la actualidad.

Posteriormente, se desarrolló la transformada wavelet (WT), la cual se basa en los principios de la “short-time Fourier transform” (STFT) y las técnicas de varias resoluciones.

La diferencia entre WT y STFT es que el WT utiliza ventanas variables para el análisis de señales, es decir, utiliza una ventana estrecha para el análisis de señales de alta frecuencia y una ventana ancha para el análisis de señales de baja frecuencia, y la STFT utiliza una ventana de anchura constante para el análisis de todas las señales con diferentes frecuencias.

## **2.2. Desarrollo histórico.**

### **2.2.1. El transformador eléctrico.**

Con la irrupción, hacia finales del siglo XIX, de los primeros sistemas eléctricos alternos, empezaba una etapa entonces apenas insospechable del desarrollo de la energía eléctrica.

Para llegar hasta la invención del transformador alrededor de 1885, se han tenido que asentar las bases teóricas aproximadamente medio siglo antes.

El fenómeno de inducción electromagnética en el que se basa el funcionamiento del transformador fue descubierto por Michael Faraday en 1831. Se basa fundamentalmente en que cualquier variación de flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado genera una corriente inducida, y en que la corriente inducida sólo permanece mientras se produce el cambio de flujo magnético.

La primera bobina de inducción para generar tensiones alternas desde una fuente de corriente continua fue inventada por Nicholas Callan del College de Maynooth, Irlanda, en 1836. Fue uno de los primeros investigadores en darse cuenta de que cuantas más espiras hay en el secundario, en relación con el bobinado primario, más grande es el aumento de la f.e.m.

Los científicos e investigadores basaron sus esfuerzos en evolucionar las bobinas de inducción para obtener mayores tensiones en las baterías. En lugar de corriente alterna, su acción se basó en un vibrante mecanismo de apertura y cierre que regularmente interrumpía el flujo de la corriente continua de las baterías.

Entre la década de 1830 y la década de 1870, los esfuerzos para construir bobinas de inducción, en su mayoría por ensayo y error, reveló lentamente los principios básicos de los transformadores. Un diseño práctico y eficaz no apareció hasta la década de 1880, pero dentro de un decenio, el transformador tendría un papel decisivo en la “Guerra de Corrientes”, y en que los sistemas de distribución de corriente alterna triunfara sobre sus homólogos de corriente continua, una posición dominante que mantienen desde entonces.

En 1876, el ingeniero ruso Pavel Yablochkov inventó un sistema de iluminación basado en un conjunto de bobinas de inducción en el que el bobinado primario se conectaba a una

fuelle de corriente alterna y los devanados secundarios podían conectarse a varias “velas eléctricas” (lámparas de arco), de su propio diseño. Las bobinas utilizadas en el sistema se comportaban como transformadores primitivos. La patente alegó que el sistema podía, “proporcionar suministro por separado a varios puntos de iluminación con diferentes intensidades luminosas procedentes de una sola fuente de energía eléctrica”.

En 1876, los ingenieros de la empresa Ganz en Hungría asignaron parte de sus recursos de ingeniería para la fabricación de aparatos de iluminación eléctrica para Austria y Hungría.

En 1882, Lucien Gaulard y John Dixon Gibbs expusieron por primera vez un dispositivo con un núcleo de hierro llamado “generador secundario” en Londres. Posteriormente vendieron la idea a la compañía Westinghouse de EEUU. También fue expuesto en Turín, Italia 1884, donde fue adaptado para el sistema de alumbrado eléctrico.

En 1883, realizaron más de cincuenta instalaciones para dicho fin. Ofrecían un sistema que constaba de dos lámparas incandescentes y de arco, generadores y otros accesorios.

Entre 1884 y 1885, los ingenieros Húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri de la compañía Ganz crearon en Budapest el modelo “ZBD” de transformador de corriente alterna, basado en un diseño de Gaulard y Gibbs. Descubrieron la fórmula matemática de los transformadores, la relación entre la tensión primaria y secundaria y el número de espiras de cada devanado. Su solicitud de patente hizo el primer uso de la palabra “Transformador”, una palabra que había sido acuñada por Bláthy Ottó.

En 1885, George Westinghouse compró las patentes ZBD y las de Gaulard y Gibbs. Le encomendó a William Stanley la construcción de un transformador de tipo ZBD para uso comercial. Este diseño se utilizó por primera vez comercialmente en 1886.

### **2.2.2. Sistemas de protección.**

El crecimiento de los sistemas eléctricos fue generando unas necesidades auxiliares, entre las cuales se incluyen los sistemas de protección.

Entre las muchas clasificaciones que podrían establecerse por el desarrollo histórico, se ha elegido la que fija etapas bien definidas en la evolución de los sistemas de protección, y que se analizan en los siguientes apartados.

#### **2.2.2.1. Sistemas de protección directos.**

Son todos aquellos sistemas en los cuales el elemento de medida es, generalmente, el mismo que el de corte, o está incorporado en él, y la magnitud que hay que controlar, normalmente la intensidad, se aplica a la protección sin ningún tipo de transformación.

### **2.2.2.1.1. Fusibles**

Es el método de protección más antiguo de todos los utilizados. Se basa en el incremento de temperatura que sufre un conductor al ser atravesado por una intensidad. Se calibran de forma que el conductor se funde cuando es atravesado por una intensidad prefijada, interrumpiendo el circuito.

Los fusibles constituyen un método de protección simple y relativamente económico que además tiene como principal ventaja el hecho de eliminar elevadas corrientes de cortocircuito en tiempos inferiores a los 5 ms. No obstante, presenta una serie de desventajas, como su poca precisión, bajo poder de corte, envejecimiento, entre otras.

### **2.2.2.1.2. Relés directos**

Al igual que los fusibles, protegen contra cortocircuitos. Consisten en una bobina en serie con la entrada del interruptor automático, y que, por tanto, está recorrida por la intensidad controlada.

En el momento en que, por incremento de la intensidad, aumenta la fuerza del campo electromagnético generado en la bobina y supera la de un muelle antagonista que tiene el aparato, se produce la desconexión del interruptor automático o se desenclava un sistema de relojería que produce este disparo con un cierto retraso, según el modelo de relé de que se trate.

### **2.2.2.2. Sistemas de protección indirectos**

Son aquellos en los que las magnitudes que hay que controlar (tensión, intensidad, temperatura, etc.) se transforman en valores normalizados antes de inyectarse al relé de protección.

En general, estos sistemas son más costosos que los directos, al precisarse además de la protección propiamente dicha, transductores y elementos de corte. Sin embargo con su aparición el concepto de protección alcanza su plenitud.

### **2.2.2.3. Sistemas electromagnéticos**

La información 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.

Según su construcción, los podemos clasificar en:

- 
- Émbolo o armadura articulada;  
Al superar del campo magnético de la bobina el esfuerzo antagonista de un resorte, la armadura se une al polo del electroimán, arrastrando un contacto móvil que lleva solidario.
  - Disco de inducción;  
El campo magnético generado en la bobina produce un par de giro en el disco, proporcional a la tensión o intensidad aplicada, obteniéndose, por tanto, un tiempo de actuación inversamente proporcional a la magnitud medida.
  - Copa o cilindro de inducción;  
Al disponer el núcleo de varios polos, permite su utilización en aquellos relés de protección en los que sea necesario comparar más de una magnitud. El par de giro es proporcional al producto vectorial de la dos magnitudes utilizadas.
  - Sistemas de bobina móvil;  
Los equipos de bobina móvil ocupan una situación intermedia entre los equipos electromagnéticos y los electrónicos. Poseen algunos elementos electrónicos tales como diodos, resistencias y condensadores, pero la medida se efectúa aun electromagnéticamente por medio de un dispositivo de medida polarizado de cuadro móvil.  
Este sistema mide por integración los valores medios de la magnitud de entrada.  
La rapidez de este sistema es superior al electromagnético, y su consumo y tamaño son inferiores.
  - Sistemas de electrónica convencional;  
Este sistema mide por integración los valores instantáneos de la magnitud de entrada. La aplicación de electrónica al campo de los sistemas de protección ha permitido desarrollar una nueva gama de tipos de protección, así como mejorar sus características de funcionamiento, tanto en precisión como en rapidez como así mismo en fiabilidad y duración.
  - Sistemas electrónicos digitalizados;  
La aparición en el mercado de los primeros microprocesadores, a finales de los años sesenta, impulsó a los grandes fabricantes de protecciones a diseñar sistemas basados en microprocesadores y aprovechar los desarrollos en tecnología de comunicaciones por fibra óptica que transmiten gran cantidad de información a alta velocidad.  
El esquema básico de las protecciones digitalizadas es muy parecido al de las protecciones electrónicas. La diferencia fundamental es que las segundas realizan la medida de forma analógica, mientras que las digitales la realizan por medio de unos algoritmos que operan con los valores instantáneos de la señal de entrada. Para ello es necesario disponer de una unidad que realice un muestreo de esta señal y de un conversor analógico-digital.

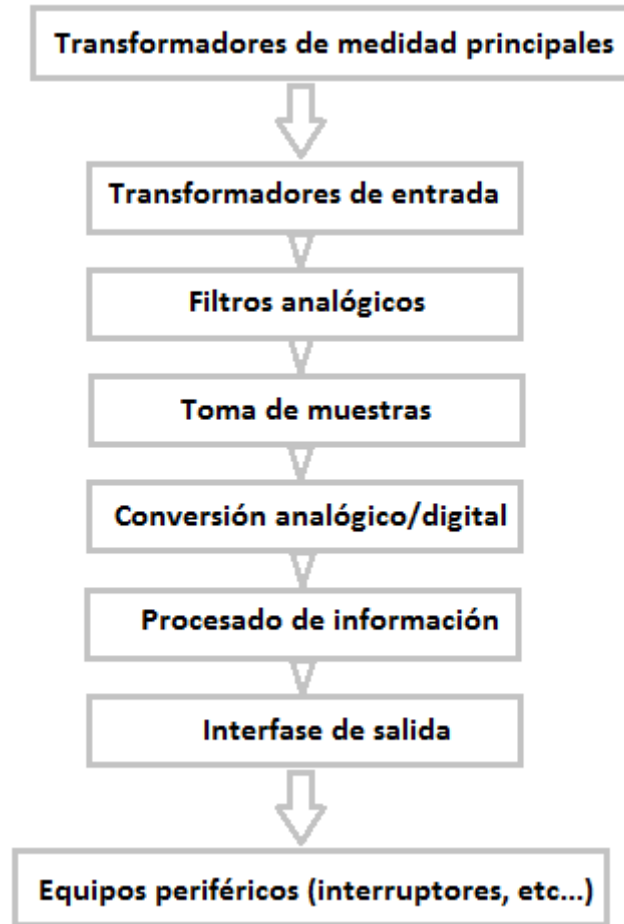


Fig. 2-1 Esquema de bloques de un relé digital (fuente: [13]).

Las principales ventajas que presenta la introducción de los microprocesadores en estos sistemas son:

- Facilidad para incorporar autodiagnósticos y funciones automáticas de inspección, lo cual representa una gran mejora en la fiabilidad y la seguridad. La supervisión continua permite la verificación de los circuitos de la CPU, memorias, dispositivos de ajuste y elementos de entrada y salida.
- Mejora de características. La complejidad de los sistemas eléctricos requiere unas sofisticadas características en los equipos de protección que implican una gran cantidad de hardware cuando se utilizan relés convencionales, mientras que en los relés digitales la consecución de una característica determinada es sólo problema de software.
- Mejora de la flexibilidad y la aplicación. En los relés de protección digitales las funciones del relé son realizadas en la medida de lo posible por el software, y por tanto se pueden normalizar varios tipos de relés que tengan idéntico hardware.

- Reducción del conexionado entre equipos. La utilización de microprocesadores posibilita la relación de sistemas jerarquizados en los que las tradicionales uniones entre equipos que precisan un conductor para cada una de las señales, se sustituyen por comunicaciones en serie en las que un solo par de conductores pueden transmitir la totalidad de la información.

## **2.3. La protección diferencial.**

Las protecciones diferenciales constituyen sistemas de protección absolutamente selectivos, es decir, sistemas en los cuales la operación y selectividad dependen únicamente de la comparación de las intensidades de cada uno de los extremos de la zona protegida.

### **2.3.1. Evolución histórica de la protección diferencial.**

Ya al final del siglo XIX algunos ingenieros hablaban sobre la protección diferencial (en la comparación de tensiones y corrientes en fases simples). En 1896 una primera propuesta comparaba las tensiones de dos fases de un sistema de corriente continua con el neutro. Un relé de báscula con bobinas en ambos lados estaba en equilibrio cuando las tensiones eran iguales.

Posteriormente una empresa propuso para sistemas trifásicos la comparación de las corrientes de las diferentes fases (un relé y dos bobinas por cada fase).

Schuckert propuso en 1900 otro relé diferencial de báscula. Ahora la corriente de una fase opera en un lado y las otras dos fases en el otro lado, un cambio en la carga de una simple fase dispara el relé.

Charles Hestermann Merz y Bernhard Price patentaron una protección diferencial que comparaba las corrientes en ambos lados del equipo de un sistema de potencia. El 16 de febrero de 1904 se presentó en Reino Unido la patente “mejoras en el método de medidas de protección de aparatos en sistemas de corriente alterna”, y el 31 de mayo de 1904 en Alemania. Por tanto se puede decir que el año 1904 es el año de nacimiento de la protección diferencial. A ambos lados de un transformador se instalaban transformadores de corriente. Los arrollamientos del secundario se conectaban de tal manera que la corriente durante la operación normal era cero. La conexión de los transformadores se realizó con hilos piloto. Este sistema se aplicaba tanto a protecciones de líneas como a protecciones de transformadores.

AEG desarrolló posteriormente un dispositivo universal trifásico. Este aparato podía ser pedido para diferentes necesidades como protección de cables, transformadores o generadores.

En 1920 Waldemar Petersen reconoció los problemas de disparos intempestivos en el caso de cortocircuitos fuera de la zona protegida. El problema era la saturación de los

transformadores de corriente. Además, el cambio en las tomas de los transformadores de potencia también inducía a disparos intempestivos. Por esta causa propuso un relé de medida de cociente en 1930. Este relé no era disparado por la magnitud de la corriente diferencial, sino que tenía en cuenta el cociente entre la intensidad diferencial y la corriente de falta.

Para evitar los falsos disparos Albert Edward McColl propuso en 1929 un arrollamiento de inhibición (relé diferencial de porcentaje), el cual consistía en dos electroimanes que actúan sobre el brazo de una báscula. Un electroimán utiliza la suma geométrica de las corrientes para la inhibición y el otro utiliza la diferencia geométrica para el disparo. Ahora la corriente de disparo proporcional a la de falta tiene que ser muy grande para disparar, y de ahí el nombre de relé de porcentaje.

El problema de la corriente de conexión se solventaba con una temporización, ya que aunque se manejaba la idea de la inhibición por armónicos, hubo que esperar hasta los años 50 para disponer de filtros y rectificadores que bloqueasen la protección con seguridad y rapidez.

### 2.3.2. Principios básicos

Las protecciones diferenciales están basadas en la primera ley de Kirchoff, que dice que “la suma vectorial de todas las intensidades que llegan a un nudo debe ser cero”.

Si se considera el elemento que hay que proteger como un nudo y se instalan transformadores de intensidad en cada una de sus entradas-salidas, la protección puede ser un simple relé de sobrecorriente que ordene disparo en el momento que esta suma no sea cero, lo que equivale a una falta interna.

En condiciones normales, es decir, sin anomalía en la zona a proteger, la corriente “pasa” a través del elemento protegido. Lo mismo ocurre en el circuito secundario de los transformadores. El equilibrio entre ambas corrientes secundarias no produce ninguna corriente en el circuito “diferencial” donde está instalado el relé de intensidad.

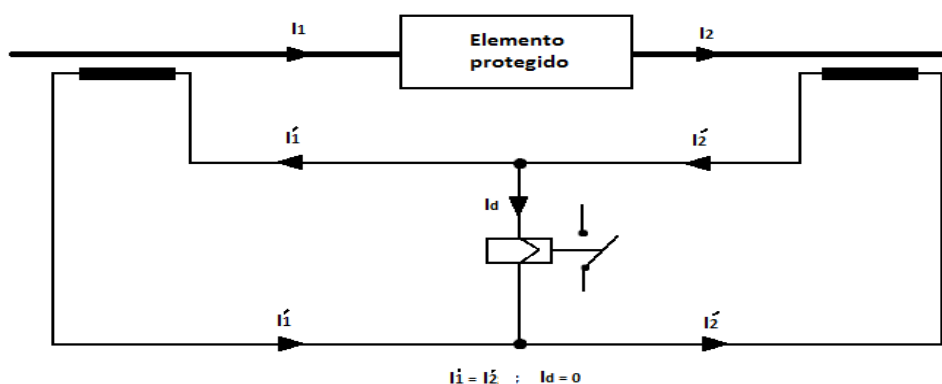


Fig. 2-2 Esquema básico de una protección diferencial (fuente: [13]).

Naturalmente, esto es sólo teoría. Los transformadores de intensidad tienen errores de transformación, en módulo y argumento, no siempre despreciables.



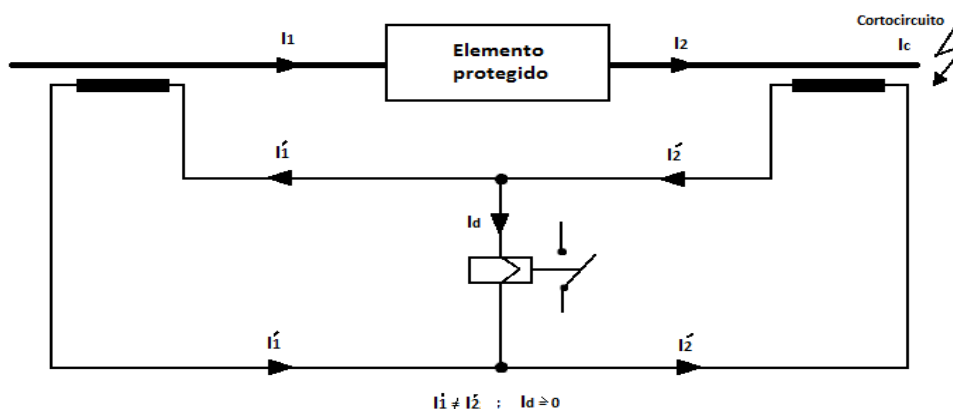


Fig. 2-3 Esquema básico de una falta externa (fuente: [13]).

Por ejemplo, en el caso de falta externa, las corrientes de cortocircuito pueden ser muy superiores a las normales. Por consiguiente, también los errores se multiplican. Esto lleva a la conclusión de que el relé diferencial debe tener un ajuste mínimo que garantice la estabilidad de la protección en ocasión de cortocircuitos externos. En el supuesto que el relé diferencial se ajustara para evitar disparos incorrectos, de forma que no actúe con corrientes diferenciales inferiores a 1 A, y los transformadores de intensidad fuesen, por ejemplo, de relación 800/5, esto supondría que, en caso de falta interna, el relé no operaría para desequilibrios inferiores a 160 A.

Existe otro fenómeno que también puede influir sobre este tipo de protecciones, como la saturación de los transformadores de intensidad. Esta saturación puede producirse bien por la propia magnitud de la corriente de cortocircuito o por la posible componente asimétrica en la forma de onda. La desigual respuesta de los transformadores produce falsas corrientes diferenciales. Para ese problema existen varias soluciones. La primera de ellas consiste en temporizar el disparo del relé diferencial el tiempo suficiente (del orden de 0,5 a 0,8 segundos). Esta solución es inaceptable cuando la protección se aplica a equipos de gran responsabilidad y costo, ya que mantener 0,5 segundos un posible cortocircuito interno puede dar lugar a grandes desperfectos.

Una segunda solución disponer de un relé diferencial ultrarrápido, capaz de decidir si se debe o no actuar dentro de los 5 ms siguientes al cortocircuito, cuando aún no se ha producido la saturación en los transformadores de intensidad.

En el caso de falta interna, el circuito diferencial está siempre recorrido por la corriente de falta ( $I_d = I_f$ ), tanto en el caso de que el cortocircuito esté alimentado por un solo lado del elemento protegido como si lo está por los dos. Por otro lado, la suma aritmética de las intensidades en los circuitos secundarios  $I_A = I_1 + I_2$ , resulta ser, asimismo, igual a la corriente de falta, si se suponen en fase las dos corrientes de confluyen al cortocircuito.

En cambio, para una falta externa, la corriente diferencial  $I_d$  tiende a ser nula, a excepción del efecto producido por los errores de transformación, mientras que  $I_A$  es del orden de dos veces la intensidad que el elemento protegido aporta al cortocircuito externo.

Para aumentar la seguridad del relé, algunos modelos incorporan lo que se denomina “función de frenado por corriente circulante”, que bloquean el disparo de la protección en caso de que la intensidad diferencial no supere un porcentaje preestablecido de la intensidad antagonista o de frenado.

Con esta función de frenado, se consigue insensibilizar el relé para los desequilibrios que pueden darse en caso de faltas externas; en cambio, el relé puede seguir actuando correctamente para faltas internas. Las pendientes más usuales están en el margen comprendido entre el 20 y el 60 %.

En los relés que incorporan la función de frenado, se dice, por ejemplo, que “el relé tiene una pendiente del 50 %”. Esto quiere decir que para que el relé opere es necesario que la corriente diferencial sea, al menos, la mitad que la antagonista.

A continuación se detallan diferentes situaciones de falta con el esquema completo de un relé diferencial. La Fig. 1-4 muestra el esquema para una falta externa, la Fig. 1-5 para una falta interna con alimentación por un extremo y la Fig. 1-6 el caso para una falta interna con alimentación por ambos extremos.

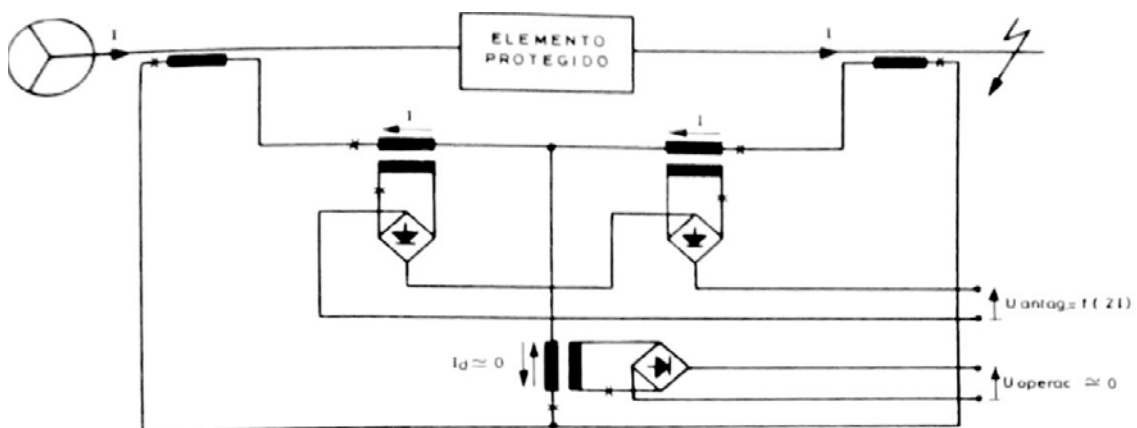


Fig. 2-4 Falta externa [fuente: [13]].

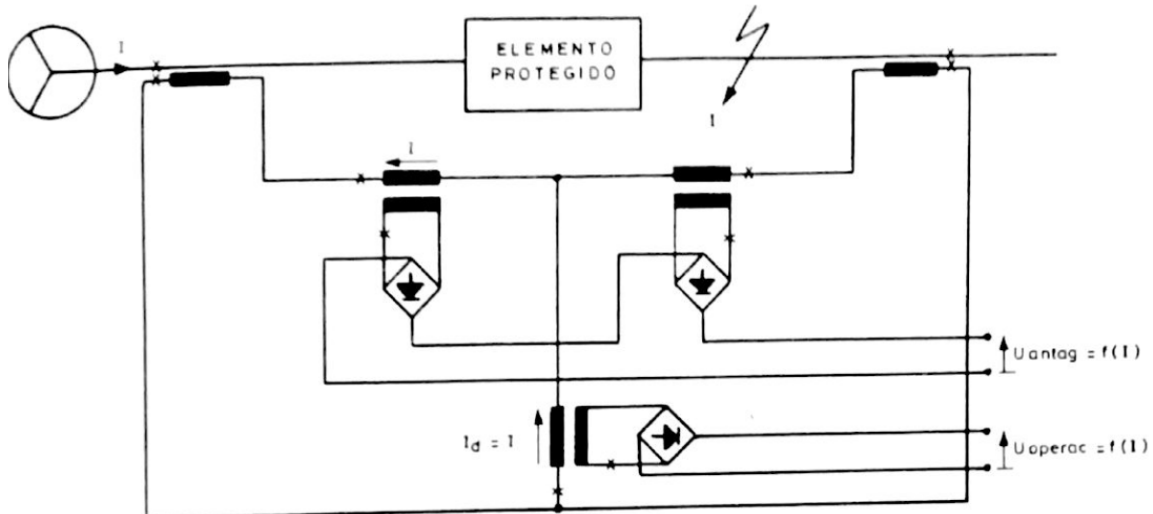


Fig. 2-5 Falta interna - alimentación por un extremo (fuente: [13]).

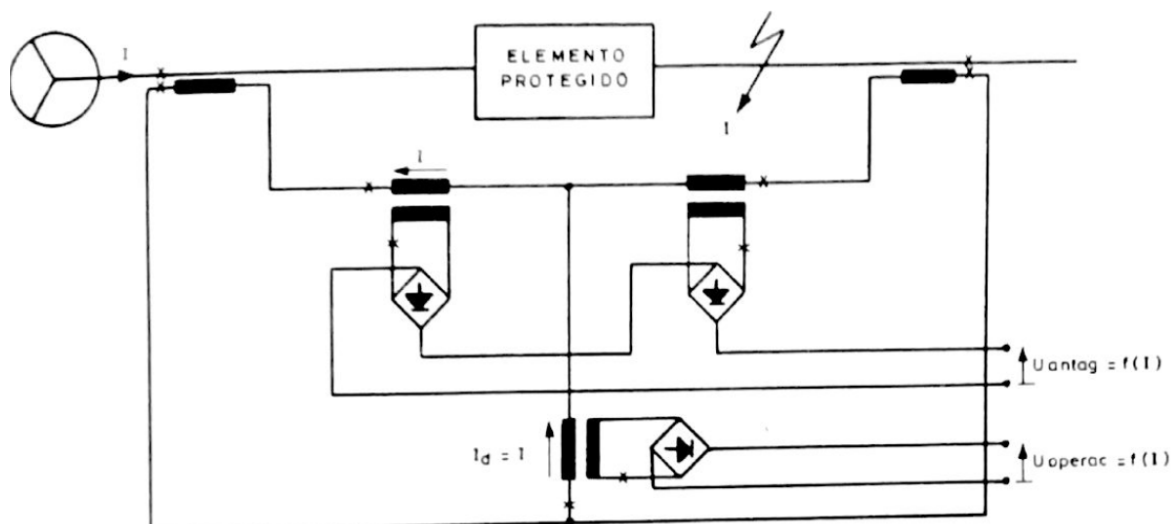


Fig. 2-6 Falta interna - alimentación por ambos extremos (fuente: [13]).

La Fig. 1-7 muestra la característica de operación de un relé diferencial, con una pendiente del 50 % y una corriente mínima de operación de 1 A.

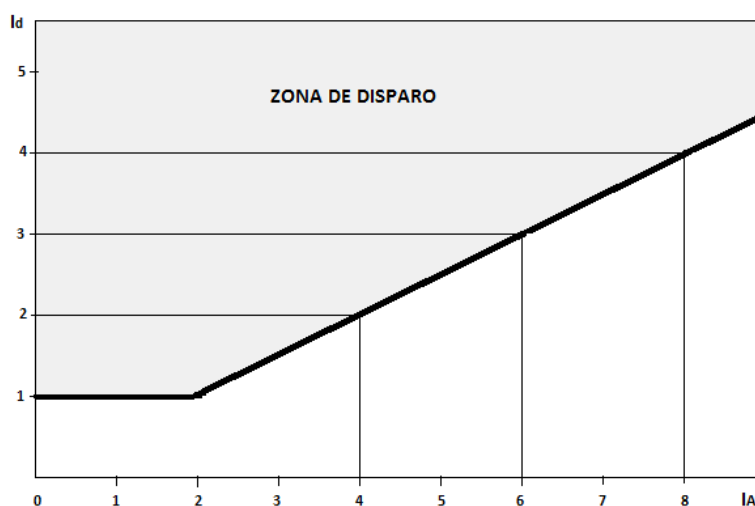


Fig. 2-7 Función de frenado de un relé diferencial (fuente: [13])

En las conexiones en vacío de transformadores es usual obtener una elevada corriente de magnetización en el devanado que ha sido conectado. Como quiera que el otro devanado no lleva corriente, la corriente de magnetización aparecerá en el circuito diferencial de la protección.

El valor de esta corriente para transformadores de potencia superiores a 10 MVA y núcleos de grano orientado puede ser, en los instantes iniciales, de hasta:

- 5 a  $10 I_n$  al conectar el lado A.T.
- 10 a  $20 I_n$  al conectar el lado B.T.

La magnitud y duración de esta corriente depende, ente otras cosas, de:

- El diseño del transformador.
- Grupo de conexión.
- Sistema de puesta a tierra.
- Si hay otros transformadores en paralelo.
- En general, la duración puede ser de algunos segundos.

Las modernas protecciones diferenciales cuentan con un elemento para el frenado por corrientes magnetizantes. Este elemento se basa en el hecho que en la corrientes de este tipo hay una componente de segundo armónico muy superior a la que aparece en las corrientes de cortocircuito.

Algunos transformadores pueden verse sometidos, ocasionalmente, a sobretensiones de corta duración. Los transformadores con núcleo de grado orientado tienen una densidad de flujo magnético elevada. Por este motivo, la corriente de excitación con sobretensiones del 20 al 30 % puede llegar a valores de 10 a 100 veces su valor nominal. Esta corriente podría provocar la actuación de la protección.

Las protecciones diferenciales modernas cuentan con el hecho de que las corrientes de excitación, con altas densidades de flujo, contienen una componente del quinto armónico relativamente grande. Lo usual en montar en el circuito diferencial dos circuitos LC resonantes para las frecuencias de 100 y 250 Hz, respectivamente. La tensión obtenida se resta de la tensión diferencial. El resultado es el que se compara con la tensión producida por la corriente circulante.

La relación de espiras entre T1 y T2 determina la pendiente del relé.

Evidentemente, al asegurar cada vez más la correcta operación de una protección diferencial de un transformador, también se disminuye la sensibilidad del relé. En las faltas a tierra generalmente resulta inferior la corriente de cortocircuito, en especial cuando existe una impedancia limitadora entre el neutro y tierra. El valor de esta impedancia sumado a la resistencia del arco puede hacer que la corriente del cortocircuito provoque un desequilibrio que la protección diferencial sea incapaz de detectar.

No se debe olvidar que, en el caso de un transformador, el relé diferencial, tiene a uno y otro lado distintas relaciones de transformación. Así, un relé ajustado a un 1 A, con transformadores de intensidad de relaciones 1000/5 y 4000/5, operará para desequilibrios de 200 A en el arrollamiento de A.T. y 800 A en el de baja tensión. Si este arrollamiento está puesto a tierra a través de un impedancia limitadora, es posible que una falta a tierra no supere los 800 A de desequilibrio.

### 2.3.3. Protección diferencial utilizando relés de sobreintensidad temporizados

Los relés de sobreintensidad sin frenado se utilizan raramente debido a su susceptibilidad a falsas operaciones por las siguientes causas:

- Errores de saturación y de desigualdad en los transformadores de intensidad.
- Corrientes de conexión fluyendo desde la alimentación al conectar el transformador.

Para compensar los errores de saturación y de desigualdad, los relés de sobreintensidad deberían ajustarse para operar por encima de los valores esperados de la corriente de conexión. También es necesario un tiempo de retardo para invalidar la corriente de conexión. Debido a la saturación del transformador de potencia se debe evitar el uso de este relé donde haya exposición a corrientes geomagnéticamente inducidas.

### 2.3.4. Protección diferencial utilizando relés diferenciales de porcentaje

Para solventar los problemas de la aplicación de relés de sobreintensidad a la protección diferencial, los fabricantes desarrollaron los relés diferenciales de porcentaje. Estos relés ofrecen una protección diferencial sensible a bajas corrientes y toleran mayores desigualdades a grandes corrientes, manteniendo el disparo para faltas internas.

La base de funcionamiento del relé diferencial de porcentaje es que la corriente diferencial (medida en los finales de las zonas protegidas) sea mayor que un porcentaje predeterminado de la corriente de frenado.

Se utilizan diferentes alternativas para obtener la corriente de frenado  $I_R$ . Se utilizan varias combinaciones de las corrientes en los dos terminales del transformador:

$$I_R = K * |I_1 + I_2| \quad \text{Ec. 1-1}$$

$$I_R = K * (|I_1| + |I_2|) \quad \text{Ec. 1-2}$$

$$I_R = \max(|I_1|, |I_2|) \quad \text{Ec. 1-3}$$

En estas ecuaciones, "K" es una constante que usualmente tiene un valor de 1 ó 0,5. Las dos últimas ecuaciones ofrecen la ventaja de poder ser aplicables a diferentes relés con más de dos frenados.

El porcentaje puede ser fijo o variable según el diseño del relé. También hay un umbral mínimo de corriente diferencial antes del disparo, independientemente de la corriente de

frenado. Los detalles sobre el disparo mínimo, la corriente de frenado y la pendiente de característica varían según el fabricante. La pendiente no tiene por qué ser una recta, sino una curva creciente dependiendo del diseño del sistema de frenado por porcentaje. Esta curva permite incluso grandes porcentajes de desigualdad durante corrientes de falta externa elevadas.

Los transformadores de potencia de alta tensión presentan muchas posibilidades de corrientes desiguales vistas por el relé diferencial. Estas desigualdades, causadas por diferentes fenómenos, pueden sumarse o desplazar unas de las otras, haciendo difícil de percibir el valor resultante. Por tanto, el relé diferencial de porcentaje debe ser tolerante al peor caso posible de los errores de desigualdad.

Primero, la relación de transformación hace que las corrientes primarias y secundarias sean diferentes. Dependiendo de la relación de transformación, en ocasiones esta diferencia es exactamente compensada utilizando la misma relación con los transformadores de intensidad.

Para transformadores con conexión estrella-triángulo, el desfase de  $30^\circ$  se compensa con una apropiada conexión de los arrollamientos del secundario de los transformadores de intensidad cuando se utilicen relés electromecánicos, aunque la diferencia en la relación de intensidades se vea afectada por el multiplicador de corrientes que salen del secundario del transformador de intensidad.

Segundo, una contribución muy importante a la desigualdad de corrientes es la aplicación de cambiadores de tomas para la regulación de tensión. Un caso típico con una regulación de 10% en la tensión, crea una variación de la corriente del 10%. El relé diferencial no debe operar para estas desigualdades. En relés electromecánicos, se obtenía incrementando la pendiente de porcentaje, y esta aproximación también se utiliza para algunos relés numéricos. No obstante los relés con microprocesadores monitorizan la posición de los cambiadores y las desigualdades son tenidas en cuenta en el software.

Tercero, la diferencia en el funcionamiento de los transformadores de intensidad aplicados a diferentes terminales del transformador son causa de desigualdad en las corrientes. Para corrientes bajas, como la de carga, los errores son muy pequeños e insignificantes. Para faltas importantes fuera de la zona protegida la saturación de los transformadores de intensidad es altamente posible. La diferencia en el funcionamiento en la intensidad en diferentes terminales del transformador aparece como una corriente diferencial en el relé. Algunos relés numéricos monitorizan la saturación de los transformadores de intensidad y toman medidas para permanecer a salvo de falsas corrientes diferenciales causadas por la saturación de los transformadores de intensidad.

Cuarto, las corrientes de conexión de un transformador desenergizado también son causa de desigualdad en las corrientes. Las corrientes de magnetización pueden ser varias veces superiores a la corriente nominal del transformador.

Quinto, la sobreexcitación debida a un exceso de tensión en los terminales del transformador es causa de desigualdad de las corrientes. Cuando la tensión excede el valor

nominal, el flujo también excede el valor nominal. Normalmente se tolera un 10% desde que el transformador está funcionando en la zona lineal de la característica de magnetización del núcleo.

### 2.3.5. Frenado por armónicos

El frenado por armónicos se utiliza para evitar disparos intempestivos de los relés diferenciales de porcentaje debido al flujo de las corrientes de conexión cuando el transformador es conectado. Se utilizan diferentes métodos para el frenado por armónicos.

El principio general de operación cuando se utiliza frenado por armónicos se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$|I_0| > s|I_R| + K_2|I_2| + K_3|I_3| + \dots \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde:

- $I_0$  es la componente fundamental de la corriente de operación.
- $I_2, I_3, \dots$  segunda, tercera y siguientes componentes armónicas de la corriente de operación.
- $I_R$  es la corriente de frenado sin filtrar.
- $K_2, K_3, \dots$  son constantes de proporcionalidad.
- $S$  es la pendiente de la característica del relé diferencial de porcentaje.

El frenado por armónicos es elevado cuando se utiliza esta aproximación, y proporciona seguridad ante las corrientes de conexión a expensas de la velocidad de operación para faltas internas con saturación de los transformadores de intensidad. En algunos relés sólo se utilizan para el frenado las componentes armónicas de la corriente de operación. En otros, el efecto de la corriente de frenado puede hacerse despreciable. La operación del relé diferencial se puede expresar según la ecuación:

$$|I_0| > K_1|I_1| + K_2|I_2| + \dots \quad \text{Ec. 1-5}$$

#### 2.3.5.1. Frenado por segundo y quinto armónico

El relé diferencial trifásico con frenado por segundo y quinto armónico fue presentado por Einvall y Linders en el año 1975. Este relé utiliza la componente del segundo armónico de la corriente de operación para identificar corrientes de conexión, y fue originalmente propuesto por Sharp y Glassburn en el año 1958

También utiliza la componente del quinto armónico de la corriente de operación para evitar operaciones incorrectas durante una sobreexcitación del transformador. El relé incluye un detector de máxima corriente que produce la corriente diferencial de frenado por porcentaje, por tanto la cantidad de frenado es la mostrada en la ecuación (2.3). El relé forma un frenado adicional sumando las componentes del segundo y quinto armónico de la corriente de operación, la ecuación básica para la operación de una fase del relé es la mostrada en la siguiente ecuación.

$$|I_0| > s|I_R| + K_2|I_2| + K_5|I_5| \tag{Ec. 1-6}$$

En algunos relés el frenado por armónicos es proporcional a la suma de las componentes del segundo y quinto armónico de los elementos trifásicos del relé. Por tanto, su operación queda expresada por la ecuación:

$$|I_0| > s|I_R| + \sum_{n=1}^3 (k_2|I_{2n}| + k_5|I_{5n}|) \tag{Ec. 1-7}$$

La Fig. 1-8 muestra la lógica del elemento de un relé diferencial con frenado por segundo y quinto armónico, de acuerdo con la ecuación (2.2).

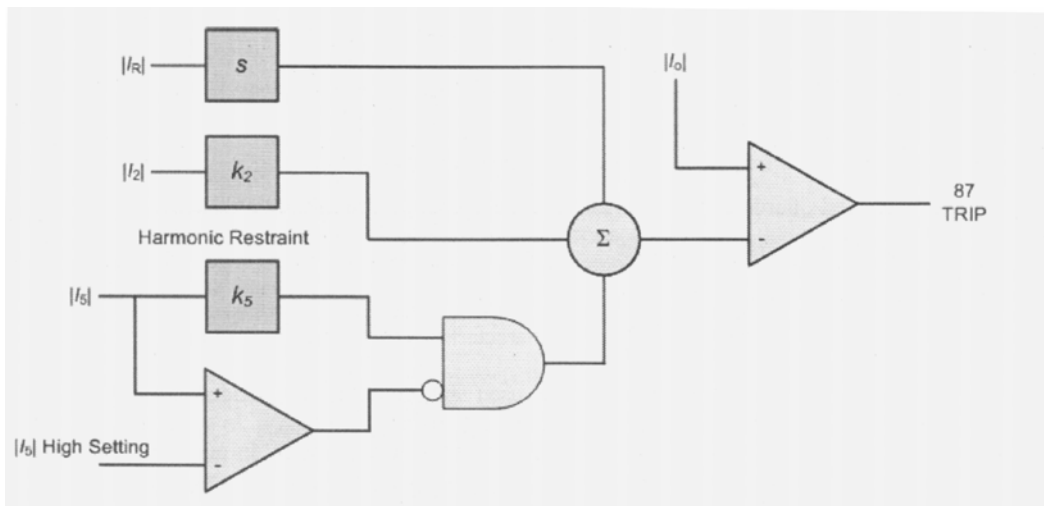


Fig. 2-8 Lógica de un elemento diferencial para frenado por 2º y 5º armónico (fuente: [\*]).

Nótese que en este elemento de frenado por armónicos, la corriente de operación debería sobrepasar a los efectos combinados de la corriente de frenado y al segundo y quinto armónico de la corriente de operación. Como ya se ha indicado, la corriente de quinto armónico aparece en el transformador cuando es sobreexcitado debido a un exceso de tensión aplicada en él. Un exceso en la corriente de quinto armónico puede dañar el transformador,



---

razón por la cual muchos relés incluyen un ajuste de alta corriente para el quinto armónico. El frenado para quinto armónico es suprimido si  $I_5$  supera el ajuste.

El frenado común por armónicos o bloqueo incrementa la seguridad del relé diferencial, pero es preferible retardar la operación del relé para faltas internas combinado con corrientes de conexión en las fases sanas.

### 2.3.5.2. Frenado de armónicos pares

El uso de los armónicos pares (segundo y cuarto) en un sistema con frenado es otro método que da seguridad durante las corrientes de conexión que pudieran tener una muy baja corriente de segundo armónico. La ecuación que representa esta función diferencial es la siguiente:

En contraste con los armónicos impares, que son generados por la saturación del transformador de intensidad por un exceso de corriente alterna, los armónicos pares son un mejor indicador de la corriente de conexión. Los armónicos pares provienen de la saturación por corriente continua del transformador de intensidad y son transitorios por naturaleza. El uso de los armónicos pares (y no sólo el segundo armónico) proporciona una mejor discriminación entre corrientes de conexión corrientes de falta interna.

### 2.3.6. Bloqueo por armónicos

El bloqueo por armónicos consiste en un bloqueo total de la protección diferencial, el bloqueo es instantáneo (o bloquea la protección o no).

El bloqueo por armónicos también puede utilizarse para evitar disparos intempestivos por los relés diferenciales de porcentaje debido al flujo de las corrientes de conexión cuando se conecta el transformador.

#### 2.3.6.1. Bloqueo por segundo armónico

En el diseño de Sharp y Glassburn el relé consistía en una unidad diferencial y una unidad de armónico. La corriente de operación definida por la ecuación:

$$I_0 = I_1 - I_2$$

*Ec. 1-8*

Esta ecuación es la que se usa en la unidad diferencial. La corriente es rectificadora y aplicada a la bobina de operación de una unidad de relé polarizado. La corriente aplicada a la unidad de frenado tiene la forma de la Ec. 1-10.

La unidad de relé polarizado realiza una comparación de las amplitudes de la corriente operación y la corriente de frenado e implementada la característica diferencial de porcentaje utilizada en la ecuación siguiente:

$$|I_0| > m - |I_r| \quad \text{Ec. 1-9}$$

La unidad de armónico compara una señal de operación formada por la componente fundamental más los armónicos de orden tres y superiores de la corriente de operación, con una señal de frenado que es proporcional al segundo armónico de la corriente operación. La operación de unidad de bloqueo por armónicos puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$|I_0| + K_3|I_3| + K_4|I_4| + \dots > K_2|I_2| \quad \text{Ec. 1-10}$$

### 2.3.6.2. Bloqueo por segundo y quinto armónico

Usualmente, los relés diferenciales numéricos utilizan una lógica de bloqueo por segundo y quinto armónicos. El relé diferencial genera un disparo si la condición definida por la Ec. 1-10 es satisfecha así como las condiciones definidas en las ecuaciones siguientes:

$$|I_0| > k_2|I_2| \quad \text{Ec. 1-11}$$

$$|I_0| > k_5|I_5| \quad \text{Ec. 1-12}$$

Es importante apreciar que, en este caso, la corriente operación es comparada independientemente con la corriente de frenado y con las componentes del segundo y quinto armónico de la corriente operación.

Es práctica común utilizar el quinto armónico de la corriente operación para evitar la operación del relé diferencial cuando el transformador protegido experimenta sobreexcitación. Una solución puede ser utilizar un sistema de bloqueo de armónicos en el cual el quinto armónico es independientemente comparado con la corriente operación. En este esquema, dado un ajuste del relé, en términos del porcentaje del quinto armónico, siempre representa la misma condición de sobreexcitación. En un sistema de frenado por quinto armónico, un ajuste dado puede representar diferentes condiciones de sobreexcitación dependiendo de otros armónicos que puedan estar presentes.

### 2.3.6.3. Compartición de armónicos

La compartición de armónicos es una modificación de la técnica de bloqueo por armónicos. En esa técnica el contenido armónico de las tres fases es sumada antes de comprobar si la relación de la componente fundamental y las componentes armónicas de la corriente operación supera un umbral preestablecido. Esta aproximación añade seguridad en aplicaciones en las cuales el control de armónicos de una o dos fases no es suficiente para bloquear la operación del relé.

### 2.3.7. Métodos de reconocimiento de la forma de onda

Las técnicas de reconocimiento de la forma de onda representan otra alternativa para discriminar faltas internas de condiciones de conexión del transformador. No obstante, estas técnicas fallan al identificar la sobreexcitación del transformador como la presencia del quinto armónico realiza con efectividad. La identificación de la separación de los picos de la corriente diferencial representa un grupo importante de los métodos de reconocimiento de la forma de onda. En [8] el autor propone bloquear la operación del relé si los sucesivos picos de la corriente diferencial no ocurren en aproximadamente entre 7,5 y 10 ms para un sistema de 60 Hz.

### 2.3.8. Método de detección de baja corriente

En [9] se utiliza un principio muy conocido que reconoce la longitud de los intervalos de tiempo durante los cuales la corriente diferencial es casi nula. La figura 2-11 muestra el concepto básico de este sistema de detección.

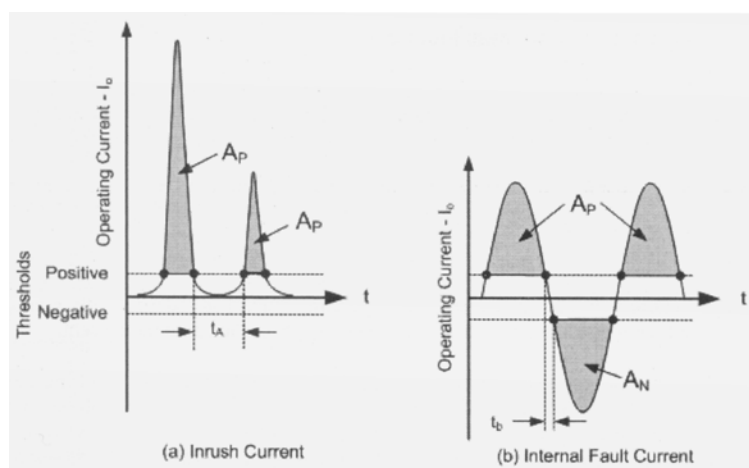


Fig. 2-9. Bloqueo de relé diferencial mediante el reconocimiento de la duración de los intervalos de baja corriente (fuente: [\*]).

La corriente diferencial es comparada con los umbrales positivo y negativo de magnitudes iguales. Esta comparación ayuda a determinar los intervalos durante los cuales el valor de la corriente es menor que el valor del umbral. Los intervalos de tiempo se comparan entonces electrónicamente con el valor umbral de un cuarto de ciclo. Para las corrientes de conexión mostradas en la parte (a) de la Fig. 1-9, los intervalos de baja corriente,  $t_A$ , son

mayores que un cuarto de ciclo y el relé es bloqueado. En faltas internas mostradas en la parte (b) de la Fig. 1 9, los intervalos de baja corriente,  $t_b$ , son menores que un cuarto de ciclo, y el relé opera.

Es posible que los intervalos de baja corriente de la corriente de conexión no sean mayores que un cuarto de ciclo que en algún caso específico. Si esto sucede, en la técnica de detección de corriente falla son necesarias medidas de corrección para identificar la situación como de conexión.

### 2.3.9. Método de bloqueo por corriente continua

Este método de reconocimiento de la forma de onda depende de la información de la señal de corriente continua además del contenido eran únicos de la corriente diferencial. La componente de corriente continua de la corriente de conexión usualmente tiene una constante de tiempo mayor que para el caso de faltas internas. La presencia de un desplazamiento de corriente continua en la corriente de conexión es un indicador adicional que se puede utilizar para garantizar la seguridad del relé durante la conexión del transformador. Este método de reconocimiento de la forma de onda es relativamente sencillo de aplicar en los relés digitales, ya que la componente de corriente continua es un proceso de filtrado pasa-bajo.

El método de bloqueo por corriente continua lo realiza el relé dividiendo la corriente diferencial en sus semiciclos positivos y negativos y calcula las sumas de un ciclo para ambos semiciclos. La suma de los semiciclos positivos es proporcional al área  $A_p$  mostrada en la Fig. 1-10, y la suma de los semiciclos negativos es proporcional área  $A_N$ . Las sumas de ciclo positiva  $S_p$  y negativa  $S_N$  de la corriente diferencial son obtenidas así. Por tanto, el mínimo y el máximo de los valores absolutos de las dos sumas de un ciclo son determinados, y la relación de corriente continua  $D_R$  se calcula dividiendo la suma del ciclo menor entre la suma del ciclo mayor. Cuando  $D_R$  es menor que un valor umbral el relé envía una señal de bloqueo. La Fig. 1-10 muestra el diagrama lógico del método de bloqueo por corriente continua para un relé elemental.

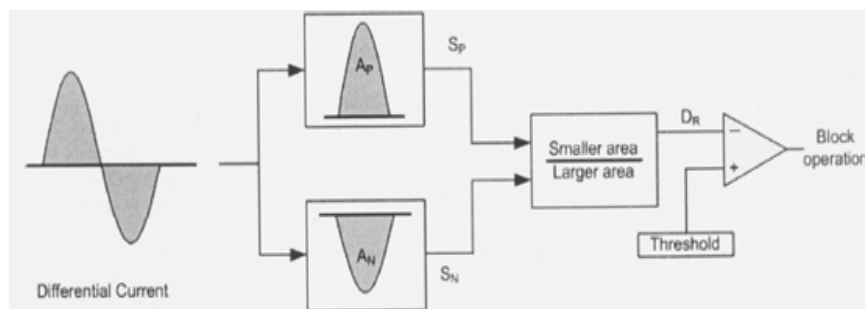


Fig. 2-10. Diagrama lógico del bloqueo por corriente continua.

### 2.3.10. Relé de bloqueo lógico

La seguridad de los relés frenados por armónicos se puede mejorar utilizando una señal de bloqueo cruzado temporal que consiste en frenar toda la unidad cuando la corriente de una fase tiene suficiente con su armónico en vez de requerir un contenido de armónicos suficiente en las tres fases. Esto es deseable, aunque el problema es que tienen control único suficiente en algunas fases durante la conexión. No obstante, el bloqueo común tiene la desventaja de la posibilidad de retardar un disparo al conectar un transformador en falta si las fases sanas detectan conexión. El efecto del bloqueo cruzado puede limitarse a la conexión utilizando una limitación temporal ya que el bloqueo por armónicos puede también causar retardos al disparo en faltas internas por saturación de los transformadores de intensidad.

Los relés diferenciales trifásicos que utilizan frenado por armónicos independiente para cada fase realizan una acción de protección cuando cualquiera de los tres elementos de fase opera. Los relés diferenciales trifásicos que utilizan bloqueo por armónicos usan dos aproximaciones diferentes. Una aproximación consiste en utilizar el frenado por armónicos en cada elemento de fase del relé; en este diseño el relé realiza una acción de protección cuando cualquiera de los elementos de fase opera. La segunda aproximación consiste en bloquear la operación del relé trifásico si el elemento de bloqueo opera para alguno de los elementos de fase.

Los relés diferenciales numéricos modernos dan la opción al usuario de configurar el relé de forma que pueda elegir entre varias opciones de bloqueo, como el frenado por armónicos pares, bloqueo por quinto armónico, bloqueo por corriente continua o cualquier combinación de los bloqueos descritos, como se puede observar en la lógica utilizada para seleccionar estas opciones en uno de los relés se muestra en la Fig. 1-11. En este caso, los elementos diferenciales operan en modo de bloqueo sólo. La habilitación o deshabilitación de cada función de bloqueo se obtiene con los interruptores  $S_2$  a  $S_5$ .

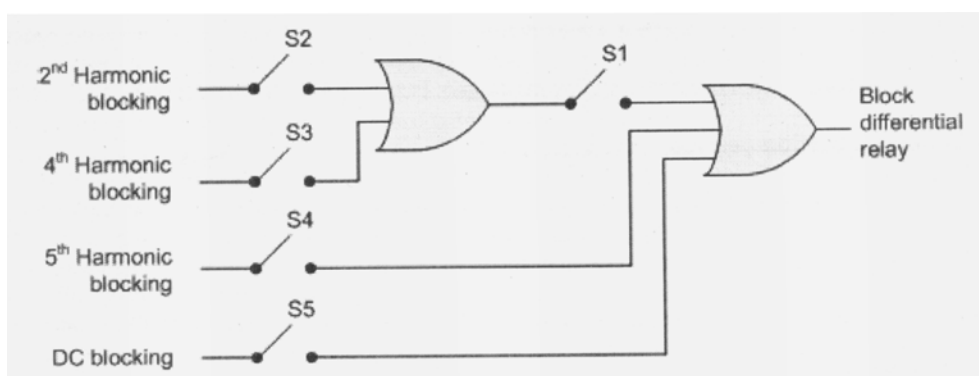


Fig. 2-11. Esquema de bloqueo lógico para relé diferencial numérico.

El propósito de este diseño es proporcionar un relé que frene adecuadamente sin importar la cantidad de corriente de conexión pero que permita una relativamente alta velocidad de operación si ocurre una falta interna con o sin corriente de conexión simultánea.

Para proporcionar protección durante la saturación del transformador de intensidad, los relés diferenciales modernos con frenado por armónicos también incorporan relés de

sobreintensidad instantáneos sin frenado que son ajustados por encima del máximo de la corriente de conexión esperada pero por debajo de la corriente que puede resultar en la saturación por corriente alterna del transformador de intensidad. El ajuste habitual es de ocho a 10 veces el valor nominal.

Al utilizar relés frenados por armónicos se debe tener en cuenta el funcionamiento durante la sobreexcitación del transformador. El funcionamiento del relé diferencial sobre una corriente de excitación debida a la sobreexcitación depende de la magnitud de la corriente, el contenido de armónicos en la corriente (fundamentalmente armónicos impares), la forma de la onda y la característica de frenado del relé. Un relé que frena para armónicos impares (en adición al segundo armónico presente durante la corriente de conexión) es poco probable que opere bajo tales condiciones. Por otro lado los transformadores conectados a rectificadores de sistemas de control de velocidad, cuyas corrientes contienen altos niveles de armónicos impares, se protegerían mejor por el relés frenados por armónicos utilizando sólo el segundo armónico.

Los relés diferenciales frenados por armónicos a menudo se justifican en base a los siguientes puntos:

- Menos disparos falsos debidos a la corriente de conexión.
- Tiempo de operación más rápido.
- Menor subida.

Se han observado disparos intempestivos de relés diferenciales frenados por armónicos cuando se energizan transformadores directamente conectados a líneas de transporte. Un análisis de las formas de onda de las corrientes de conexión en esta configuración ha demostrado una reducción en el contenido de armónicos comparado con transformadores aislados de la línea.

## **2.4. Protección diferencial digital.**

Según [8] desde los años 70 se están proponiendo relés digitales que utilizan microcomputadores.

Las principales características que han animado a muchos investigadores a trabajar en la posibilidad del diseño de relés digitales para la protección de sistemas de potencia son su economía, fiabilidad, flexibilidad y funcionamiento mejorado comparado con los relés convencionales y la posibilidad de integrar un relé digital en la jerarquía de un sistema por ordenador dentro de la subestación. La introducción de los microprocesadores ha creado nuevas posibilidades económicas para el desarrollo de sistemas de protección para sistemas de potencia y aparatos de potencia. La capacidad de los microprocesadores actuales es tal que un sistema con microprocesador puede realizar todas las funciones digitales que antes realizaba un ordenador.

Como resultado de esto muchos investigadores publican los resultados de su trabajo con relación a técnicas de software para relés basados en microprocesador.

Se han publicado muchos trabajos sobre protección digital de transformadores de potencia presentando nuevos algoritmos para la protección diferencial; el problema más importante en una protección diferencial es la discriminación entre una corriente de conexión y una falta interna del transformador. Para ello se han propuesto numerosas formas y métodos para discriminar entre ambas corrientes, de las cuales vamos a hablar en los siguientes apartados.

### 2.4.1. Métodos de discriminación

En este apartado se explican los diferentes algoritmos propuestos para la discriminación de las corrientes de conexión frente a las corrientes de falta interna, para el caso de protección diferencial digital de transformadores de potencia.

#### 2.4.1.1. Métodos por segundo armónico

Sykes y Morrison [9] propusieron en 1972 el uso de filtros de paso de banda recurrente para calcular el contenido de la componente fundamental y del segundo armónico. Una vez obtenida la componente fundamental y el segundo armónico, rectificaban estas señales y para poder compararlas han implantado un filtro de pasa baja para 10 Hz, el cual se basa en la ecuación:

$$H(f) = \frac{\sum_{K=0}^K h_K * e^{-j2\pi f k \Delta t}}{1 - \sum_{P=1}^P g_P * e^{-j2\pi f p \Delta t}} \quad \text{Ec. 1-13}$$

donde:

- K es número de ceros.
- P es número de polos.

Los autores concluyeron que quedará demostrado que las técnicas de protección diferencial frenada por armónicos podría ser adaptada para la protección de transformadores mediante sistemas digitales.

Larson, Flechsig y Schweitzer [11] proponen en 1979 filtros de respuesta al impulso finita (FIR) para calcular la magnitud de las componentes fundamentales y de segundo armónico. Esto junto con un algoritmo de sobreintensidad diferencial se implementa en un sistema con microprocesador. Con este algoritmo consigue evitar la multiplicación y la división lo que permite el uso de un hardware de muy bajo coste.

Este sistema transformaba los datos analógicos del transformador en datos de entrada digitales discretos para los algoritmos del microprocesador. Los algoritmos, operando

en tiempo real, suministraron salidas correctas, indicando la presencia de corriente de conexión, corriente de falta o baja corriente diferencial.

En 1981 Degens [12] y posteriormente Rahman, Dash y Downton en 1982 [13], presentaron un algoritmo para la detección de la corriente de conexión. El algoritmo se basaba en el ajuste de la curva por mínimos cuadrados de muestras de la corriente diferencial por medio del amortiguamiento de la corriente continua y cinco componentes armónicas. La corriente de conexión se detecta a través de la relación entre la componente fundamental y el segundo armónico de la corriente diferencial. La frecuencia de muestreo y la ventana de datos se eligen de acuerdo a una relación cerrada entre la amplificación del ruido y las características de frecuencia de los filtros digitales utilizados. A pesar del detallado ajuste de la curva la carga de los cálculos se mantiene en un mínimo mediante una adecuada elección del tiempo de referencia.

#### **2.4.1.2. Método con funciones de Walsh**

Rahman, Jeyasurya, B. y Gangopadhyay, A., propusieron [16] el uso de las funciones de Walsh para la protección digital de transformadores en 1985.

Las funciones de Walsh forman un conjunto completo de funciones ortonormales. Estas funciones, notadas como  $wal(k, t)$ , son semejantes a las funciones seno-coseno de la transformación de Fourier, apareciendo como versiones al cuadrado de ellas. Sólo toman el valor  $\pm 1$  y cambian de signo sólo cuando  $t$  es múltiplo de una potencia de  $\frac{1}{2}$ . El método de Walsh es muy conveniente cuando se toma un número limitado de muestras que sean potencia entera de dos, ya que precisa una carga computacional más baja. Utilizando las ecuaciones descritas en [16], se puede llegar a los siguientes resultados, en los cuales observamos cómo se puede distinguir fácilmente una corriente de conexión de una falta interna.

#### **2.4.1.3. Método por lógica difusa**

En 1995 Wiszniewsky y Kasztenny [20] presentaron un relé diferencial para la protección de transformadores de potencia utilizando lógica difusa. En sistemas de protección digital las señales del relé son muestreadas a intervalos regulares, digitalizadas y procesadas dentro de una ventana de tiempo predefinida. Ciertas incertidumbres debidas a imprecisiones en la medida y a componentes transitorias pueden ser minimizadas si las señales del relé se representan mediante funciones difusas mediante funciones miembro debidamente definidas.

#### **2.4.1.4. Método por redes neuronales artificiales**

Zaman y Rahman, en 1998 [21] presentaron un estudio experimental de la aplicación de las redes neuronales artificiales a la protección de transformadores de potencia para



discriminar entre corrientes de conexión y corrientes de falta interna. Puesto que la presencia de 2º y 5º armónicos no constituye por sí misma una indicación de la presencia de una corriente de conexión, se hace preciso utilizar algoritmos que no tengan en cuenta el contenido armónico, sino un patrón diferente.

Las redes neuronales artificiales han sido exitosamente implementadas en problemas de reconocimiento de patrones. El problema básico en la utilización de las redes neuronales artificiales es la formulación del problema, para lo que se hace necesario reconocer las entradas y las salidas del sistema. Obviamente las entradas serán las corrientes diferenciales, que en el caso de un transformador trifásico serán tres corrientes diferenciales en cada instante. En cada instante, se toma una ventana de 16 muestras consecutivas de corrientes.

La filosofía de las redes neuronales artificiales consiste en entrenarlas. La red “aprende” unos patrones dados de entradas-salida. Cada patrón de entrada es aplicado a la red la cual se propaga hacia cada uno de los niveles superiores hasta que se alcanza la salida. El entrenamiento se repite hasta que el error en la salida es llevado a un valor mínimo.

Los autores concluyen afirmando la robustez del sistema, sistema que tiene como característica diferenciadora que en el método empleado no se ha utilizado ningún modelo del circuito equivalente del transformador ni se analizó el contenido armónico de las señales.

Nikhil Kumar y otros, en 2008 [01] propusieron un algoritmo parecido al presentado por Zaman y Rahman, el cuál realizaron con el programa de simulación MATLAB SIMULINK.

Una vez realizadas las simulaciones llegaron a la conclusión de que el método utilizado es muy útil para su incorporación en una protección diferencial, ya que no solo discrimina entre corriente de conexión y falta interna, sino también para faltas externas.

#### **2.4.1.5. Métodos por transformada wavelet**

A continuación se realizará un breve estudio del estado del arte sobre las protecciones diferenciales basadas en la transformada wavelet. En el siguiente apartado profundizaremos más sobre la transformada wavelet, ya que es en lo que se basa el actual trabajo.

En 1984 Fakruddin, Parthasarathy, Jenkins y Hogg [15] investigaron sobre la aplicación de las funciones de Haar a la protección diferencial. Las funciones de Haar tienen la propiedad de representar una función con gran precisión utilizando un número reducido de términos. Las características de convergencia de la expansión en las funciones de Haar son superiores a otras funciones. La eficiencia en el cálculo se mejora considerablemente utilizando un algoritmo de factorización similar al utilizado en la transformada rápida de Fourier y en la transformada de Walsh. El número total de sumas o restas es  $2(N-1)$ . Por tanto el tiempo de transformación es linealmente proporcional al número de términos  $N$ , en contraste con las transformaciones de Fourier y Walsh en la que es proporcional a  $N \cdot \log_2 N$ .

En 2000 P.L. Mao<sup>1</sup>, R.K. Aggarwal [02] propusieron un método de lógica para discriminar entre corriente de conexión y falta interna basado en la transformada wavelet, ya

que según los autores las características extraídas por la transformada wavelet tiene una propiedad más clara de distinguir estos dos efectos, que la que se consigue mediante la transformada de Fourier, debido a la rápida localización de frecuencias características de la transformada wavelet. Como resultado de las características extraídas nos indica que la decisión para distinguir entre corriente de conexión y falta interna en diferentes sistemas de transformadores de potencia es realizable con precisión

Para determinar si la intensidad diferencial es debida a una corriente de conexión o a una falta interna, los autores utilizan la Ec. 1-14, Ec. 1-15 y Ec. 1-16 para compararlas con un valor  $\epsilon$ , el cual han determinado que es 0,4. En el caso que alguno de los valores obtenidos de las ecuaciones anteriores es mayor que  $\epsilon$ , tenemos una corriente de conexión o una falta externa, en caso contrario tenemos una falta interna.

$$I_{a-ratio} = \frac{I_a^k - d1, max}{I_a - d1, max} \quad Ec. 1-14$$

$$I_{b-ratio} = \frac{I_b^k - d1, max}{I_b - d1, max} \quad Ec. 1-15$$

$$I_{c-ratio} = \frac{I_c^k - d1, max}{I_c - d1, max} \quad Ec. 1-16$$

Los autores concluyen que los resultados de simulación muestran que el método propuesto es aplicable en la detección de la corriente de entrada de varios tipos de fenómenos transitorios.

En 2005 A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam [03] propusieron un método similar al anterior, ya que utiliza la transformada wavelet, pero en [02] utilizan el primer detalle de la transformada de wavelet de Daubechies (d1) y en el actual utilizan el sexto (d6). Proponen utilizar la señal primitiva y la suma absoluta de la señal obtenida de “d6”; también van un paso más adelante y no sólo proponen discriminar entre falta interna y corriente de conexión, sino también fenómenos como una conmutación de carga o de un condensador

En 2005 S. A. Saleh, M. A. Rahman [04], presentan un nuevo algoritmo para la protección diferencial de transformadores de potencia trifásicos que se basa en el paquete de la transformada wavelet. El paquete de la transformada wavelet se emplea para extraer ciertas características de la corriente diferencial para distinguir entre la corriente de magnetización y diferentes corrientes de falla internos. El algoritmo se basa en la evaluación de los coeficientes “wavelet packet transform” (WPT) de la segunda sub-banda de frecuencias de nivel. La selección del análisis wavelet óptimo que incluye la selección tanto de la wavelet madre óptima y el número óptimo de niveles de resolución se lleva a cabo utilizando los criterios de datos de longitud mínima de descripción “Minimum Description Length” (MDL). El algoritmo

propuesto se prueba fuera de línea utilizando los datos obtenidos de un transformador de potencia trifásico de laboratorio prototipo. Los resultados del ensayo muestran una reducción de la carga computacional de alta velocidad y alta precisión.

En 2007 H. Monsef y S. Lotfifard [05], proponen utilizar la transformada wavelet junto con sistema de inferencia difusa basada en la red adaptativa (ANFIS), para discriminar entre corriente de conexión y falta interna. Para ello observaron que una corriente de conexión posee mayor pendiente que una falta interna; una pendiente más grande en el dominio del tiempo muestra que hay frecuencias más altas en el dominio de frecuencia.

Con base en los principios anteriores, se espera que la amplitud de las altas frecuencias en los instantes iniciales del tiempo tenga una tendencia a desaparecer después de las faltas internas.

También se espera que la amplitud de las componentes de alta frecuencia en el momento inicial tenga una tendencia creciente en la corriente de conexión. Esto significa que sus amplitudes aumentan desde un valor bajo a un valor alto. La intensidad diferencial debida a la corriente de conexión en  $t = 0,3$  s y la frecuencia resultante de WT se presentan en la figura 2-37 (D1-D5). Las características descritas anteriormente son claramente visibles en D5.

En 2011 A. Rahmati and M. Sanaye-Pasand [06], proponen otro algoritmo para discriminar entre la corriente de conexión y faltas internas. La técnica se basa en el reconocimiento de patrones de las corrientes diferenciales usando las componentes de alta frecuencia generadas durante la perturbación. Estas componentes se extraen mediante un procesador basado en wavelets. Utilizando el criterio desarrollado para tres fases, las faltas internas se detectan correctamente en aproximadamente  $1/8$  ciclo después de la ocurrencia de la perturbación.

Para desarrollar el algoritmo se compara la pendiente de la corriente diferencial como se muestra en la figura 2-39, para observar como es la variación de la pendiente en el tiempo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\left| \frac{dI_{diff\_i}}{dt} \right| < \left| \frac{dI_{diff\_f}}{dt} \right|, t \in \left( dist_t, dist_t + \frac{T}{4} \right) \quad Ec. 1-17$$

donde,  $I_{diff\_i}$  e  $I_{diff\_f}$  son corrientes diferenciales instantáneas en condiciones de corriente de conexión y falta interna, respectivamente, "t" es el tiempo, "T" es el período y  $dist_t$  es el tiempo de perturbación.

Además, el algoritmo propuesto se basa en el hecho de que el punto de variación de pendiente para la condición de corriente de conexión comienza más tarde en comparación con la de la condición de falta. Eso significa que al menos para una de las tres fases:

$$t_{Max\left\{\frac{dt_{diff\_i}}{dt}\right\}} - dist_t = \text{intervalo de tiempo corriente de conexión.} \quad Ec. 1-18$$

$$t_{\text{Max}\left\{\frac{dt_{\text{diff-f}}}{dt}\right\}} - \text{dist}_t = \text{intervalo de tiempo falta.} \quad \text{Ec. 1-19}$$

$$\text{intervalo de tiempo corriente de conexión} > \text{intervalo de tiempo falta} \quad \text{Ec. 1-20}$$

Se sabe que las variaciones bruscas en el dominio del tiempo (es decir, lugares en los que la pendiente de la señal cambia rápidamente) dan componentes de alta frecuencia en el dominio de la frecuencia. En consecuencia, se puede concluir que, en el intervalo de tiempo inicial después de una perturbación, los componentes de alta frecuencia para una falta interna son más altos comparados con los de la corriente conexión. Mediante la aplicación de la WT a la corriente diferencial instantánea del transformador, se espera que los componentes más altos se obtengan para la falta interna en comparación con los componentes de la corriente de conexión.

## 3. Transformada wavelet.

---

En este capítulo se presentan los antecedentes y el desarrollo histórico de la protección de transformadores, centrándose fundamentalmente en la protección diferencial y los problemas relacionados con la misma.

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo nos centraremos en la llamada Transformada Wavelet, desde el punto de vista histórico [7]. El análisis por la transformada wavelet es un método novedoso, por otra parte sus fundamentos matemáticos se basan a la obra de Joseph Fourier en el siglo XIX.

La primera mención que se tiene constancia de la expresión WAVELET fue en 1909, en la tesis de Alfred Haar. Aunque el concepto de transformada wavelet como lo conocemos actualmente fue propuesto por primera vez por Jean Morlet y su equipo en el Centro de Física Teórica de Marsella en Francia.

Los métodos desarrollados hasta el momento han sido llevados a cabo principalmente por Y. Meyer y su equipo. El algoritmo principal es desarrollado por Stephane Mallat en 1988. Desde ese momento los investigadores han demostrado gran interés por este método. En la actualidad la investigación sobre la transformada wavelet se desarrolla principalmente en EEUU, donde está encabezada por los científicos Ingrid Daubechies, Ronald Coifman, y Víctor Wickerhauser. Dicho lo anterior, no podemos olvidarnos del profesor M. A. Rahman actualmente profesor en una universidad de Canadá, que ha realizado un gran trabajo en el campo de la aplicación de la transformada wavelet aplicada a señales eléctricas.

Esta herramienta es eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad y, al igual que la Transformada de Fourier con Ventana, analiza la señal en una representación de tiempo-escala. La diferencia está en que la Transformada Wavelet provee análisis de multirresolución con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas estrechas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas.

La Transformada Wavelet no es solamente local en tiempo, como ocurre en otros métodos, sino también en frecuencia.

Esta poderosa herramienta se utiliza, además del análisis local de señales no estacionarias, en el análisis de señales electrocardiográficas, sísmicas, de sonido, de radar, así como también se utiliza para la compresión y procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones.

### 3.2. Bases de la función escala

La función de escala es una base ortonormal que juega el papel de función promedio. La correlación entre la función de escala y una función continua arbitraria produce la aproximación promediada de la última.

La función de escala básica  $\phi(t)$ , dilatada por un factor de escala  $2^i$ , es desplazada con un factor de escala discreto de traslación  $k$ ,

$$\phi_{i,k}(t) = 2^{-i/2} \phi(2^{-i}t - k) \quad \text{Ec. 2-1}$$

Las funciones de escala básica  $\phi(t)$  que se emplean satisfacen la condición de ortogonalidad, tal que las traslaciones discretas  $\{\phi(t-k)\}$  con  $k \in \mathbf{Z}$ , forman un conjunto ortonormal. La proyección de una función  $f(t) \in \mathbf{L}^2(\mathbf{R})$  en la base ortonormal  $\{\phi(t-k)\}$  es una correlación entre la función  $f(t)$  original y la función de escala  $\phi(t)$  muestreada a intervalos enteros.

Como resultado de la proyección de  $f(t)$  en la base de la función de escala, se obtiene una aproximación menos detallada de  $f(t)$ . Todas las aproximaciones de  $f(t)$  forman un subespacio  $V_0 \in \mathbf{L}^2(\mathbf{R})$ . El espacio vectorial  $V_0$  puede ser interpretado como el conjunto de todas las posibles aproximaciones de la función en  $\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$  generado por el conjunto ortonormal  $\{\phi(t-k)\}$ .

Las funciones de escalas para todas las escalas  $s = 2^i$  con  $i \in \mathbf{Z}$ , generadas a partir de la misma  $\phi(t)$ , son todas de forma similar. Debido a que la función de escala básica  $\phi(t)$  genera la base ortonormal  $\{\phi(t-k)\}$  de  $V_0$ , con un paso de traslación entero, la función de escala dilatada  $\phi(t/2)$  generará la base ortonormal  $\{\phi(2^{-1}t-k)\}$  de  $V_1$  con un paso de traslación igual a 2, y  $\phi(t/4)$  generará la base ortonormal  $\{\phi(2^{-2}t-k)\}$  de  $V_2$  con un paso de traslación igual a 4, y así sucesivamente. Existe entonces un conjunto de bases ortogonales de las funciones de escala. Cada base de la función de escala es ortonormal en el espacio de la misma escala:

$$\langle \phi_{i,k}, \phi_{i,n} \rangle = \delta_{k,n} \quad \text{Ec. 2-2}$$

para todo  $k$  y  $n \in \mathbf{Z}$ .

Las proyecciones en  $\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$  sobre el conjunto de bases ortonormales de la función de escala, forman un conjunto de subespacios  $V_i$ . Cada subespacio  $V_i$  es el conjunto de todas las posibles aproximaciones de la función en  $\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$  generado por la base ortonormal de la función de escala  $\phi(2^{-i}t-k)$ . El subespacio  $V_i$  es abarcado por la base ortonormal de la función de escala

en el nivel de resolución  $i$ . Por lo tanto, la función de escala  $\phi(t)$  genera los subespacios del análisis multiresolución.

Las aproximaciones de una función  $f(t)$  en diferentes resoluciones deben ser similares, ya que son todas generadas por la misma función de escala con escalas diferentes. Los espacios de aproximación  $V_i$  pueden ser, entonces, deducidos unos de otros por simple dilatación:

$$f(t) \in V_i \leftrightarrow f(2t) \in V_{i-1} \quad \text{Ec. 2-3}$$

Toda la información útil para calcular la función de aproximación en el nivel de menor resolución  $i$ , está contenida en la función de aproximación en el nivel de mayor resolución ( $i-1$ ). Entonces,  $V_i$  es un subespacio de  $V_{i-1}$ .

### 3.3. Bases Wavelet

A causa de que la proyección de una función sobre la base de la función de escala ortonormal es una aproximación menos detallada de la función en un nivel de resolución particular, se pierde algo de información en el proceso; esto significa que la función de escala  $\phi$  no es completa a cualquier nivel. Por lo tanto, se usan las proyecciones sobre otras funciones, denominadas *wavelet ortonormales* (o simplemente *wavelets*), para obtener la información complementaria de los detalles de la función.

Como se verá más adelante, las wavelets son generadas a partir de la *wavelet madre*  $\psi(t)$  por traslaciones y dilataciones discretas

$$\Psi_{i,k}(t) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i}t - k) \quad \text{Ec. 2-4}$$

Cuando la transformada de Fourier  $\psi(w)$  de la wavelet madre satisface la condición de ortogonalidad, las traslaciones discretas de las wavelet madre  $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$  forman una base ortonormal para cada escala  $2^i$ . Más aún, en el mismo nivel de resolución, el conjunto de traslaciones wavelet es ortogonal al conjunto de traslaciones de la función de escala en el espacio de la misma resolución

$$\langle \phi_{i,k}, \Psi_{i,n} \rangle = 2^{-i} \int \phi_i(t-k) \Psi_i(t-n) dt = 0 \quad \text{Ec. 2-5}$$

para todo  $k$  y  $n \in \mathbf{Z}$ .

La proyección de  $f(t)$  sobre las bases wavelet ortonormales es una correlación entre  $f(t)$  y  $\psi(t)$  muestreada a intervalos discretos. Las proyecciones de las funciones en  $\mathbf{L}^2(\mathbf{R})$  sobre la base wavelet ortonormal  $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$ , forman un subespacio  $W_i$ . El subespacio  $W_i$  es abarcado por  $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$ .

Como la base wavelet  $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$  es ortogonal a la base de función de escala  $\{\psi(2^{-i}t-k)\}$ , dentro de la misma escala, el subespacio  $W_i$  es el complemento ortogonal del subespacio  $V_i$ :

$$W_i \perp V_i \quad \text{Ec. 2-6}$$

Tanto  $V_i$  como  $W_i$  son subespacios de  $V_{i-1}$  ( $V_i, W_i \in V_{i-1}$ ), y en razón de que  $W_i$  es el complemento ortogonal de  $V_i$ , el subespacio  $V_{i-1}$  es la suma directa de  $V_i$  y  $W_i$ :

$$V_{i-1} = V_i \oplus W_i \quad \text{Ec. 2-7}$$

### 3.3.1. Transformada Wavelet

Genéricamente, la Transformada Wavelet de una función  $f(t)$  es la descomposición de  $f(t)$  en un conjunto de funciones  $\Psi_{s,\tau}(t)$ , que forman una base y son llamadas las "Wavelets". La Transformada Wavelet se define como:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \Psi_{s,\tau}(t) dt \quad \text{Ec. 2-8}$$

Las Wavelets son generadas a partir de la traslación y cambio de escala de una misma función wavelet  $\psi(t)$ , llamada la "Wavelet madre", y se define como:

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad \text{Ec. 2-9}$$

donde  $s$  es el factor de escala, y  $\tau$  es el factor de traslación.

Las wavelets  $\Psi_{s,\tau}(t)$  generadas de la misma función wavelet madre  $\Psi(t)$  tienen diferente escala " $s$ " y ubicación  $\tau$ , pero tienen todas la misma forma. Se utilizan siempre factores de escala  $s > 0$ . Las Wavelets son dilatadas cuando la escala  $s > 1$ , y son contraídas cuando  $s < 1$ . Así, cambiando el valor de " $s$ " se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro " $s$ " corresponden a frecuencias de menor rango, o una escala grande de  $\Psi_{s,\tau}(t)$ . Valores pequeños de " $s$ " corresponden a frecuencias de menor rango o una escala muy pequeña de  $\Psi_{s,\tau}(t)$ .

### 3.3.2. Wavelets ortogonales y discretas

Cuando la función  $f(t)$  es continua y las wavelets son continuas con factor de escala y traslación discretas, la Transformada Wavelet resulta en una serie de coeficientes wavelets, y es llamada la descomposición en Series Wavelet.

La función  $f(t)$  puede ser reconstruida desde los coeficientes wavelets discretos  $W_f(s,\tau)$ , de la siguiente manera:



$$f(t) = A \sum_s \sum_\tau W_f(s, \tau) \Psi_{s, \tau}(t) \quad \text{Ec. 2-10}$$

donde  $A$  es una constante que no depende de  $f(t)$ .

A estas funciones wavelets continuas con factores de escala y traslación discretos se las denomina *Wavelets discretas*. Los factores de escala y traslación de las wavelets discretas pueden ser expresados como:

$$s = s_0^i \quad y \quad \tau = k\tau_0 s_0^i \quad \text{Ec. 2-11}$$

donde el exponente  $i$  y la constante  $k$  son enteros, y  $s_0 > 1$  es un paso fijo de dilatación.

El factor de traslación  $\tau$  depende del paso de dilatación “ $s$ ”, como se aprecia en la Ec. 2-11. Entonces, a partir de la Ec. 2-9 y con la Ec. 2-11, las correspondientes wavelets discretas quedan expresadas como:

$$\Psi_{i,k}(t) = s_0^{-i/2} \Psi(s_0^{-i}(t - k\tau_0 s_0^i)) = s_0^{-i/2} \Psi(s_0^{-i} t - k\tau_0) \quad \text{Ec. 2-12}$$

A través de la Ec. 2-8, la Transformada Wavelet de una función continua es realizada a frecuencias y tiempos discretos que corresponden a muestreos con distintas traslaciones (tiempo) y distintas dilataciones (o cambios de escala).

El paso de muestreo en tiempo es pequeño para el análisis utilizando wavelets de pequeña escala, mientras que es grande para el análisis con wavelets de gran escala. La posibilidad de variar el factor de escala “ $s$ ” permite usar wavelets de escala muy pequeña para concentrar el análisis en singularidades de la señal. Cuando solo los detalles de la señal son de interés, solamente son necesarios unos pocos niveles de descomposición. Por lo tanto el análisis wavelet provee una forma más eficiente de representar señales transitorias.

A modo de ejemplo, podemos hacer una analogía entre el análisis de Wavelet y el microscopio. Así, el factor de escala  $s_0^i$  corresponde al aumento o resolución del microscopio y el factor de traslación  $\tau$  corresponde a la ubicación donde se hace la observación con el microscopio. Si queremos mirar detalles muy pequeños, el aumento y la resolución deben ser grandes, lo que se corresponde con una  $i$  grande y negativa. Esto da lugar a una función wavelet muy concentrada, y a pasos de traslación pequeños. Para un valor de  $i$  grande y positivo, la wavelet se extiende y los pasos de traslación son adaptados a esa amplitud.

Eligiendo adecuadamente  $\Psi(t)$  y los parámetros  $s_0, \tau_0$ , es posible lograr que las funciones  $\Psi_{s, \tau}(t)$  constituyan una base ortonormal de  $L^2(\mathbf{R})$ . En particular si se elige  $s_0 = 2$  y  $\tau_0 = 1$ , entonces existe  $\Psi(t)$ , con buenas propiedades de localización tiempo–frecuencia, tal que  $\Psi_{s, \tau}(t)$  constituye una base ortonormal  $L^2(\mathbf{R})$ .

De esta forma, si las funciones wavelets discretas forman una base ortonormal, una función  $f(t)$  de soporte finito puede ser reconstruida como una suma de los coeficientes wavelets discretos  $W_f(s, \tau)$  multiplicados por las funciones de la base, como sigue:

$$f(t) = \sum_s \sum_\tau W_f(s, \tau) \Psi_{s,\tau}(t) \quad \text{Ec. 2-13}$$

Una descomposición wavelet ortonormal no posee información redundante y representa la señal en forma unívoca. Una base wavelet ortonormal es posible con wavelets con factores de traslación y dilatación discretos [8]. Por lo tanto, para estas funciones wavelets discretas ortogonales, los productos internos son iguales a cero:

$$\int \Psi_{i,k}^*(t) \Psi_{m,n}(t) dt = \begin{cases} 1 & \text{Si } i = m \text{ y } k = n \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad \text{Ec. 2-14}$$

### 3.3.3. Descomposición Wavelet

Sea la función  $f(t) \in V_0$  que puede ser representada como la combinación lineal de las funciones de escala trasladadas  $\phi(t-k)$  en  $V_0$

$$f(t) = \sum_k c_0(k) \phi(t-k) \quad \text{Ec. 2-15}$$

donde los coeficientes vienen dados por

$$c_0(k) = \langle f, \phi_{0,k} \rangle = \int f(t) \phi(t-k) dt \quad \text{Ec. 2-16}$$

La función a ser analizada pertenece a  $V_0$ , el cual corresponde al nivel de digitalización inicial al comenzar la descomposición. En el siguiente nivel de menor resolución  $i = 1$ , existen dos subespacios mutuamente ortogonales  $\{\phi_{i,k}(t)\}$  y  $\{\psi_{i,k}(t)\}$ , respectivamente. Debido a que  $V_0$  es la suma directa de  $V_1$  y  $W_1$ , existe una única forma de expresar una función  $f(t) \in V_0$ , como combinación lineal de funciones  $v_1$  y  $w_1$ , donde  $v_1 \in V_1$  y  $w_1 \in W_1$ . En particular, la función  $f(t) \in V_0$  puede descomponerse en sus componentes a lo largo de  $V_1$  y  $W_1$ :

$$f = (P_1 + Q_1)f \quad \text{Ec. 2-17}$$

donde las dos componentes son las proyecciones ortonormales de  $f(t)$  sobre  $V_1$  y  $W_1$ :

$$P_1 f = \sum_n c_1(n) \phi_{1,n} \quad Q_1 f = \sum_n d_1(n) \psi_{1,n} \quad \text{Ec. 2-18}$$

Multiplicando ambos lados de la Ec. 2-17 por  $\phi_{1,k}$  y calculando los productos internos, se obtiene:

$$\langle \phi_{1,k}, f \rangle = \langle \phi_{1,k}, p_1 f \rangle \quad \text{Ec. 2-19}$$

Haciendo lo mismo en la Ec. 2-18 pero multiplicando por  $\phi_{1,n}$  y usando Ec. 2-15, se obtiene:

$$C_1(k) = \langle \phi_{1,k}, f \rangle = \langle \phi_{1,k}, p_1 f \rangle = \sum_n \langle \phi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle C_0(n) \quad \text{Ec. 2-20}$$

donde el producto interno entre los dos conjuntos de la función de escala  $\{\phi_{1,k}\}$  y  $\{\phi_{0,n}\}$  se puede calcular como

$$\langle \phi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle = 2^{-1/2} \int \phi\left(\frac{t}{2} - k\right) \phi(t - n) dt = 2^{1/2} \int \phi(t) \phi(2t - (n - 2k)) dt \quad \text{Ec. 2-21}$$

Sustituyendo  $\phi(t)$  por la relación dos-escala en la Ec. (3.21) y usando la ortonormalidad del conjunto  $\{\phi(2t)\}$  se obtiene:

$$C_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n p(n - 2k) c_0(n) \quad \text{Ec. 2-22}$$

La secuencia  $c_1(k)$  o *tendencia* contiene los coeficientes del desarrollo de la función continua  $f(t)$  en la base de la función de escala continua  $\{\phi_{1,k}\}$  en  $V_1$ . La secuencia  $c_1(k)$  representa la versión suavizada de los datos originales  $c_0(n)$ .

Simultáneamente, multiplicando ambos lados de las Ec. 2-17 y Ec. 2-18 por la wavelet  $\Psi_{1,n}$  y calculando los productos internos, se obtiene:

$$d_1(k) = \langle \Psi_{1,k}, Q_1 f \rangle = \langle \Psi_{1,k}, f \rangle = \sum_n \langle \Psi_{1,k}, \phi_{0,n} \rangle C_0(n) \quad \text{Ec. 2-23}$$

y siguiendo los pasos aplicados para la obtención de  $c_1(k)$  se llega a que:

$$d_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n q(n - 2k) C_0(n) \quad \text{Ec. 2-24}$$

De acuerdo con la Ec. 2-17, la proyección ortonormal  $Q_1 f$  sobre  $W_1$  es la información de *detalle* de  $f(t)$ . La secuencia  $d_1(n)$  representa la diferencia entre la  $f(t)$  original y la aproximación  $P_1 f$ , y se conoce como los *coeficientes wavelet discretos*.

La descomposición en aproximaciones suavizadas y detalles a menor resolución se puede continuar tanto como se desee.

Generalizando,

$$P_{i-1}f = P_i f + Q_i f = \sum_k C_i(k)\phi_{i,k} + \sum_k d_i(k)\Psi_{i,k} \quad \text{Ec. 2-25}$$

donde:

$$c_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n p(n-2k)C_{i-1}(n) \quad \text{Ec. 2-26}$$

$$d_1(k) = 2^{-1/2} \sum_n p(n-2k)C_{i-1}(n) \quad \text{Ec. 2-27}$$

La secuencia  $c_i(n)$  y  $d_i(n)$  pueden ser calculadas a partir de  $c_{i-1}(n)$  por filtrado iterativo.

De esta manera, iterando hasta un nivel de resolución  $M$ , donde  $M$  toma un valor determinado, se puede representar la función original  $f(t)$  por una serie de funciones detalle más una aproximación gruesa:

$$f(t) = P_M f + Q_M f + Q_{M-1} f + \dots + Q_1 f \quad \text{Ec. 2-28}$$

$$f(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} 2^{-M/2} C_M(k) \phi(2^{-M}t - k) + \sum_{i=1}^M \sum_{k \in \mathbf{Z}} 2^{-i/2} d_i(k) \Psi(2^{-i}t - k) \quad \text{Ec. 2-29}$$

La Ec. 2-29 es la descomposición  $f(t)$  en Series Wavelet. En esta descomposición wavelet las bases de la función de escala y las *bases wavelet* son todas continuas. Los coeficientes de aproximación  $c_M(k)$  y los *coeficientes wavelet*  $d_i(k)$  con  $i = 1, 2, \dots, M$  y  $k \in \mathbf{Z}$  son discretos.

Los coeficientes  $c_1(n)$  y  $d_1(n)$  se pueden calcular con un algoritmo discreto implementado por la aplicación recursiva de filtros discretos paso-alto y paso-bajo a las aplicaciones discretas  $c_{i-1}(n)$ . Este algoritmo es conocido como algoritmo piramidal o de Mallat. Los dos primeros pasos del algoritmo para calcular la descomposición wavelet se muestran en la Fig. 2-1, y en la Fig. 2-2 puede observarse un ejemplo de descomposición wavelet de una señal "S", según [07].

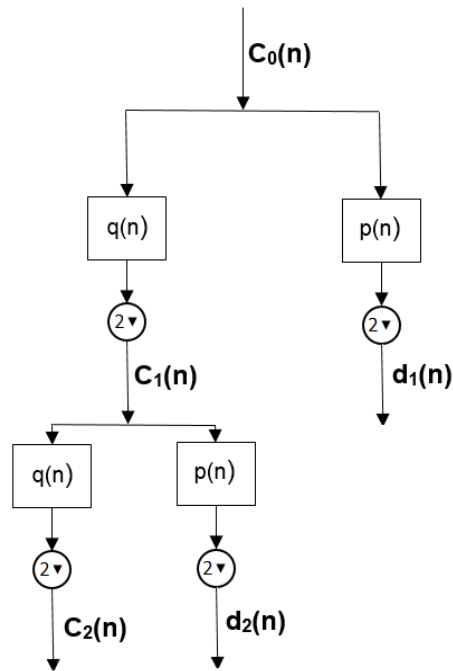


Fig. 3-1. Esquema de descomposición en series Wavelet (fuente: [7]).

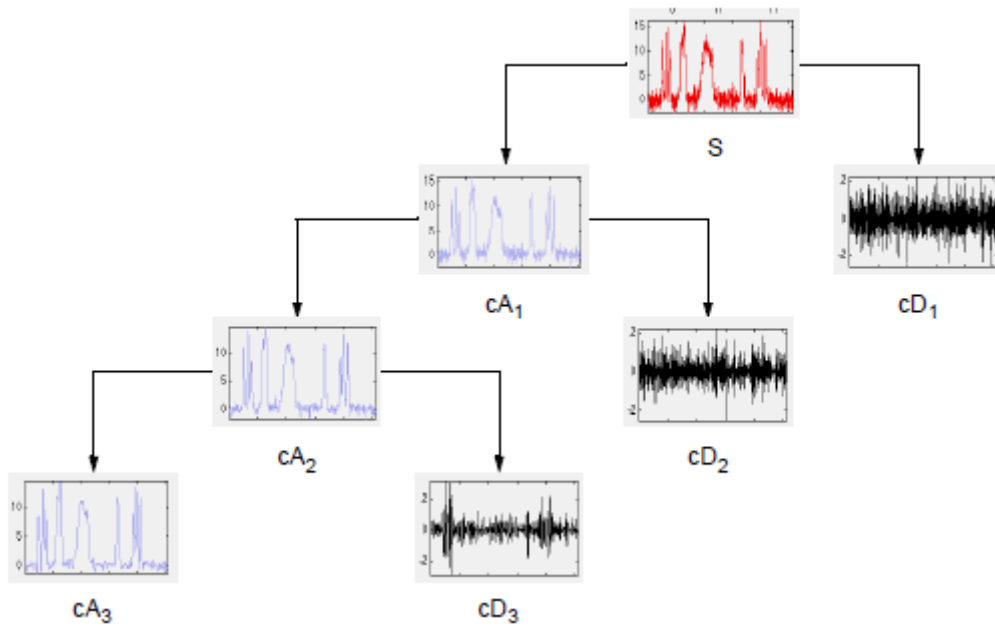


Fig. 3-2. Ejemplo de descomposición de una señal por DWT (fuente: [7]).

### 3.3.4. Reconstrucción Wavelet

La secuencia de la señal original  $c_0(n)$  puede ser reconstruida a partir de las secuencias de coeficientes de aproximación  $c_i(n)$  y de los coeficientes wavelet  $d_i(n)$  con  $0 < i \leq M$ , donde  $i = M$  es la menor resolución en la descomposición [8].

La aproximación discreta  $c_{i-1}(n)$  en el próximo nivel de mayor resolución puede ser obtenida como la suma de dos descomposiciones, una entre la aproximación discreta  $c_i(n)$  y el filtro paso-bajo  $p(n)$  y otra entre los *coeficientes wavelet*  $d_i(n)$  y el filtro paso-alto  $q(n)$ ,

$$\begin{aligned} C_{i-1}(n) &= \langle P_{i-1}, \Phi_{i-1,n} \rangle = \sum_k C_i(k) \langle \Phi_{i,k}, \Phi_{i-1,n} \rangle + \sum_k d_i(k) \langle \Psi_{i,k}, \Phi_{i-1,n} \rangle \\ &= 2^{-1/2} \sum_k C_i(k) p(n-2k) + 2^{-1/2} \sum_k d_i(k) q(n-2k) \end{aligned} \quad \text{Ec. 2-30}$$

### 3.3.5. Tipos de familias de transformada wavelet

Vamos a describir las distintas familias de transformada wavelet propuestas por los distintos investigadores, cada una de ellas es aplicable a un campo de investigación o puede ser que se use en más de un campo, por lo tanto realizaremos un breve resumen de cada una de ellas [7], con especial atención en la familia DAUBECHIES, ya que es la que más resultados da en el campo del análisis de señales.

#### 3.3.5.1. Haar

La familia Haar es la primera en ser desarrollada y la más simple de todas, es una función discontinua y se asemeja a una función escalonada como se muestra en la Fig. 2-3 para una función  $\Psi$ .

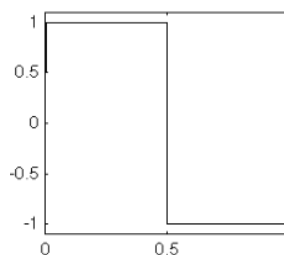


Fig. 3-3 Wavelet Haar para la función psi (fuente: [7]).

#### 3.3.5.2. Daubechies

Esta familia de wavelet fue desarrollada por Ingrid Daubechies, Ingrid es una de las investigadoras más brillantes en el mundo de las wavelet, desarrolló las llamadas ondas ortonormales apoyados compacta, por lo que se hace posible el análisis wavelet discreto.

Para la realización de la descomposición por db1 se recurre a la siguiente ecuación:

$$P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} C_k^{N-1+k} y^k \quad \text{Ec. 2-31}$$

donde  $C_k^{N-1+k}$  denota los coeficientes binomiales.

$$|m_0(\omega)|^2 = \left(\cos^2 \frac{\omega}{2}\right)^N P\left(\sin^2 \frac{\omega}{2}\right) \quad \text{Ec. 2-32}$$

donde:

$$m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-ik\omega} \quad \text{Ec. 2-33}$$

La forma de identificar la mencionada familia es con dbN, donde N es el orden o detalle que queremos. La wavelet db1, es exactamente igual a la Haar anteriormente mencionada. A continuación podemos ver algunos ejemplos de esta familia aplicada a la función  $\Psi$ .

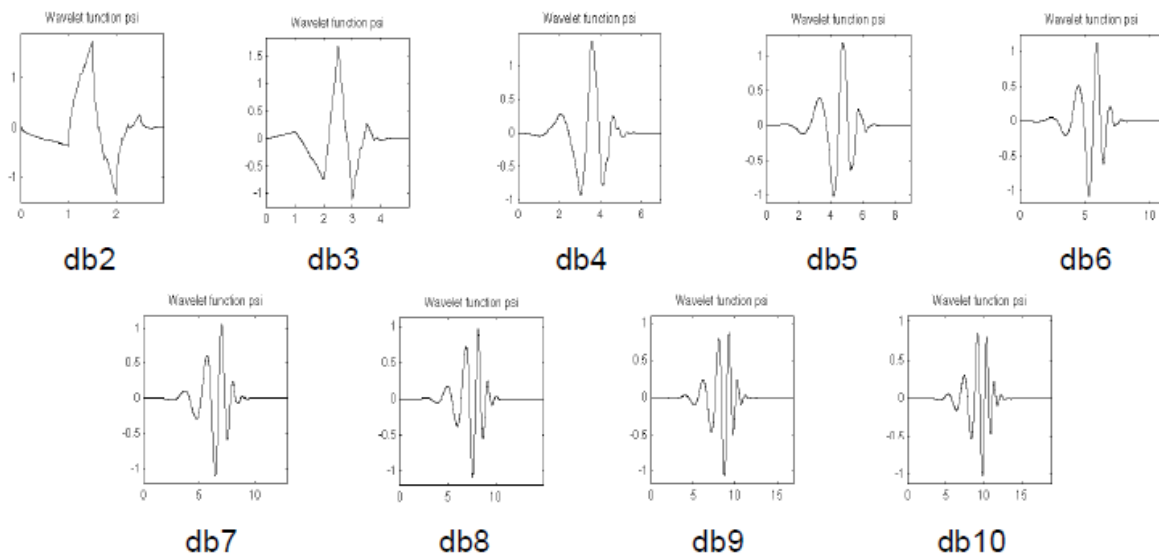


Fig. 3-4 Wavelets Daubechies para la función  $\psi$  (fuente: [7]).

### 3.3.5.2.1. Daubechies para MATLAB

La plataforma de simulación MATLAB nos da dos opciones para el análisis por wavelet Daubechies: la primera es a través un menú interactivo y la segunda es conociendo los

comandos necesarios para hacer un análisis por comando, vamos a explicar ambas formas, aunque para el trabajo actual utilizaremos la segunda forma, ya que se pueden obtener más datos.

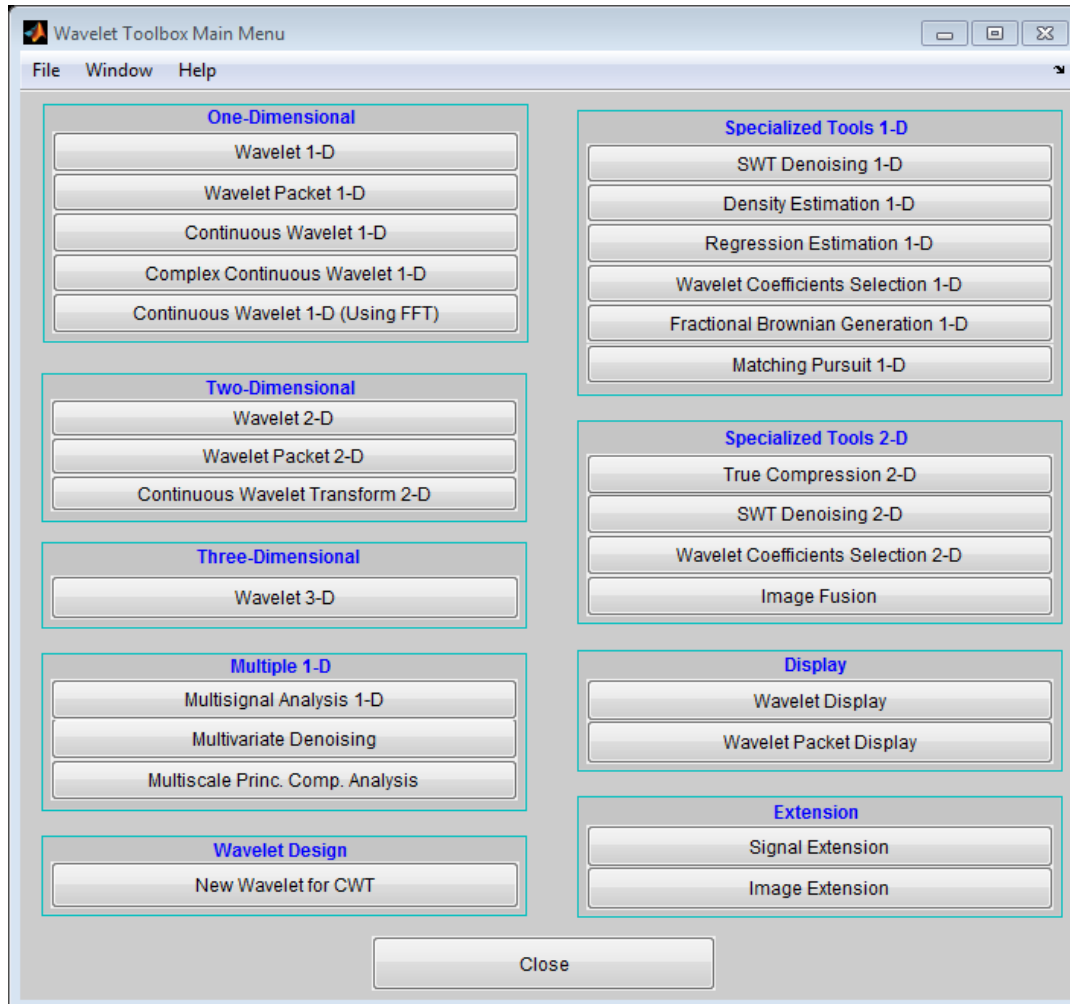


Fig. 3-5 Menú wavelet MATLAB (fuente: captura de pantalla).

Para la primera forma de análisis podemos seguir los siguientes pasos:

1. Una vez iniciado el programa MATLAB, escribimos en la línea de comandos “wavemenu”, y nos aparece el menú mostrado en la Fig. 2-5:
2. En nuestro ejemplo vamos a hacer un análisis de una dimensión, seleccionamos “Wavete 1-D”.
3. Abrimos la señal a analizar.
4. Elegimos el tipo de familia con la que queremos analizar la señal, y el nivel de detalle que queremos, en nuestro ejemplo es por Daubechies (db1).



5. Una vez presionamos el botón “Analyze” obtenemos los siguientes resultados, donde podemos ver la señal descompuesta en 5 detalles y la aproximación de la señal, como se muestra en la Fig. 2-6

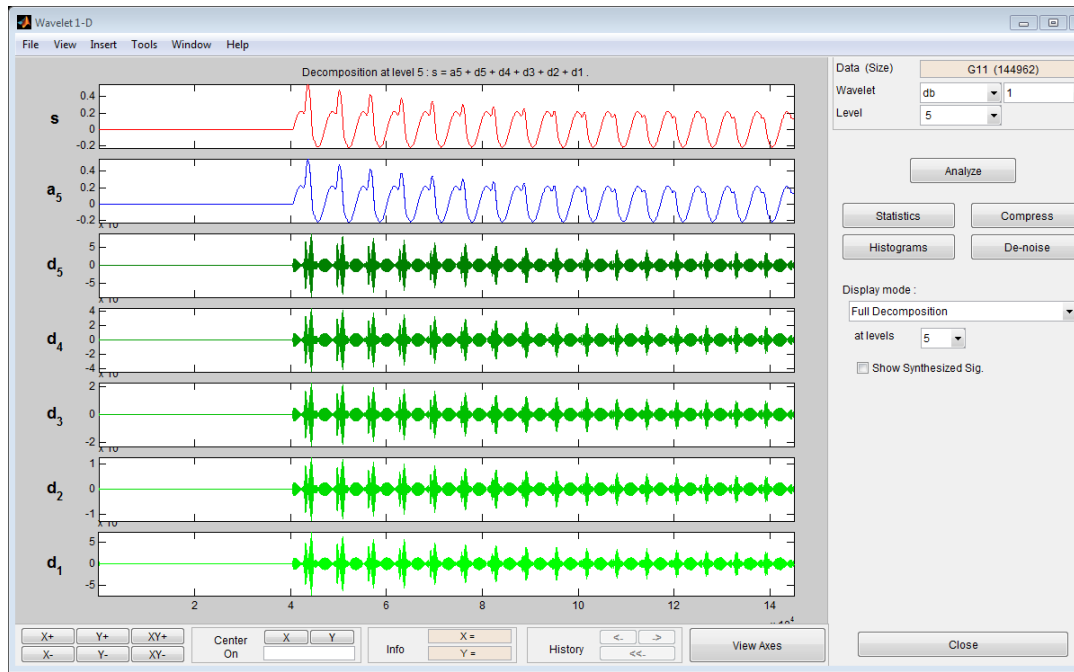


Fig. 3-6 Descomposición de una señal mediante Daubechies por menú (fuente: captura de pantalla).

Para la segunda forma de análisis podemos seguir los siguientes pasos:

- Primero se realiza una llamada a la señal que queremos analizar:

$$s = \text{load}(\text{filename}, '-\text{mat}')$$

- Se calcula cuantos datos tiene la señal:

$$l\_s = \text{length}(s)$$

- Se obtienen los datos de detalle para el análisis de una dimensión (dwt) y se indica qué Daubechies utilizar, en este caso db1 :

$$[cA1, cD1] = \text{dwt}(s, 'db1')$$

- Se descomponen los datos anteriores para obtener la aproximación y el detalle que nos interese (upcoef), donde 'a' indica que queremos la aproximación y 'b' indica que queremos detalle, luego se indica de dónde saca los datos (ya debe estar dado en el paso anterior), qué Daubechies utilizar, nivel de detalle o aproximación necesarios y la longitud del “array” a analizar:

$$A1 = \text{upcoef}('a',cA1,'db1',1,l_s)$$

$$D1 = \text{upcoef}('d',cD1,'db1',1,l_s)$$

- Una vez obtenidos los datos necesarios, ya se pueden visualizarlos o trabajar con ellos para obtener un algoritmo. La Fig. 2-7 muestra los datos obtenidos.

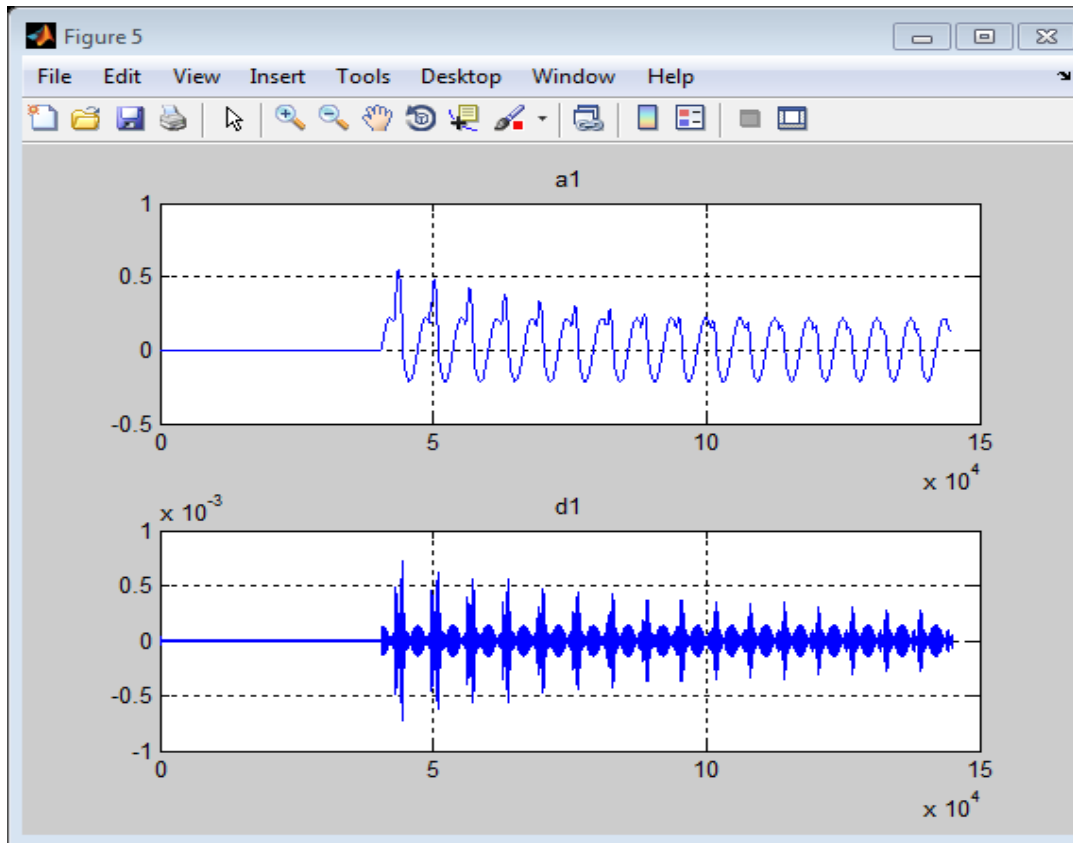


Fig. 3-7 Descomposición de una señal mediante Daubechies por comando (fuente: captura de pantalla).

El procedimiento utilizado anteriormente es para la obtención del detalle y aproximación primera, en caso de querer más del primer detalle se realiza lo anterior y seguidamente se llevan a cabo los siguientes comandos de Matlab.

$$[C,L] = \text{wavedec}(s,5,'db1')$$

$$A5 = \text{wrcoef}('a',C,L,'db1',5)$$

$$D1 = \text{wrcoef}('d',C,L,'db1',1)$$

$$D2 = \text{wrcoef}('d',C,L,'db1',2)$$

$$D3 = \text{wrcoef}('d',C,L,'db1',3)$$

$$D4 = \text{wrcoef}('d',C,L,'db1',4)$$

$D5 = wrcoef('d',C,L,'db1',5)$

En este ejemplo se quiere llegar hasta el detalle 5, por lo tanto si queremos otro detalle no hay más que cambiar en “wavedec” el número 5 por el que interese, y se procede a visualizar los datos de interés, como se muestra en la Fig. 2-8.

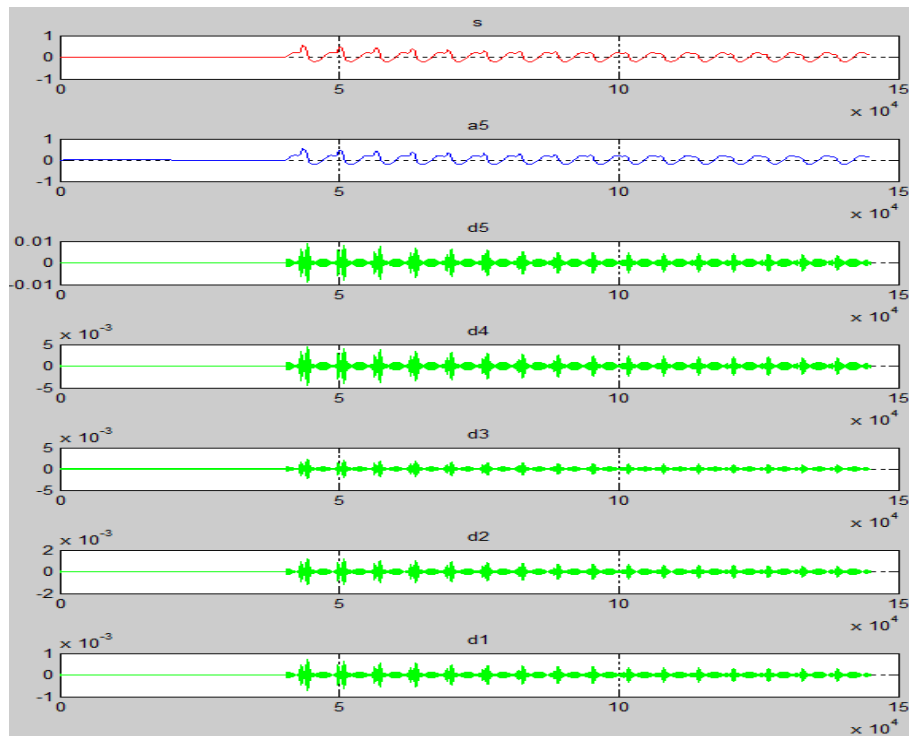


Fig. 3-8 Segunda descomposición de una señal mediante Daubechies por comando (fuente: captura de pantalla).

### 3.3.5.3. Biorthogonal

La actual familia utiliza una característica de fase lineal; la descomposición por wavelets Biorthogonal es muy útil principalmente para el análisis de fotografías, ya que utiliza dos wavelets, una para la descomposición y otra para la reconstrucción de las imágenes, con el fin de obtener una imagen de mayor calidad. Aunque hemos indicado que principalmente esta familia es útil para imágenes también se puede utilizar para señales como se observa en la Fig. 2-9.

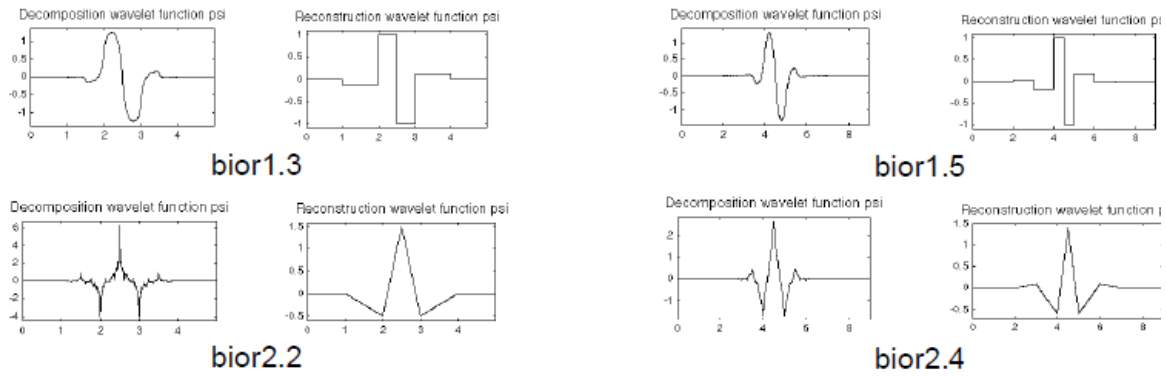


Fig. 3-9 Wavelets Biorthogonal para la función psi (fuente: [7]).

### 3.3.5.4. Coiflets

La familia Coiflets ha sido desarrollada como la familia Daubechies por Ingrid Daubechies a petición de R. Coifman. Esta función wavelet consta de  $2N$  momentos iguales a cero y la función de escala es igual a  $2N-1$ .

La Fig. 2-10 muestra la descomposición de la función  $\Psi$  (psi), con este tipo de familia.

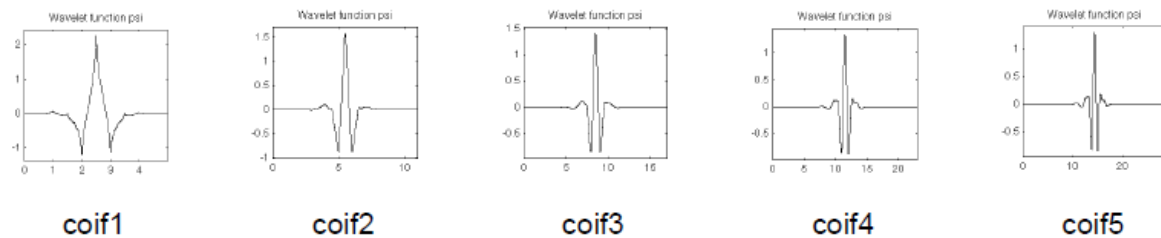


Fig. 3-10 Wavelets Coiflets para la función psi (fuente: [7]).

### 3.3.5.5. Symlets

Las Wavelets Symlets son ondas casi simétricas propuestas por Daubechies como modificaciones a la familia db. Las propiedades de las dos familias de wavelets son similares, como se observa en la Fig. 2-11.

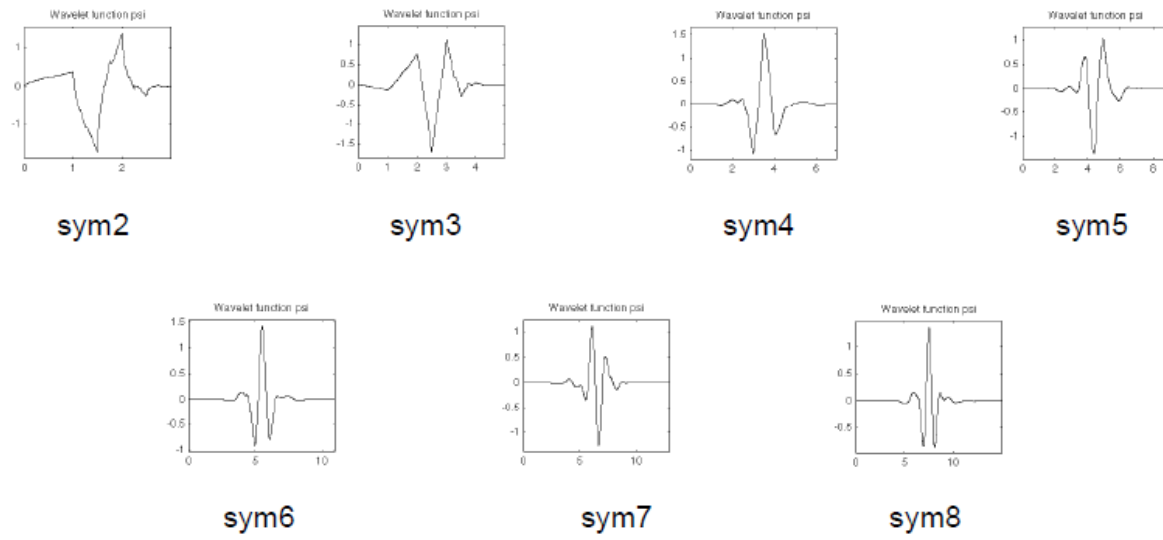


Fig. 3-11 Wavelets Symlets para la función psi (fuente: [7]).



## 4. Algoritmo propuesto de discriminación y modelado del relé

En este capítulo se presenta un novedoso algoritmo que permite diferenciar las intensidades de energización de las intensidades de falta del transformador, y que es la base de este trabajo. Además se realiza el modelado completo del relé diferencial que implementa dicho algoritmo de discriminación.

### 4.1. Algoritmo propuesto de discriminación.

El relé de protección diferencial de transformadores de potencia discrimina las corrientes de conexión de las corrientes de falta interna mediante el análisis de las señales procedentes de aplicar la transformada wavelet discreta (DWT) a las corrientes diferenciales de cada una de las fases.

La Fig. 3-1 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de protección del relé diferencial.

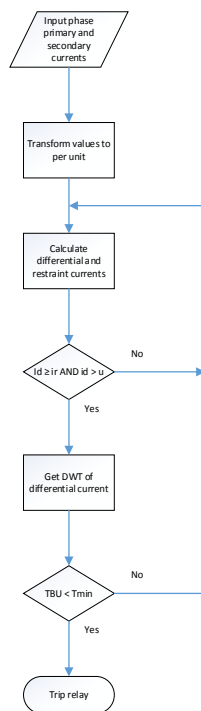


Fig. 4-1. Diagrama de flujo del algoritmo de protección del relé diferencial.

El relé se concibe como un sistema de protección digital, por lo que necesita obtener una señal digitalizada de las señales de las intensidades primarias y secundarias del transformador. Estas señales se obtienen de los secundarios de los transformadores de intensidad que miden las intensidades primarias y secundarias del transformador. Para poder ser tratadas por el relé y puesto que dichas intensidades con magnitudes analógicas continuas, se debe realizar una conversión analógico-digital de las señales, que una vez realizada envía las señales digitales discretas al relé para su tratamiento.

Para un tratamiento más cómodo de las señales de las intensidades primarias y secundarias todas las intensidades son transformadas en valores p.u.

Una vez transformadas las intensidades a valores p.u. se realiza el cálculo de la intensidad diferencial por fase y la intensidad circulante por fase, y que a partir de esas dos intensidades. Si se produce una falta interna o una energización del transformador protegido se activa el análisis por transformada wavelet de la señal de la intensidad diferencial de la fase afectada.

Se realiza TWD de la señal de la intensidad diferencial para el nivel uno de la función de Daubechies.

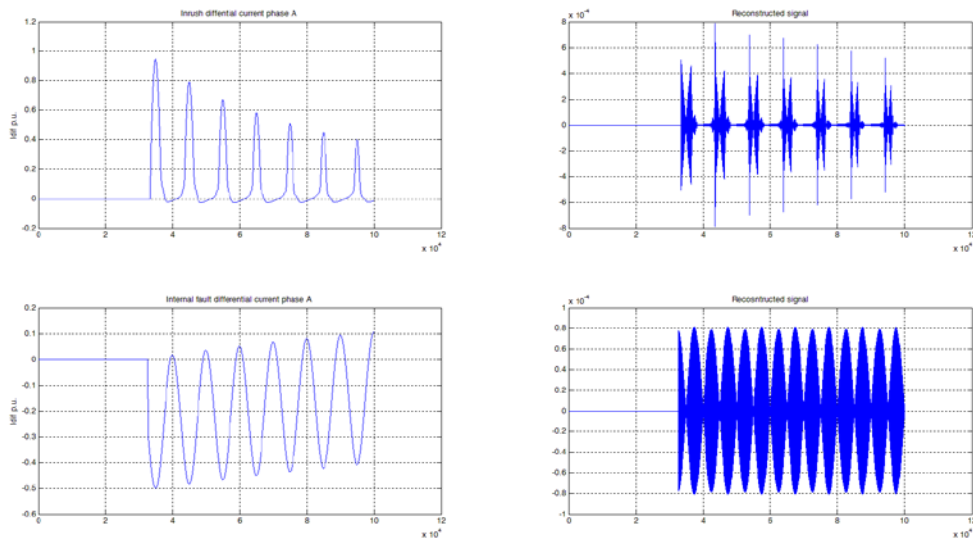


Fig. 4-2. Señales de la intensidad diferencial y detalle de nivel uno para una corriente de conexión y para una falta interna.

La Fig. 3-2 muestra las señales de la intensidad diferencial y de la señal de detalle de nivel uno para una energización del transformador y para una falta interna. La simple inspección visual muestra grandes diferencias entre la señal de detalle para ambos casos.

Para el análisis de cada una de estas señales los algoritmos propuestos suelen utilizar un coeficiente que es función de la energía o área de la señal en un intervalo determinado. Éste



coeficiente suele calcularse mediante una sumatoria de productos que necesita un tiempo de cálculo elevado.

En el algoritmo propuesto se utiliza un método de discriminación con un bajo coste computacional. El método consiste en analizar el tiempo que la señal de detalle está por debajo de un valor umbral. La Fig. 3-2 muestra que estos tiempos son elevados en el caso de tratarse de una corriente de conexión, y bajos en el caso de tratarse de una falta interna.

La señal a analizar es descompuesta en intervalos de 10 ms en los que se calculan los tiempos en los que el valor absoluto de la señal de detalle está por debajo de 0,3 veces el valor máximo de la señal. Este tiempo se denomina tiempo bajo umbral,  $T_{BU}$ . Si en algún momento se cumple que

$$T_{BU} < T_{min} \quad \text{Ec. 3-1}$$

la unidad DWT activa su disparo ya que no se trata de una corriente de conexión sino de una falta interna.  $T_{min}$  es el tiempo mínimo bajo umbral permitido para considerar que se trata de una corriente de conexión.

La elección del ancho del intervalo pretende por un lado que la respuesta de la protección sea lo más rápida posible, por lo que cuanto más pequeño sea este intervalo más rápida será el procesado de las señales y la actuación de la protección. Sin embargo, puesto que la protección va a ser integrada en un sistema eléctrico de potencia de frecuencia 50 Hz en el que el período de un ciclo es de 20 ms, y observando que la señal de detalle tiene un aspecto similar para cada semiperíodo, se toma un ancho de intervalo de medio ciclo, esto es, 10 ms.

Tomar un tiempo inferior puede llevar a errores de actuación puesto que los intervalos no serían iguales y se produciría un error en el cálculo del tiempo bajo umbral.

La Fig. 3-3 muestra la determinación del tiempo bajo umbral  $T_{BU}$  para un intervalo de ancho 10 ms de la señal de detalle de la intensidad diferencial para falta interna. En el ejemplo mostrado se pueden observar dos tiempos bajo umbral.

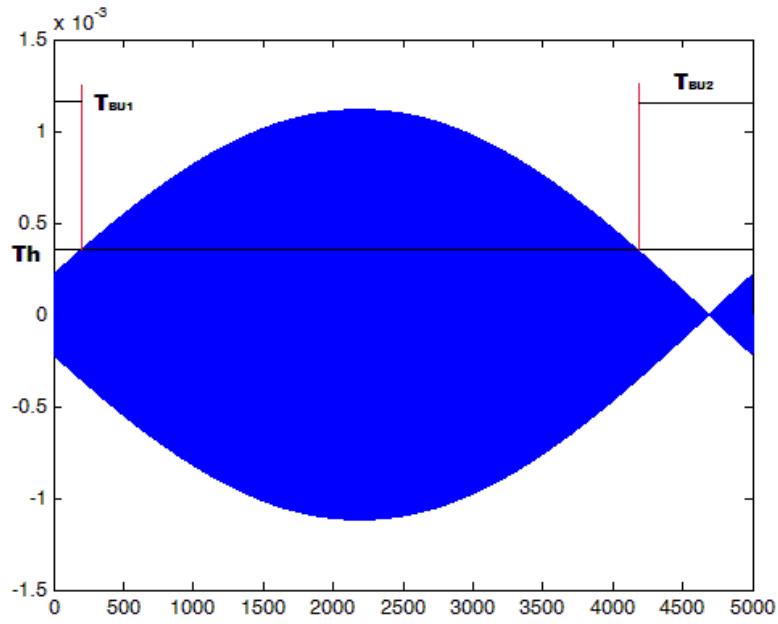


Fig. 4-3. Tiempos bajo umbral para un intervalo del detalle de la intensidad diferencial para falta interna.

La Fig. 3-4 muestra los tiempos bajo umbral para un intervalo de 10 ms de la señal de detalle de la intensidad diferencial para el caso de energización del transformador.

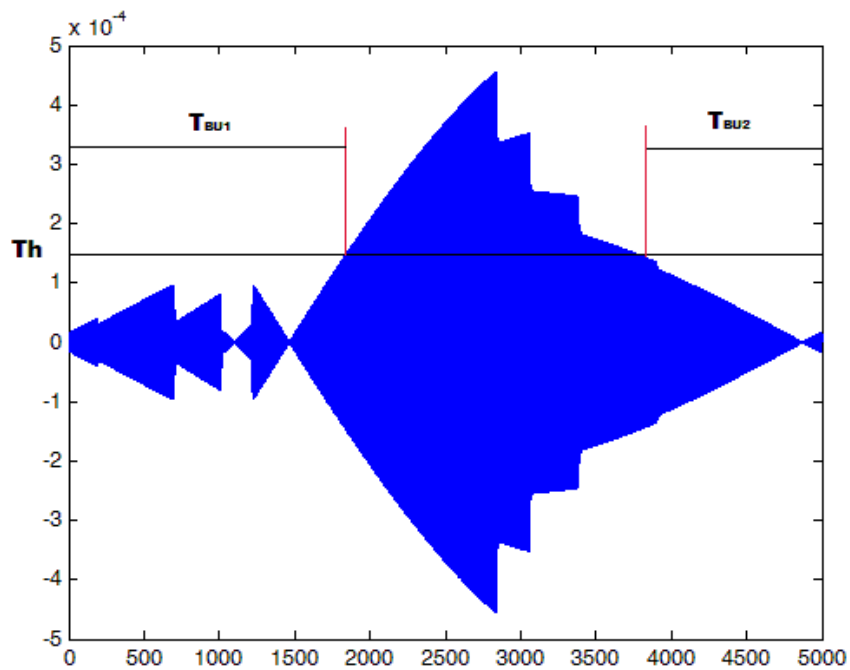


Fig. 4-4. Tiempos bajo umbral para un intervalo del detalle de la intensidad diferencial para energización del transformador.

En los ejemplos mostrados se puede observar que para un intervalo determinado puede haber varios tiempos bajo umbral. Para aplicar la Ec. 3-1 el tiempo  $T_{BU}$  utilizado es la suma de todos los tiempos bajo umbral que aparezcan en el intervalo analizado, según muestra la Ec. 3-2

$$T_{BU} = \sum_i T_{BUi} \quad \text{Ec. 3-2}$$

## 4.2. Modelado del Relé.

Para la comprobación del algoritmo de protección propuesto se implementó un modelo de relé diferencial con discriminación por transformada wavelet modelado en el programa de cálculo matemático MATLAB/SIMULINK.

Dicho relé diferencial está compuesto internamente por cuatro bloques funcionales independientes:

- Unidad de adaptación p.u.
- Unidad porcentual.
- Unidad de análisis wavelet.
- Unidad de disparo.

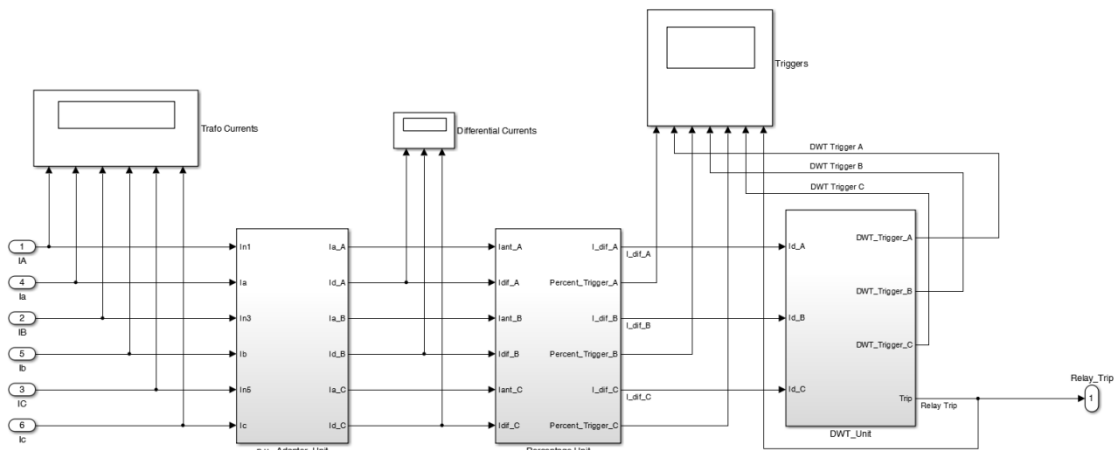


Fig. 4-5. Bloques constitutivos del relé diferencial.

La Fig. 3-5 muestra la implementación y disposición de estos bloques.

### 4.2.1. Unidad de adaptación p.u.

Para la correcta operación del relé es preciso medir las tres intensidades primarias del transformador y las tres intensidades secundarias. Dichas intensidades se toman de los correspondientes transformadores de intensidad del sistema de protección y se llevan al relé.

Antes de ser tratados los valores de las seis intensidades del transformador, que son valores absolutos en amperios, son pasados a valores por unidad en función de los parámetros asignados del transformador.

Trabajar con valores p.u. de las intensidades tiene como principal ventaja que dichas magnitudes son independientes del tipo de transformador que se trate, pues aislamos la resolución del problema el tratar con diferentes potencias, tensiones e intensidades para diferentes transformadores.

El valor en p.u. de una intensidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$i_n(p.u.) = \frac{U_B}{S_B} \tag{Ec. 3-3}$$

donde  $U_B$  es la tensión del transformador, primaria para las intensidades del primario y secundaria para las intensidades del secundario, y  $S_B$  la potencia asignada del transformador.

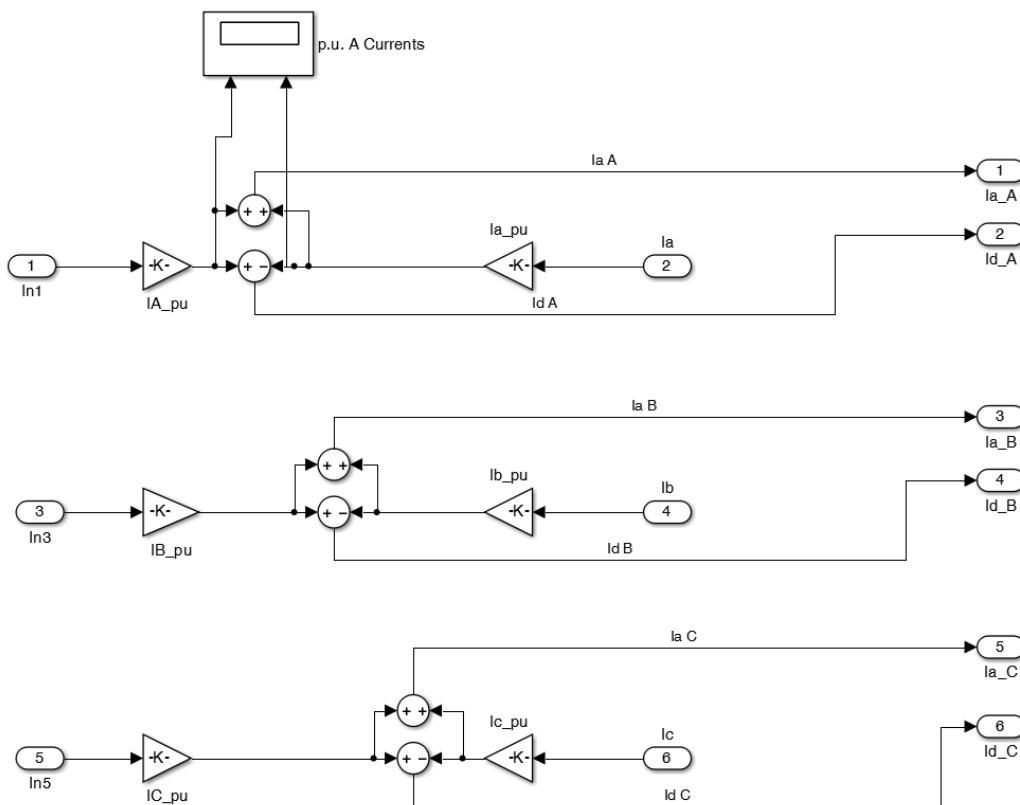


Fig. 4-6. Constitución interna del bloque de la unidad de adaptación p.u.

La Fig. 3-6 muestra la constitución interna de la unidad de adaptación p.u. Cada una de las intensidades es multiplicada por una ganancia que para las intensidades primarias viene dada por

$$K = \frac{1}{\frac{S_1}{U_1}} \quad \text{Ec. 3-4}$$

y para las intensidades secundarias por

$$K = \frac{1}{\frac{S_1}{U_2}} \quad \text{Ec. 3-5}$$

Una vez se tienen disponibles las tres intensidades primarias y las tres intensidades secundarias en valor p.u. la misma unidad de adaptación p.u. genera las señales para la intensidad diferencial y la intensidad circulante para cada una de las fases. Como se observa en la Fig. 3-6 para cada una de las fases se toman las intensidades primaria y secundaria y se llevan a un elemento sumador y a un elemento restador. La salida del elemento sumador proporciona la intensidad circulante de la fase en valor p.u., y la salida del elemento restador proporciona la intensidad diferencial de la fase en valor p.u., ya que para la fase A

$$i_{dA} = i_{pA} - i_{sA} \quad \text{Ec. 3-6}$$

$$i_{rA} = \frac{i_{pA} + i_{sA}}{2} \quad \text{Ec. 3-7}$$

donde  $i_{pA}$  es la intensidad primaria de la fase A e  $i_{sA}$  la intensidad secundaria de la fase A.

Estas intensidades por fase, diferencial y circulante, están disponibles a la salida del elemento p.u. para su uso por la unidad porcentual.

#### 4.2.2. Unidad porcentual.

En un transformador de potencia real las señales de las intensidades primaria y secundaria se toman usualmente de los secundarios de transformadores de intensidad apropiados para su uso en sistemas de protección. Debido a que estos transformadores tienen diferentes errores tanto modulares como angulares, la señal de la intensidad diferencial puede ser no nula en el caso de estar el transformador de potencia trabajando en carga, y con valores superiores en el caso de una falta externa. Para evitar que se produzcan disparos intempestivos de la protección diferencial por esta causa se incorpora una unidad porcentual.

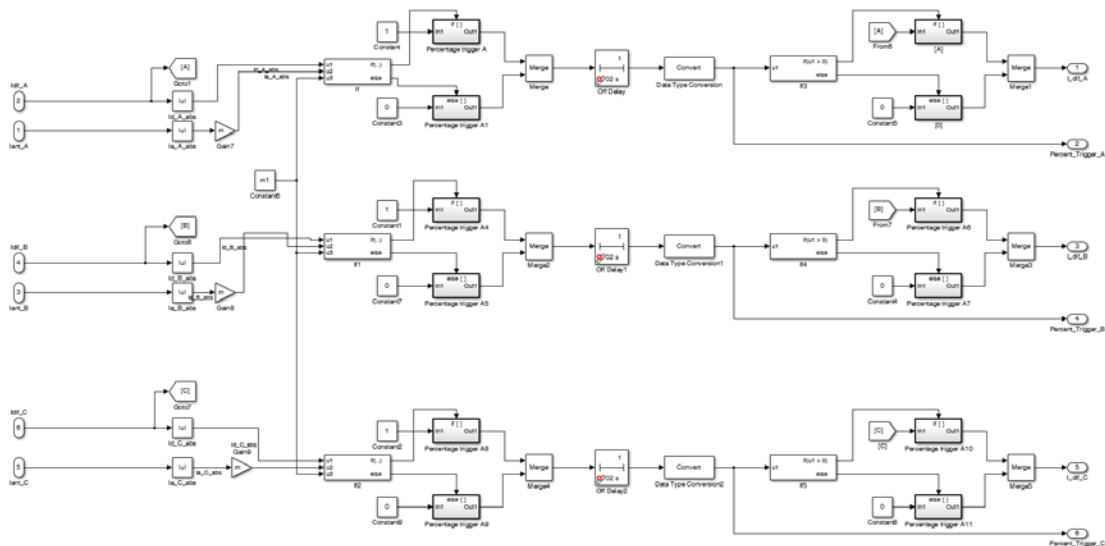


Fig. 4-7. Bloques constituyentes de la unidad porcentual.

La Fig. 3-7 muestra los bloques constituyentes de la unidad porcentual. Dicha unidad realiza un análisis de las señales de la intensidad diferencial y circulante para cada una de las fases y proporciona a su salida una señal de disparo cuyo valor viene dado por la siguiente expresión:

$$S_p = \begin{cases} 1 & \text{si } (i_{dA} \geq m \cdot i_{rA}) \text{ AND } (i_{dA} \geq u) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \text{Ec. 3-8}$$

Donde  $S_p$  es la salida de la unidad porcentual para cada una de las fases,  $m$  es un parámetro ajustable de la protección diferencial que es la pendiente en tanto por uno del ajuste porcentual de la protección (Fig. 1-7). Los valores usuales de esta pendiente para la protección de transformadores de potencia suele variar entre el 15 y el 40 %, por lo que este parámetro variará entre 0,15 y 0,4.

El parámetro  $u$  es el valor umbral de la intensidad diferencial que permite la activación de la unidad porcentual, y es el equivalente a la corriente de arranque o de pick-up del relé diferencial: un valor de 0,2 indica que para activar la unidad porcentual se precisa que la intensidad diferencial sea igual o superior a 0,2 veces la intensidad base del transformador de potencia, esto es, un 20 % del valor asignado.

Para implementar la Ec. 3-8 en la unidad porcentual se toman las señales de la intensidad diferencial y circulante procedentes de cada una de las fases de la unidad de adaptación p.u. y se toma el valor absoluto de las mismas. La intensidad circulante se multiplica por el parámetro  $m$ .

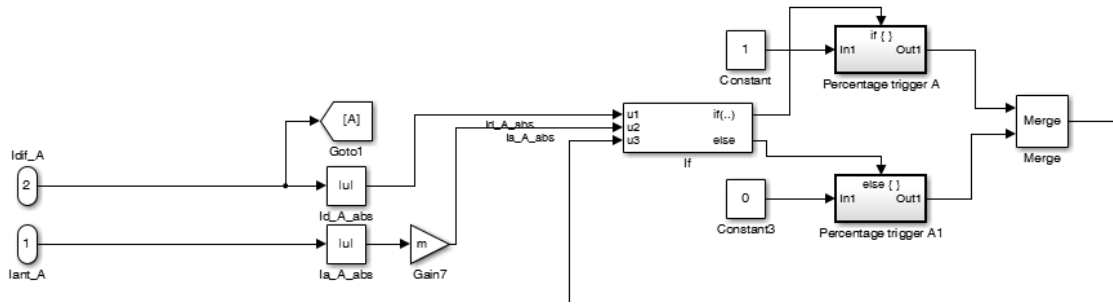


Fig. 4-8. Comparación de las intensidades diferencial y circulante.

Una vez adecuadas las señales se llevan a un bloque if-else que compara las dos condiciones expresadas en la Ec. 3-8, tal y como se muestra en la Fig. 3-8. La tercera entrada del bloque if-else es el parámetro u. Una vez realizada la comparación en el bloque if-else la salida del mismo será “1” en el caso de que se cumplan las condiciones de la Ec. 3-8 o “0” si no se cumplen.

Esta señal de salida es retardada 10 ms puesto que en el caso de ser “1”, lo cual indica que se está produciendo una falta interna o una corriente de conexión indebidamente discriminada. El retardo permite que el sistema de protección recoja los datos de las intensidades del transformador durante un semiciclo con el objeto de proporcionar a la unidad de análisis wavelet datos suficientes para poder discriminar entre falta interna o corriente de conexión. La Fig. 3-9 muestra los componentes de la unidad porcentual que realizan la anterior función.

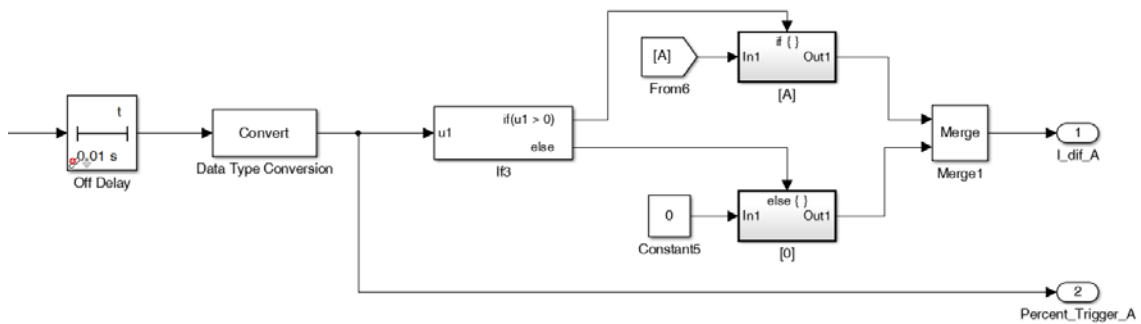


Fig. 4-9. Retardo en la salida de la señal de la unidad porcentual para permitir la acumulación de datos durante un semiciclo.

### 4.2.3. Unidad de análisis wavelet.

La salida de la unidad porcentual no es responsable del disparo de la protección diferencial ya que no es capaz por sí misma de discriminar si se está ante la presencia de una falta interna o una corriente de conexión del transformador de potencia. Los sistemas tradicionales de protección diferencial realizan un análisis de Fourier para determinar el contenido de armónicos en las señales de intensidad: Un contenido elevado en el 2º armónico es considerado como una señal de conexión y por tanto se inhibe el disparo de la protección.

Estudios posteriores han demostrado que puede haber una importante presencia de 2º armónico sin que necesariamente se trate de una corriente de conexión, lo que inhibiría el disparo de la protección diferencial aún en el caso de presentarse una falta interna, con desastrosas consecuencias para el transformador de potencia.

Varios estudios han propuesto la utilización de la transformada wavelet (WT) de las señales de la intensidad debido a que la WT es un método muy potente para el análisis de señales transitorias no periódicas y de elevada frecuencia, como es el caso de las corrientes de conexión.

En el epígrafe 2 sobre la transformada wavelet se trató de cómo dicha herramienta proporciona un método poderoso para el análisis de muy diversos tipos de señales, entre ellas las señales transitorias de las corrientes de un transformador al ser energizado.

Puesto que en este trabajo se presenta un relé de protección de base digital, se utiliza una variante del análisis por transformada wavelet denominado transformada wavelet discreta.

La Fig. 3-10 muestra los componentes que forman parte de la unidad wavelet.

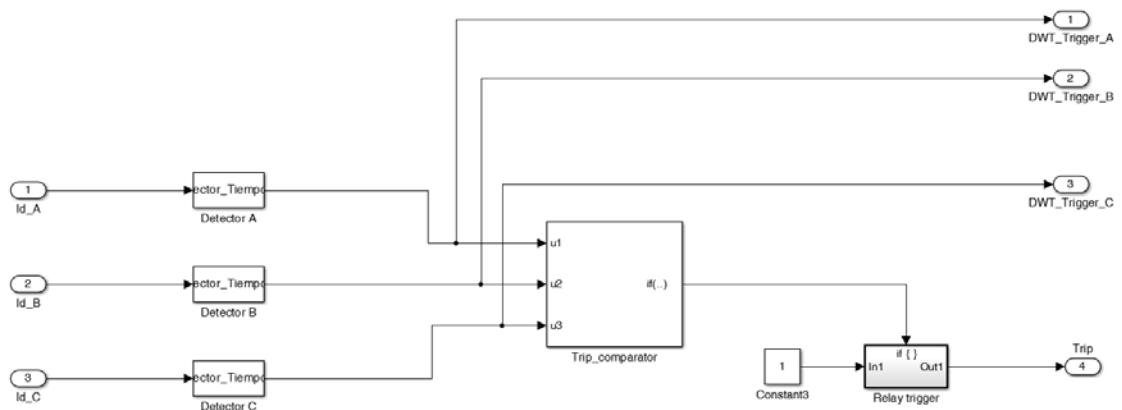


Fig. 4-10. Componentes de la unidad wavelet.

La entrada de la unidad wavelet recoge los valores de la señal de la intensidad diferencial para cada fase que proviene de la unidad porcentual, y por tanto la señal será nula si no está activada la unidad porcentual. En el caso de producirse una falta interna o una energización del transformador se activa la unidad porcentual y una vez que se han recogido los datos de la intensidad diferencial de la fase o fases afectadas, se entregan a la unidad wavelet, que realizará la descomposición mediante transformada wavelet discreta que activará el disparo del relé o no de acuerdo con el algoritmo propuesto de discriminación.

El algoritmo de discriminación propuesto en el apartado 3 se implementa en el modelo mediante el uso de un bloque S-Function.



#### 4.2.3.1. Bloque S-function.

El entorno Matlab/Simulink dispone de varios elementos para expandir las capacidades del entorno. Uno de ellos es el bloque S-function (system-functions, funciones del Sistema). Una S-function es una descripción en lenguaje de ordenador de un bloque de Simulink y que puede estar escrito en código de Matlab, C, C++ o Fortran.

Las S-function utilizan una sintaxis especial de llamada denominada la API de la S-function que permite al usuario interactuar con el motor de Simulink.

Para implementar el algoritmo de discriminación propuesto se utiliza una S-function para cada fase para tomar los datos de la señal de detalle de la intensidad diferencial de la fase y calcular los tiempos bajo umbral de los diferentes intervalos, enviando a su salida la señal de disparo si en el intervalo analizado se cumple la Ec. 3-1.

El código de dicho bloque se ha escrito en código de Matlab.

A continuación se muestra el código utilizado en el bloque S-function:

```
% Sistema S-function
% sys es la salida
% u es la entrada
function [sys,x0,str,ts] = Detector_Tiempo_A(t,x,u,flag)
    switch flag,
        case 0
            [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes;
        case 3
            sys = mdlOutputs(t,x,u);
        case {1, 2,4, 9}
            sys = [];

        otherwise
            error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
    end;

end

%=====
% Function mdlInitializeSizes initializes the states, sample
% times, state ordering strings (str), and sizes structure.
%=====
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
% Call function simsizes to create the sizes structure.
sizes = simsizes;
% Load the sizes structure with the initialization information.
sizes.NumContStates= 0;
sizes.NumDiscStates= 1;
sizes.NumOutputs= 1;
sizes.NumInputs= 1;
sizes.DirFeedthrough=1;
sizes.NumSampleTimes=1;
% Load the salida vector with the sizes information.
sys = simsizes(sizes);
%
x0 = [1]; % Un estado discreto
%
str = []; % No state ordering
%
ts = [0.000002 0]; % Discreto, igual al fixed step ///Inherited sample time

%Inicializar matriz global
```

```

global variable_senal_A
variable_senal_A = [];
global variable_tiempo_A
variable_tiempo_A = [];

end
% End of mdlInitializeSizes.

%=====
% Function mdlOutputs performs the calculations.
%=====
function sys = mdlOutputs(t,~,u)
global variable_senal_A %Debe definirse en todas las funciones en la que se use
variable_senal_A = [variable_senal_A ; u];
global variable_tiempo_A %Debe definirse en todas las funciones en la que se use
variable_tiempo_A = [variable_tiempo_A ; t];
%Adjustar nzmero de salidas de sys segzn crezca nuestro vector
longitud = length(variable_senal_A);
sizes =simsizes;
sizes.NumContStates= 0;
sizes.NumDiscStates= longitud;
sizes.NumInputs= longitud;
sizes.DirFeedthrough=1;
sizes.NumSampleTimes=1;
sizes.NumOutputs = longitud;
%sys = simsizes(sizes);

if longitud >= 5000 % Número de valores esperados
sys = fcn(variable_senal_A,variable_tiempo_A);
else sys = 0;
end

end

% End of mdlOutputs.

%*****
% Función para el cálculo del tiempo bajo el umbral dado
%*****

%Obtención del tiempo de duración de la señal por debajo de un umbral dado
% DZ es la matriz de índices de la ocurrencia y DT es la matriz de tiempos
function DT = Obtener_Tiempo_Bajo_Umbral (datos, tiempo, umbral)

%Recorrer todos los datos
n = 1;
por_debajo = false;
longitud_datos = length(datos);
DT = [0];
for i=1:longitud_datos
    if abs(datos(i)) < umbral
        if por_debajo == false
            por_debajo = true;
            tiempo_inicial = tiempo(i);
        end
    else
        if por_debajo == true
            DT(n) = tiempo(i) - tiempo_inicial;
            n = n +1;
            por_debajo = false;
        end
    end
end

end
if por_debajo == true
    DT(n) = tiempo(end) - tiempo_inicial;
end
end
    
```

```

end

%END

%*****
% Nuestra función
%*****

function SALIDA = fcn(Ids,t)

t_minimo = 0.003;
if Ids==0
    SALIDA=0;
else

    %SALIDA = 1; %Bloquear disparo
    l_s = length(Ids);
    [~,cD1] = dwt(Ids,'dbl');
    D1=upcoef('d',cD1,'dbl',1,l_s);
    %figure(1); plot(D1)
    umbral = 0.3*max(D1); %Umbral en el 30% del valor de pico
    %Obtener matriz de tiempos bajo umbral
    TBU = Obtener_Tiempo_Bajo_Umbral(D1, t, umbral);
    %comprobar si se tienen tiempos grandes (corriente de conexión)
    TBU = sum(TBU);
    if TBU < t_minimo SALIDA = 1;
    else SALIDA = 0;
    end

end

global variable_senal_A %Debe definirse en todas las funciones en la que se use
variable_senal_A = [];
global variable_tiempo_A %Debe definirse en todas las funciones en la que se use
variable_tiempo_A = [];

end

```

En el anterior código se tienen varias funciones internas necesarias para el correcto funcionamiento del bloque S-function, y dos funciones creadas para la implementación del algoritmo de discriminación.

La principal es la denominada SALIDA que recibe como parámetros un intervalo de 10 ms con los datos de la intensidad diferencial de la fase a analizar. Se realiza la transformada wavelet discreta de Daubechies de nivel uno y se toman la señal de detalle.

Se fija el valor del umbral que como se indicó en el epígrafe 4 es el 30% del valor máximo del intervalo. Como tiempo mínimo bajo umbral para activar la protección se elige un valor de 3 ms, el 30% del ancho del intervalo.

Con los anteriores parámetros fijados se llama a una función auxiliar denominada "Obtener\_Tiempo\_Bajo\_Umbral" que mide los tiempos en el que los datos tienen un valor

continuado por debajo del umbral especificado, devolviendo un vector con los diferentes valores obtenidos.

Finalmente todos los tiempos por debajo del umbral en el intervalo son sumados y se comprueba si ese tiempo resultante es inferior al tiempo mínimo, activando la salida de disparo del bloque S-function por tratarse de una falta interna.

En la Fig. 5-6 puede verse que las salidas de los tres bloques S-function para cada una de las fases se llevan a un bloque comparador que analiza si alguna de las señales está activada, lo que indica que se está ante una falta interna. Si alguna de las salidas de los bloques S-function está activada Se producirá la activación de la salida de disparo del relé diferencial.

## 5. Simulación del modelo

En este capítulo se presentan los resultados de los diferentes casos de estudio llevados a cabo para la comprobación del comportamiento del relé ante diversas situaciones de funcionamiento del transformador, energización, falta interna y falta externa. Los casos de estudio fueron realizados para tres tipos de transformadores diferentes.

Para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de protección diferencial propuesto se implementa el relé descrito en el apartado anterior como un bloque de Simulink y se incluye en un circuito de simulación. La Fig. 4-1 muestra el circuito de simulación implementado.

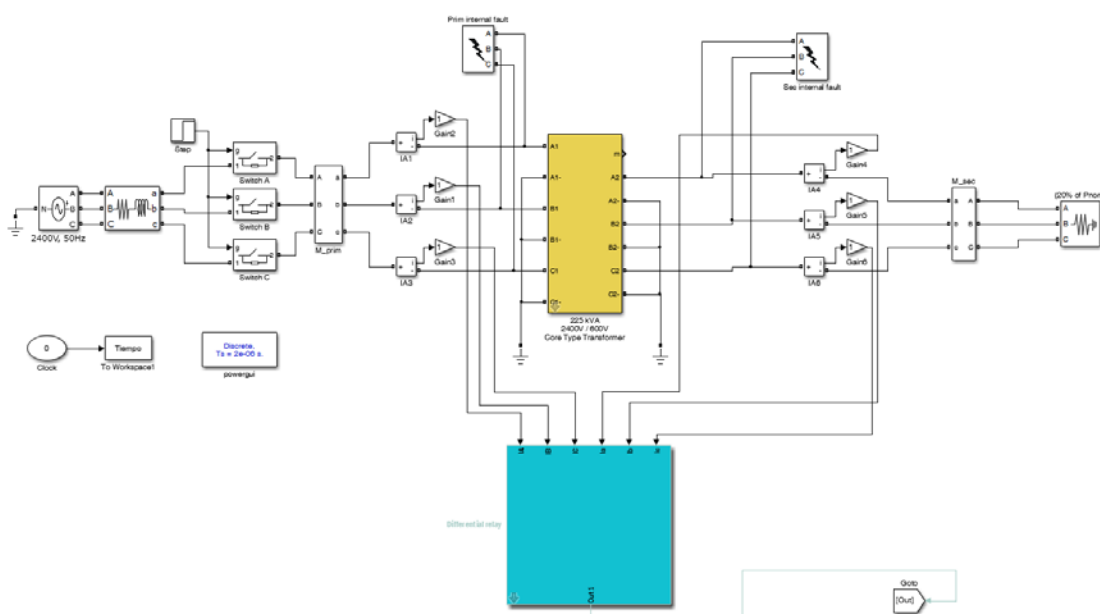


Fig. 5-1. Modelo de Simulink empleado para el ensayo del relé.

Dicho circuito está compuesto por los siguientes elementos:

- Fuente trifásica programable de corriente alterna. Será la encargada de proporcionar las tensiones de alimentación al transformador objeto de los ensayos.
- Una rama serie trifásica encargada de simular la impedancia existente entre la fuente de tensión y el transformador.
- Interruptor trifásico para conectar el primario del transformador al sistema de alimentación.
- Un transformador de potencia trifásico que es el que protege el relé diferencial.
- El relé diferencial.
- Transformadores de intensidad conectados en el primario y en el secundario del transformador y que son los encargados de entregar al relé dichos valores de intensidades primarias y secundarias del transformador.
- Dos bloques para la simulación de faltas trifásicas, bifásicas y monofásicas, uno para simular faltas en el lado del primario del transformador y otro en el lado del secundario del transformador.
- Una carga trifásica programable conectada en el secundario del transformador.

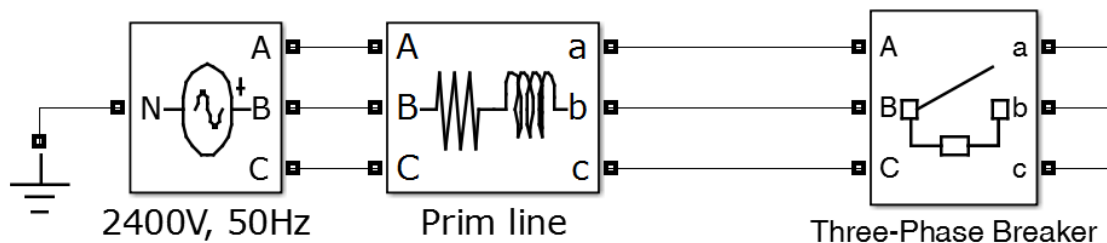


Fig. 5-2. Bloques Simulink para la fuente trifásica programable, la impedancia de la línea y el interruptor trifásico de conexión del transformador.

La Fig. 4-2 muestra los tres primeros elementos, la fuente trifásica programable, el bloque de impedancia de la línea, y un interruptor trifásico de conexión.

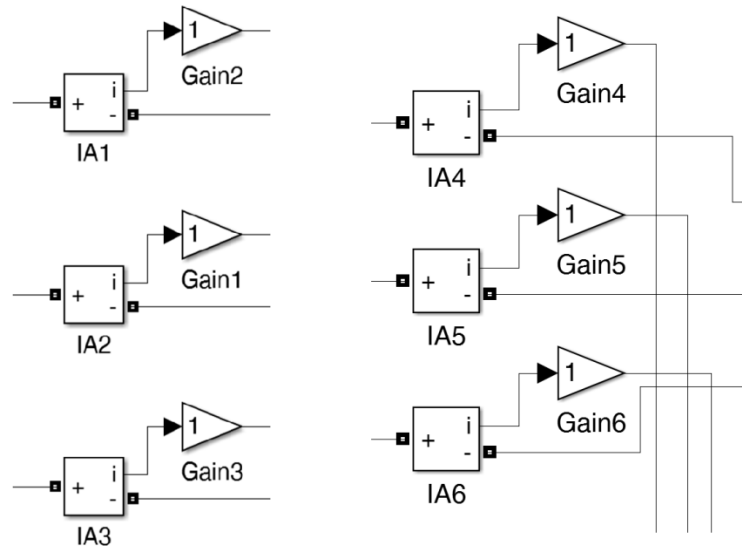


Fig. 5-3. Bloques de implementación de los transformadores de intensidad del lado primario y del secundario.

En la Fig. 4-3 se muestran los bloques utilizados para la implementación de los transformadores de intensidad tanto del lado primario como del secundario. Para cada línea se utiliza un bloque para la medida de intensidades y cada salida, el equivalente al secundario del transformador de intensidad, antes de ser llevada al relé diferencial es multiplicada por una ganancia, lo que permite variar de una manera sencilla la relación de transformación de dicho transformador de intensidad.

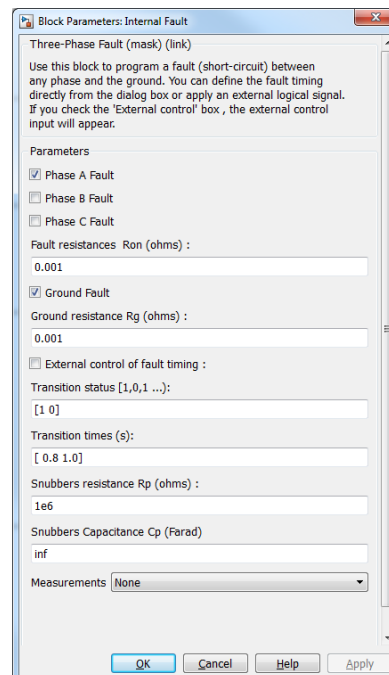
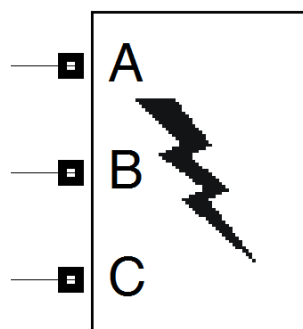


Fig. 5-4. Bloque de simulación de faltas internas y dialogo de configuración.

La Fig. 4-4 muestra el bloque utilizado para la simulación de diferentes tipos de faltas internas y el cuadro de diálogo para la configuración de la falta. En el ejemplo de la figura se ha programado una falta a tierra de la fase A con una resistencia de tierra de una milésima de ohmio y que se producirá a los 0,8 segundos de iniciada la simulación, terminando dicha falta a tierra para un tiempo de un segundo tras el inicio de la simulación.

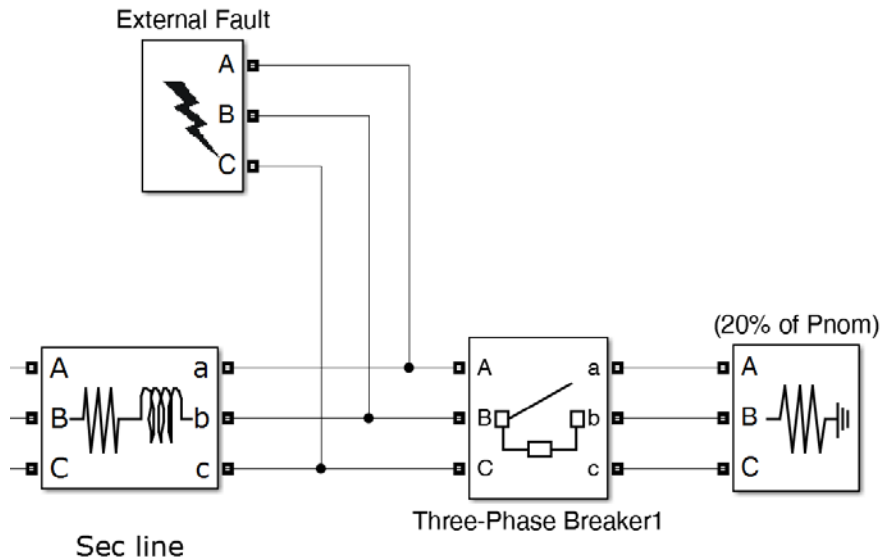


Fig. 5-5. Bloques de impedancia de línea en el secundario, bloque de simulación de faltas externas, interruptor trifásico de conexión de la carga secundaria y carga secundaria.

La Fig. 4-5 muestra los bloques restantes conectados al secundario del transformador, un bloque para ajustar la impedancia de la línea conectada al secundario, un interruptor trifásico para conectar una carga programable al secundario, y un bloque de simulación de faltas igual al utilizado para simular faltas internas pero en este caso dispuesto para simular faltas externas producidas en la línea del secundario del transformador.

La Fig. 4-6 muestra el detalle del bloque de Simulink que modeliza el transformador objeto de la protección. En el ejemplo de la figura se muestra un transformador de 225 kVA y tensiones 2400/600 V con ambos lados conectados en estrella. Éste será el transformador 1.

El modelo de transformador utilizado es un modelo físico de un transformador trifásico de columnas que permite introducir la geometría del núcleo y las características magnéticas del mismo así como los parámetros básicos para modelar las propiedades magnéticas del transformador. Esto permite realizar simulaciones con transformadores de muy diferentes características para comprobar el correcto funcionamiento del relé con independencia de las características del transformador protegido.

Para reducir la cantidad de hierro utilizado en el núcleo este tipo de transformador es del tipo de columnas, con tres columnas. A diferencia de los transformadores trifásicos constituidos por tres transformadores monofásicos, Las tres fases de un transformador de columnas están acopladas magnéticamente. Debido a ello las reactancias de secuencia directa



y homopolar son muy diferentes, hecho que no sucede al utilizar tres transformadores desacoplados magnéticamente.

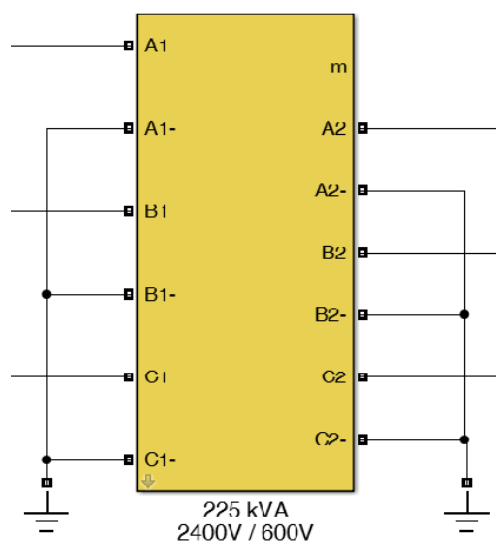


Fig. 5-6. Bloque del transformador trifásico de potencia con ambos lados conectados en estrella.

## 5.1. Casos de estudio.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial modelado en los anteriores apartados, se realizan varios casos de estudio para las siguientes condiciones de funcionamiento:

- Energización del transformador con secundario en vacío.
- Energización del transformador con el secundario en carga.
- Falta interna con el transformador en vacío.
- Falta interna con el transformador en carga.
- Falta externa con el transformador en vacío.
- Falta externa con el transformador en carga.

### 5.1.1. Energización del transformador con secundario en vacío.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una energización del transformador en vacío, se desconecta la carga del secundario manteniendo abierto el interruptor trifásico del secundario del transformador.

Así mismo se desactivan las faltas en los bloques de simulación de falta interna y falta externa, y se programa el interruptor de conexión del transformador para que se cierre transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-7 muestra la forma de onda de las intensidades primarias y secundarias del transformador. Las corrientes primarias muestran la clásica forma de onda de las corrientes de conexión de un transformador, y las corrientes secundarias muestran unos valores muy pequeños, del orden de las milésimas, que si bien en teoría deberían ser nulas por estar el transformador en vacío, corresponden a la circulación de corriente debida a las capacidades que tienen los diferentes elementos conectados en su secundario.

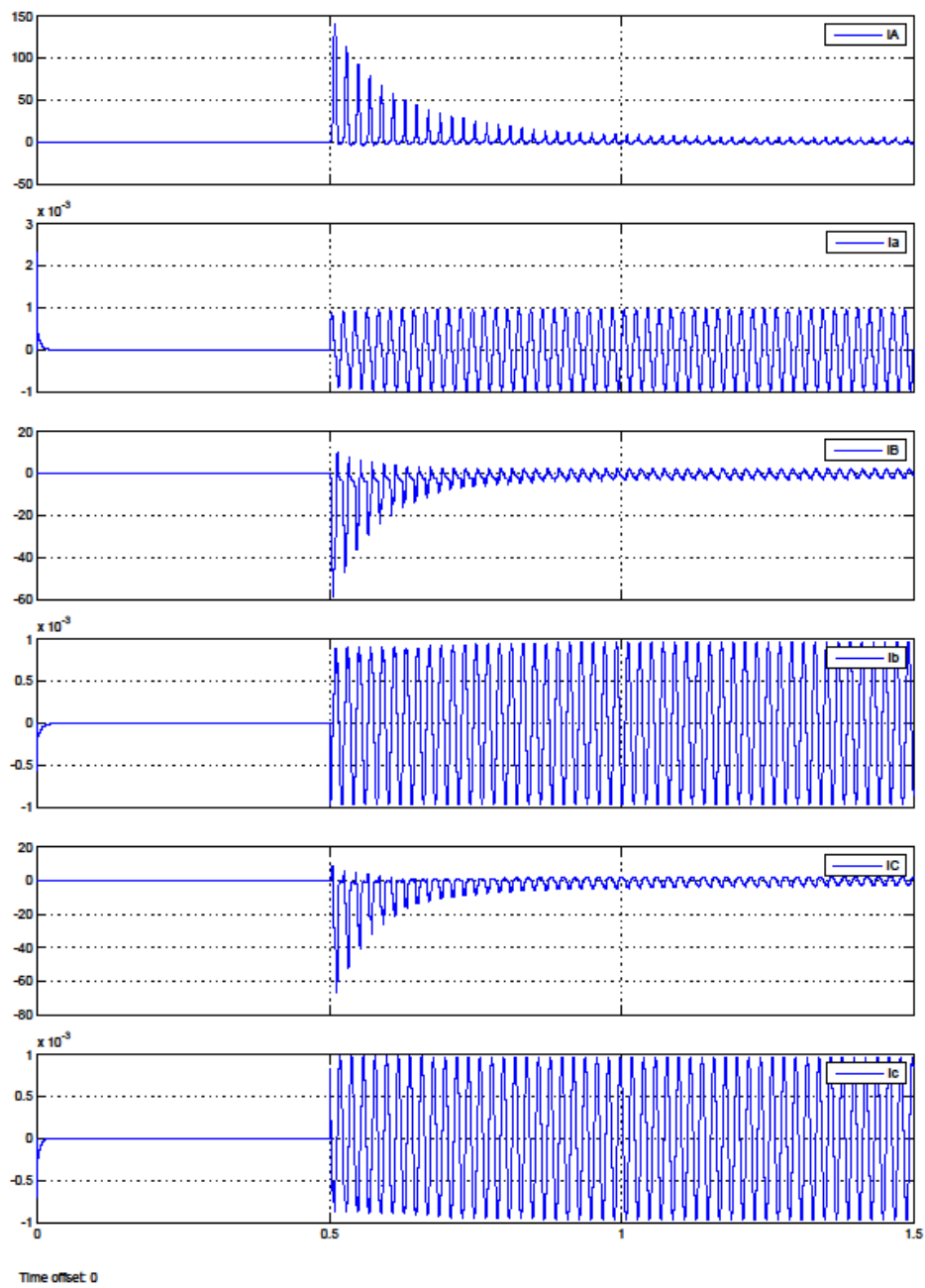


Fig. 5-7. Intensidades primarias y secundarias en energización del transformador en vacío.

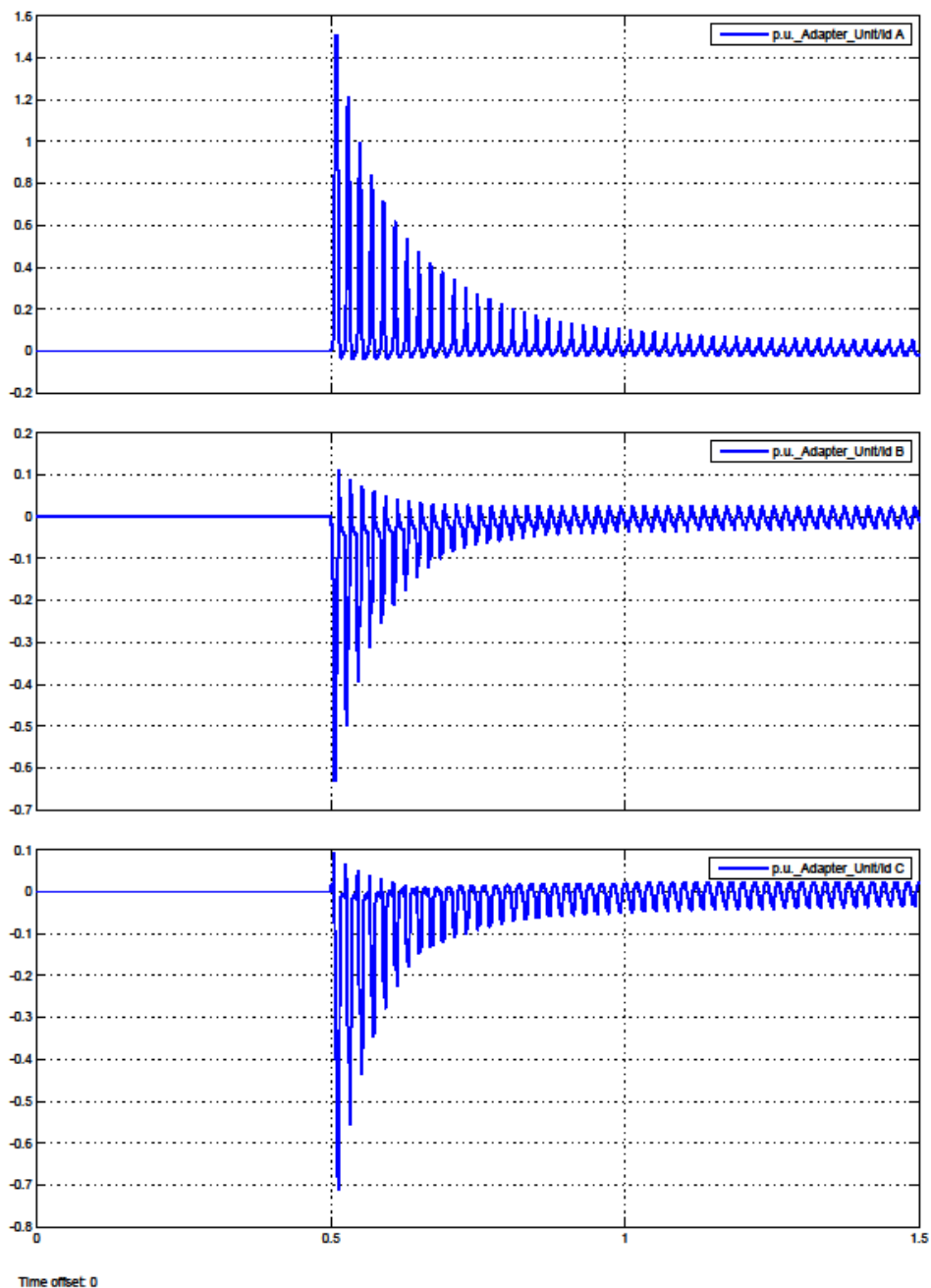


Fig. 5-8. Intensidades diferenciales en la energización del transformador en vacío.

Debido al elevado valor inicial de la corriente por fase al inicio de la energización y al bajo valor de la corriente secundaria, la intensidad diferencial resultante por fase es elevada como se puede comprobar en la Fig. 4-8. Esta característica hace que se activen los disparadores de los elementos porcentuales de cada fase, pues los valores de la intensidad diferencial y de la intensidad circulante son aproximadamente iguales, superando el valor porcentual de ajuste de cada elemento direccional.

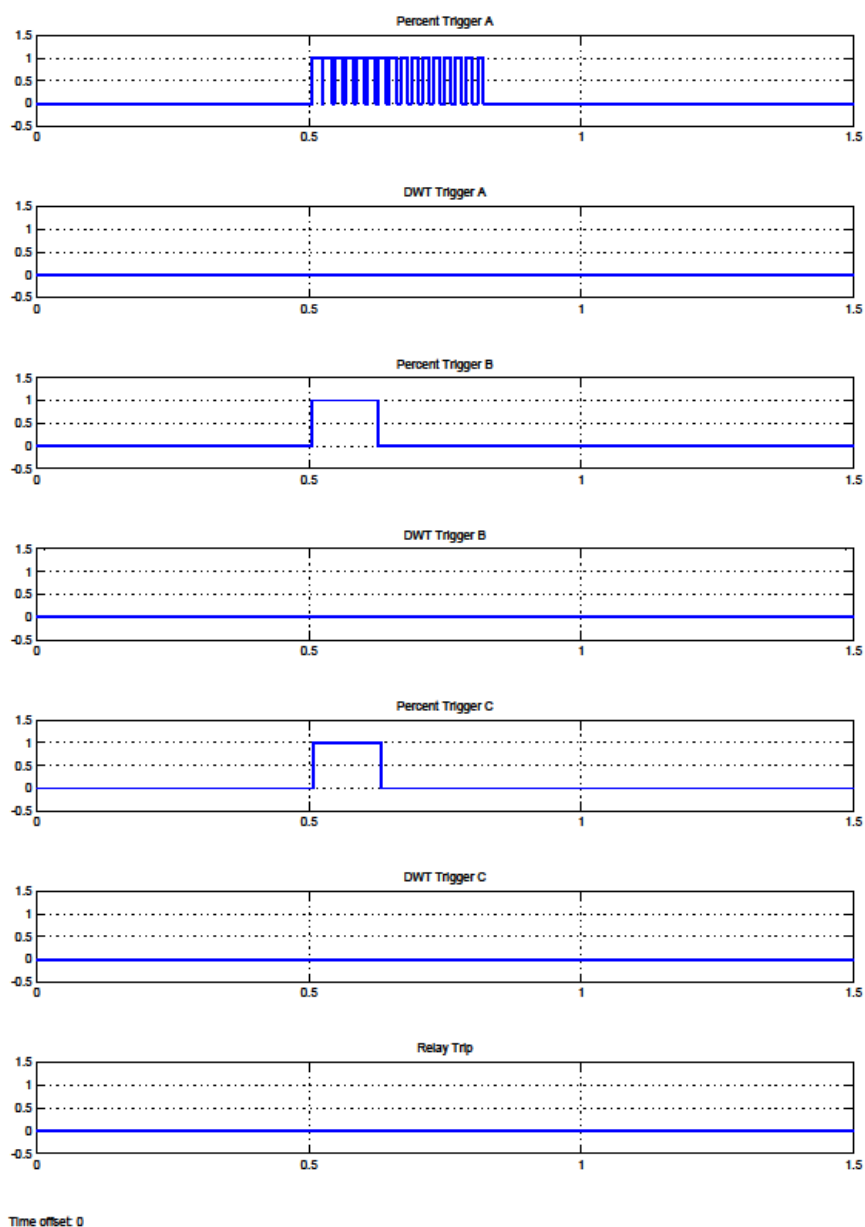


Fig. 5-9. Evolución de los disparadores del relé diferencial para energización del transformador en vacío.

La Fig. 4-9 muestra la evolución de los disparadores del relé diferencial para este caso. De cero hasta 0'5 segundos todos los disparadores están desconectados, pues el transformador está separado de la red y consecuentemente no circula intensidad alguna por él.

A los 0'5 segundos se cierra el interruptor del primario conectando el transformador a la red y comenzando el proceso de energización. Como se desprende de la Fig. 4-7 la intensidad diferencial por fase es elevada y también lo es la intensidad circulante, por lo que se activan los disparadores de la unidad porcentual para las tres fases, A, B y C. La duración de la activación de los disparadores es diferente para cada una de las fases, y depende del valor de

la intensidad diferencial: al avanzar el tiempo se va creando en el núcleo magnético del transformador el campo magnético necesario para su normal funcionamiento, y la creación de este campo va reduciendo de manera progresiva el valor de la intensidad de la corriente de conexión y con ello el valor de la intensidad diferencial de esa fase. Cuando dicho valor cae por debajo del valor mínimo de activación de la unidad porcentual se desactiva su disparador.

La activación del disparador de la unidad porcentual de una fase tiene como efecto inmediato la activación de la unidad DWT de esa fase, y dicha unidad va tomando intervalos de 10 ms de duración de la señal de la intensidad diferencial analizando los tiempo bajo umbral para discriminar si la activación de la unidad porcentual es debida a una energización del transformador o a una falta interna.

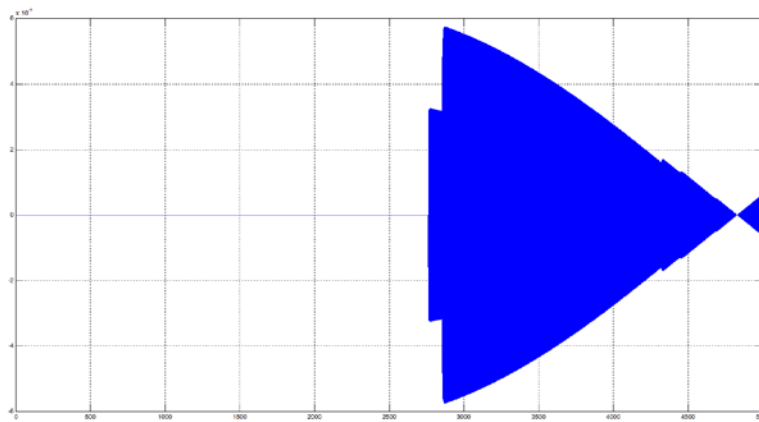


Fig. 5-10. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A.

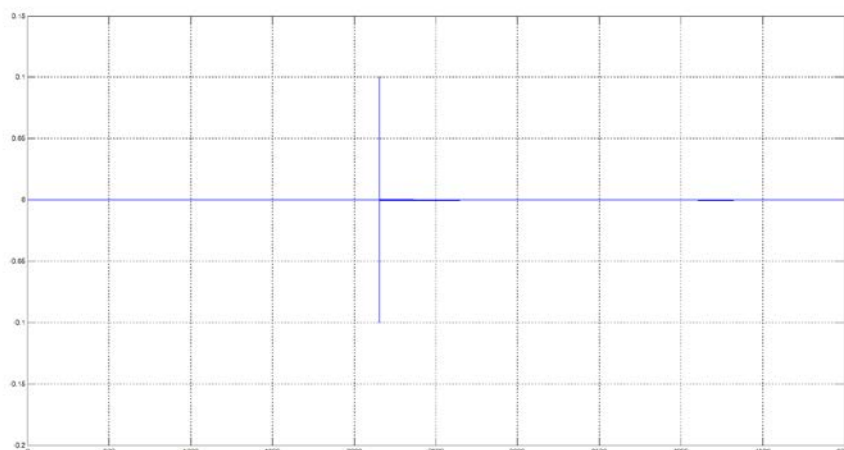


Fig. 5-11. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase B.

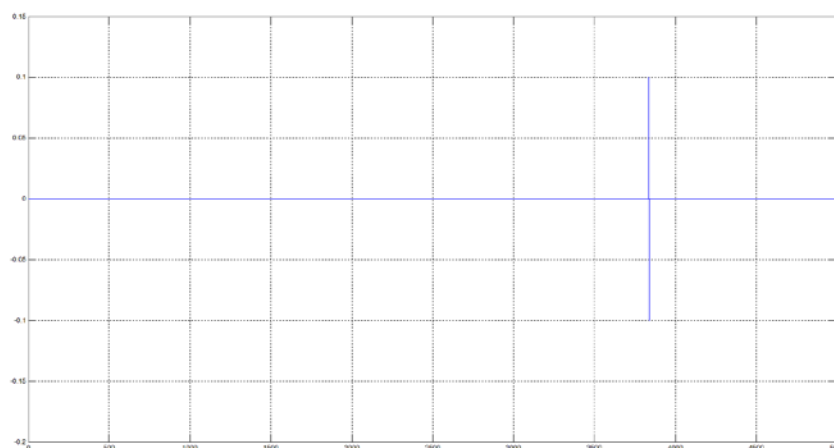


Fig. 5-12. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase C.

Con el objetivo de realizar una simulación que posteriormente pueda ser implementada en un relé digital real, se toma como tiempo entre muestras el valor de 200 ns, que es un valor usual del tiempo de conversión para los conversores analógico a digital más usuales. Por tanto un intervalo de valores de amplitud 10 ms contiene 5000 muestras separadas 200 ns.

La Fig. 4-10 muestra el detalle de la transformada wavelet discreta de la señal de la intensidad diferencial de la fase A para la energización del transformador en vacío.

Como se trató en el apartado 3.2.3.1 los tres bloques S-function implementados para la realización de la transformada wavelet discreta de la corriente diferencial y el posterior cálculo del tiempo bajo umbral toman intervalos de 5000 muestras que corresponden a medio ciclo de 10 ms. En la Fig. 4-10 se observa que los valores del detalle de la señal DWT de la intensidad diferencial de la fase A son nulos puesto que aún no se ha activado el disparador de la unidad porcentual correspondiente y por tanto no está entregando datos a la unidad DWT y ésta no activa su salida.

Al producirse la activación del disparador de la unidad porcentual la unidad DWT comienza a recibir los valores de la señal de la intensidad diferencial de la fase A, y cuando dispone de 5000 muestras que corresponden a un intervalo de 10 ms realiza la transformada wavelet discreta y calcula el tiempo bajo umbral, y como se desprende de la simple inspección visual de la señal de detalle, no se activa el disparador de dicha unidad DWT por ser altos los tiempos bajo umbral.

Esta situación se va a repetir en los sucesivos intervalos de 10 ms puesto que las señales de detalle son similares a los mostrados en la Fig. 3-4, con altos tiempos bajo umbral y por tanto no activando el disparador de la unidad DWT implicada. Este hecho puede comprobarse en la Fig. 4-9, donde se comprueba que no se activa ninguno de los disparadores de las unidades DWT y por tanto no se activa el disparo del relé.

Esta situación es la correcta puesto que se trata de una energización del transformador, y corresponde a un transitorio de corta duración con elevadas corrientes primarias pero que en ningún caso va a dañar al transformador.

### **5.1.2. Energización del transformador con secundario en carga.**

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una energización del transformador en carga, se conecta la carga del secundario manteniendo cerrado el interruptor trifásico del secundario del transformador. Este cierre se realizará para  $t = 0$  s, lo que corresponde a que el interruptor está cerrado desde el inicio de la simulación

Así mismo se desactivan las faltas en los bloques de simulación de falta interna y falta externa, y se programa el interruptor de conexión del transformador para que se cierre transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-13 muestra las intensidades primarias y secundarias para este caso. Al estar conectada una carga en el secundario del transformador el valor de las intensidades secundarias no es despreciable como en el caso de la energización en vacío. No obstante la situación es la de una energización del transformador por lo que en los instantes iniciales se presentará una alta corriente de conexión.



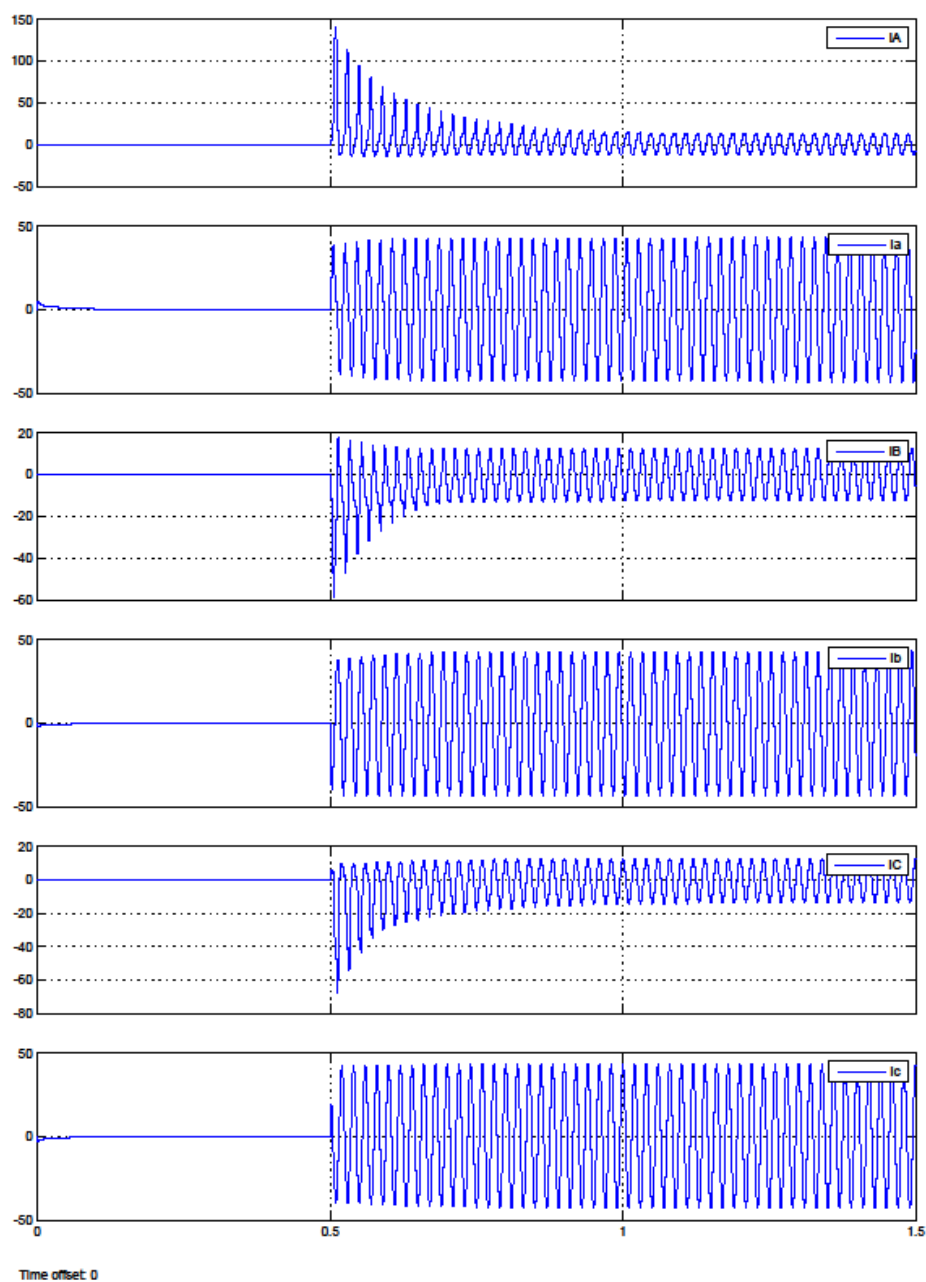


Fig. 5-13. Intensidades primarias y secundarias para la energización del transformador en carga.

La Fig. 4-14 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se puede comprobar el elevado valor inicial de dichas corrientes debido a que las intensidades primarias son muy elevadas debido a la formación del campo magnético en el núcleo del transformador. Puesto que se tiene una elevada corriente diferencial en los instantes iniciales se activarán los disparadores de los elementos porcentuales de cada fase.

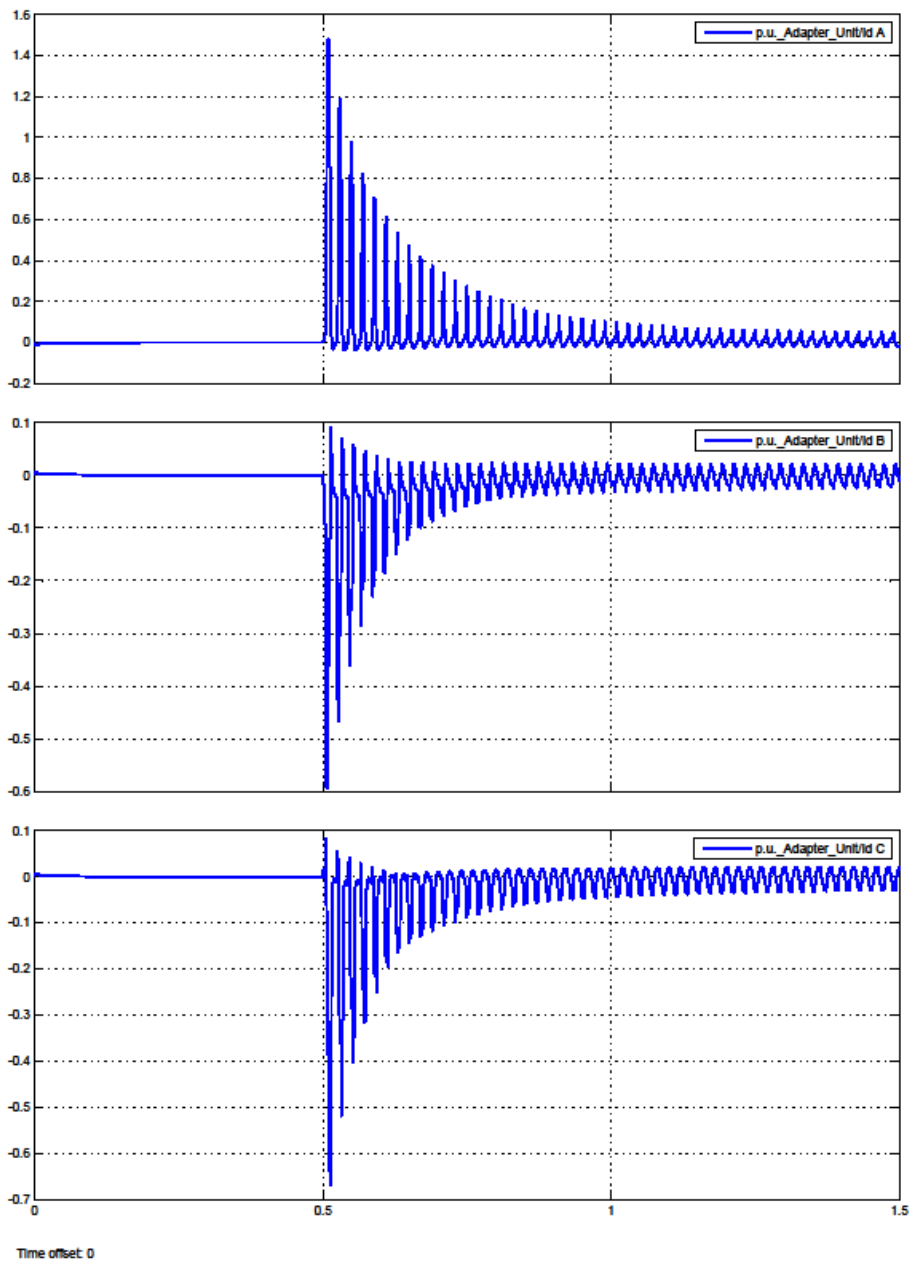


Fig. 5-14. Intensidades diferenciales en la energización del transformador en carga.

La Fig. 4-15 muestra la salida de los disparadores del relé en este caso. Se puede comprobar que se activan los disparadores de los elementos porcentuales de las tres fases, lo que conlleva que las correspondientes unidades DWT reciban los valores de la señal de la intensidad de cada fase.

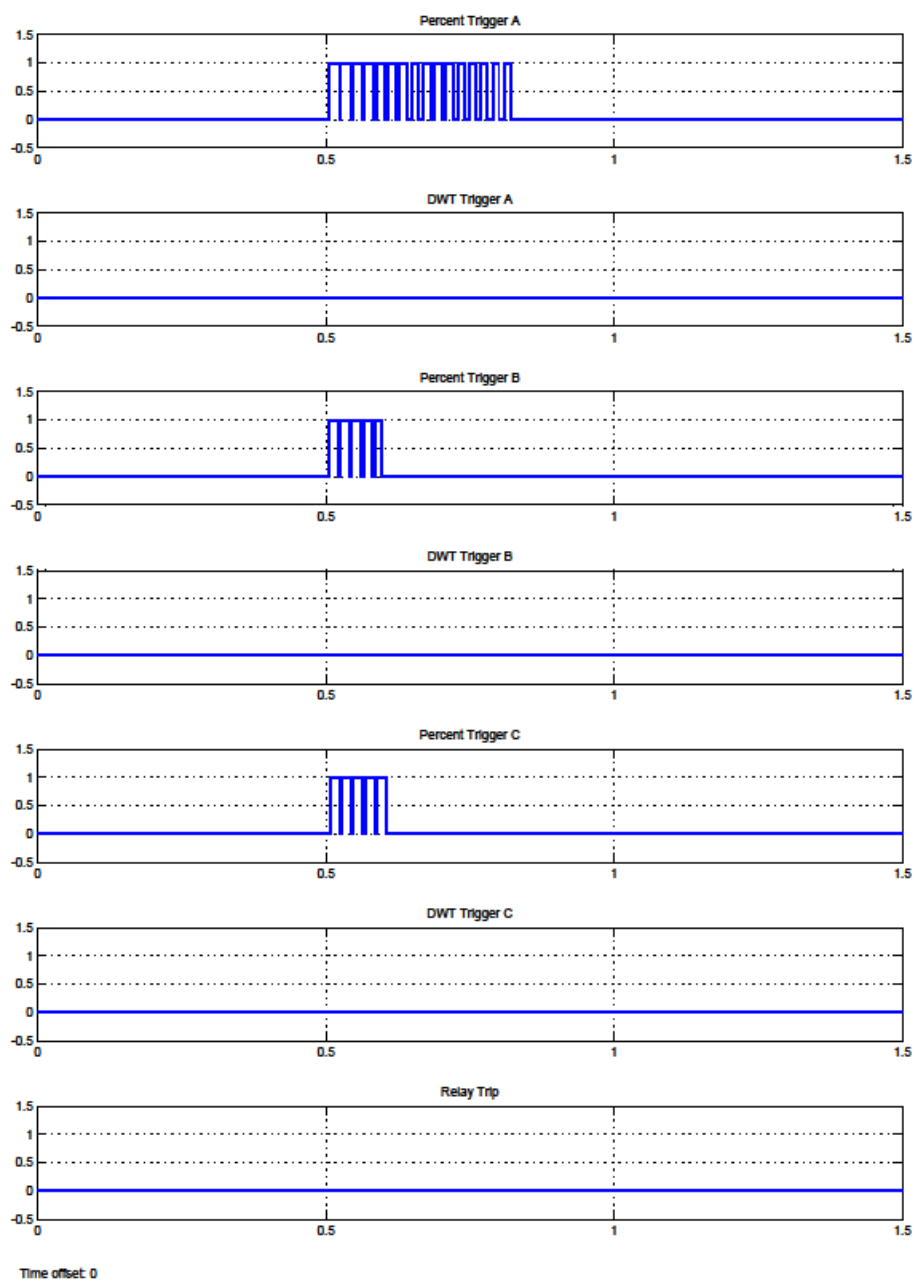


Fig. 5-15. Disparadores del relé en la energización del transformador en carga.

La Fig. 4-16 muestra la señal de detalle de la transformada wavelet de la intensidad diferencial de la fase A. Es similar a la obtenida para el caso de la energización en vacío del transformador y que se muestra en la Fig. 4-10 y por tanto, debido a que el tiempo bajo umbral de la señal es superior al 30% de la duración del intervalo no se activa el disparador correspondiente, como puede comprobarse en la Fig. 4-15.

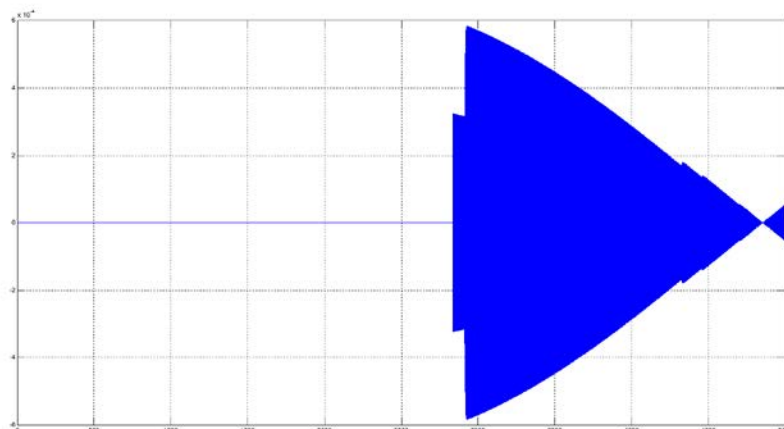


Fig. 5-16. Primer intervalo del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para energización del transformador en carga.

Las señales para el primer intervalo de las otras dos fases son así mismo muy similares a las obtenidas para la energización del transformador en vacío por lo que los disparadores de ambas fases tampoco se activan, y al no activarse ninguno de los tres disparadores de las unidades DWT no se activa el disparo del relé diferencial. Es el comportamiento esperado, pues al igual que en el caso de estudio anterior la energización del transformador no es un estado anormal de funcionamiento que pueda dañar al mismo y requiera de una desconexión de la red.

### 5.1.3. Falta interna con el transformador en vacío.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una falta interna y sin que esté conectada al secundario del mismo carga alguna, se desconecta la carga del secundario manteniendo abierto el interruptor trifásico del secundario del transformador.

Así mismo se desactiva la falta en el bloque de simulación de falta externa y se activa el bloque de simulación de falta interna para que se produzca una falta a tierra de la fase A transcurridos 1000 ms desde el inicio de la simulación. Puesto que es preciso que el transformador esté conectado a la red se mantendrán las condiciones de conexión de los apartados anteriores, esto es, conexión a la red del transformador transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-17 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador en este caso. Transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación se conecta el transformador a la red mediante el cierre del interruptor del primario y se tienen las condiciones de energización del transformador en vacío. Como se vio en el apartado 4.1.1 en esta situación no dispara el relé diferencial puesto que se trata de una situación normal de funcionamiento de un transformador.

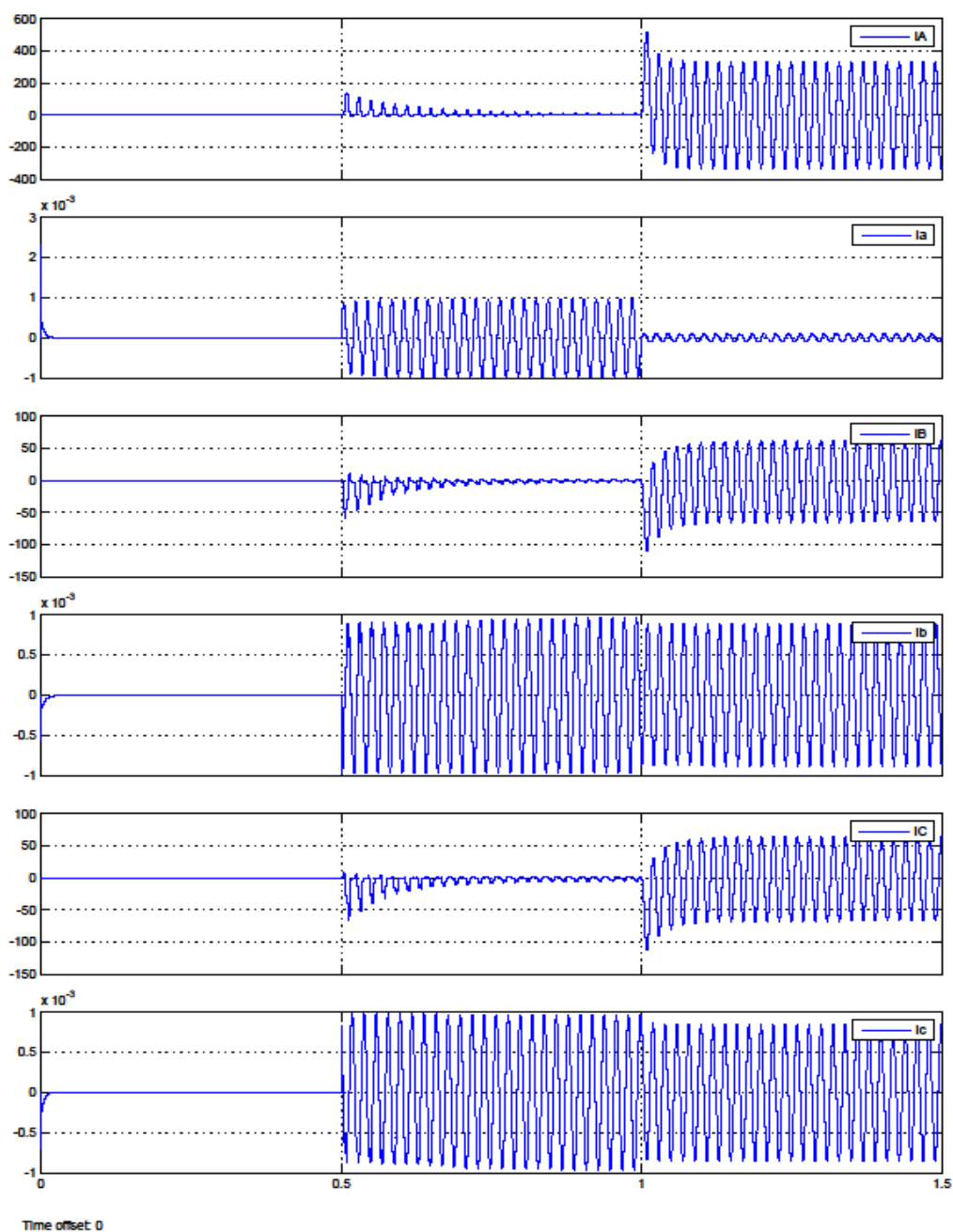


Fig. 5-17. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en el transformador.

A los 1000 ms de iniciada la simulación se produce una falta a tierra en la fase A con una resistencia de contacto despreciable. Puede observarse la alta corriente de cortocircuito que se produce en la fase A comparada con la que circula por las fases sanas.

Puesto que el transformador está en vacío apenas circula una pequeña corriente capacitiva por los devanados del secundario, lo que produce una alta intensidad diferencial por fase como se puede comprobar en la Fig. 4-18.

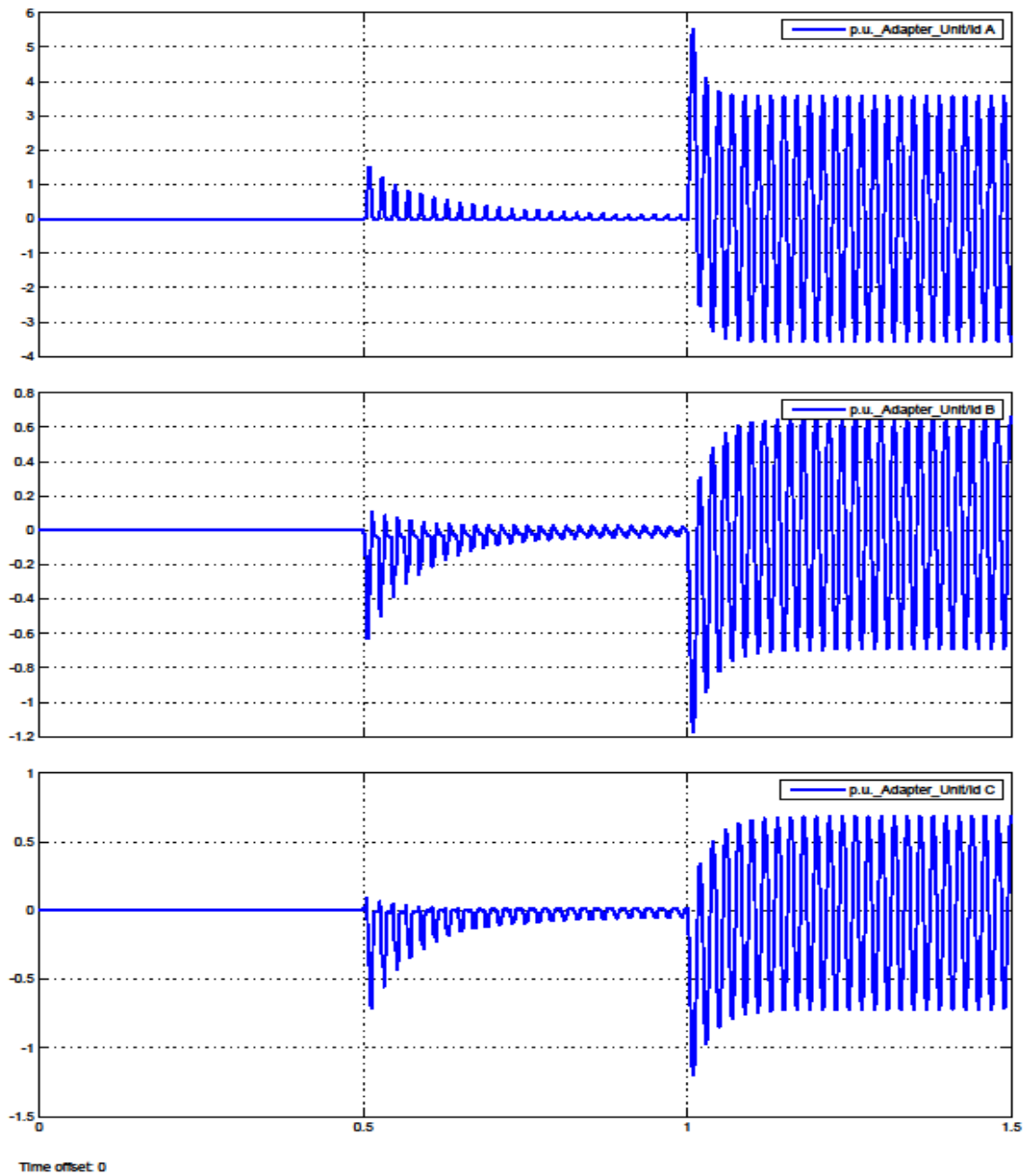


Fig. 5-18 Intensidades diferenciales para falta interna del transformador en vacío.

La elevada intensidad diferencial activa el disparador las unidades porcentuales de cada una de las fases como se observa en la Fig. 4-19. Por tanto las unidades DWT comienzan a recibir los datos de la intensidad diferencial correspondiente y a calcular los tiempos bajo umbral para cada intervalo de anchura 10 ms.

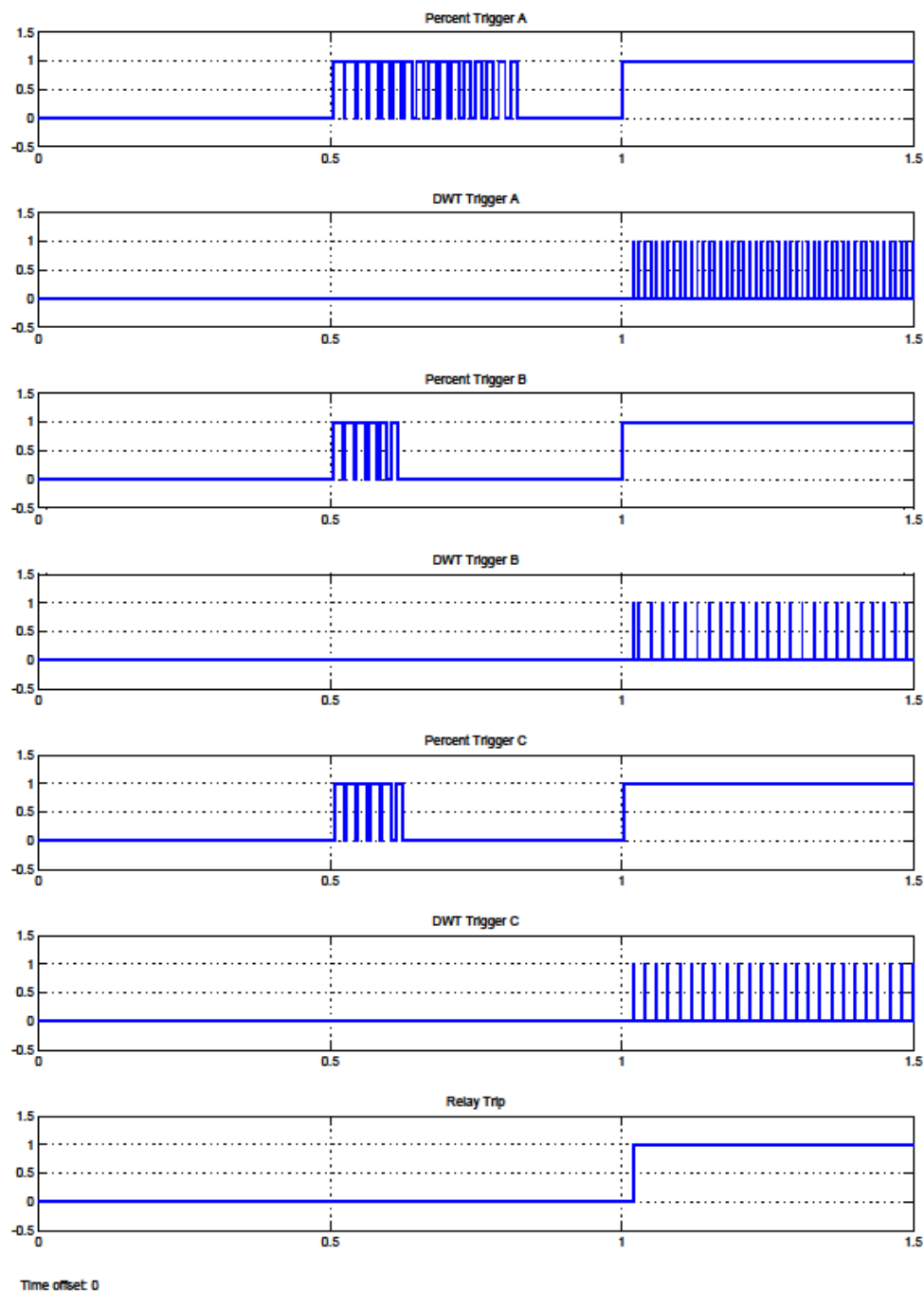


Fig. 5-19. Evolución de los disparadores del relé para falta interna con el transformador en vacío.

En la Fig. 4-19 se observa que los disparadores de las unidades DWT se activan al poco tiempo de iniciada la falta interna a tierra, activando por tanto el disparo del relé diferencial, operación correcta pues una falta interna es una condición de funcionamiento no deseada para el transformador y que debe ser eliminada lo antes posible.

### 5.1.3.1. Tiempo de disparo.

El tiempo de disparo de una protección es un parámetro fundamental del mismo, pues un tiempo de disparo reducido redundaría en un tiempo de eliminación de la falta más bajo y como consecuencia de ello en una minimización de los daños que podría sufrir el transformador.

Para analizar el tiempo de disparo del relé diferencial se tendrá en cuenta el tiempo transcurrido desde que se produce la falta interna hasta que se produce el disparo del relé diferencial.

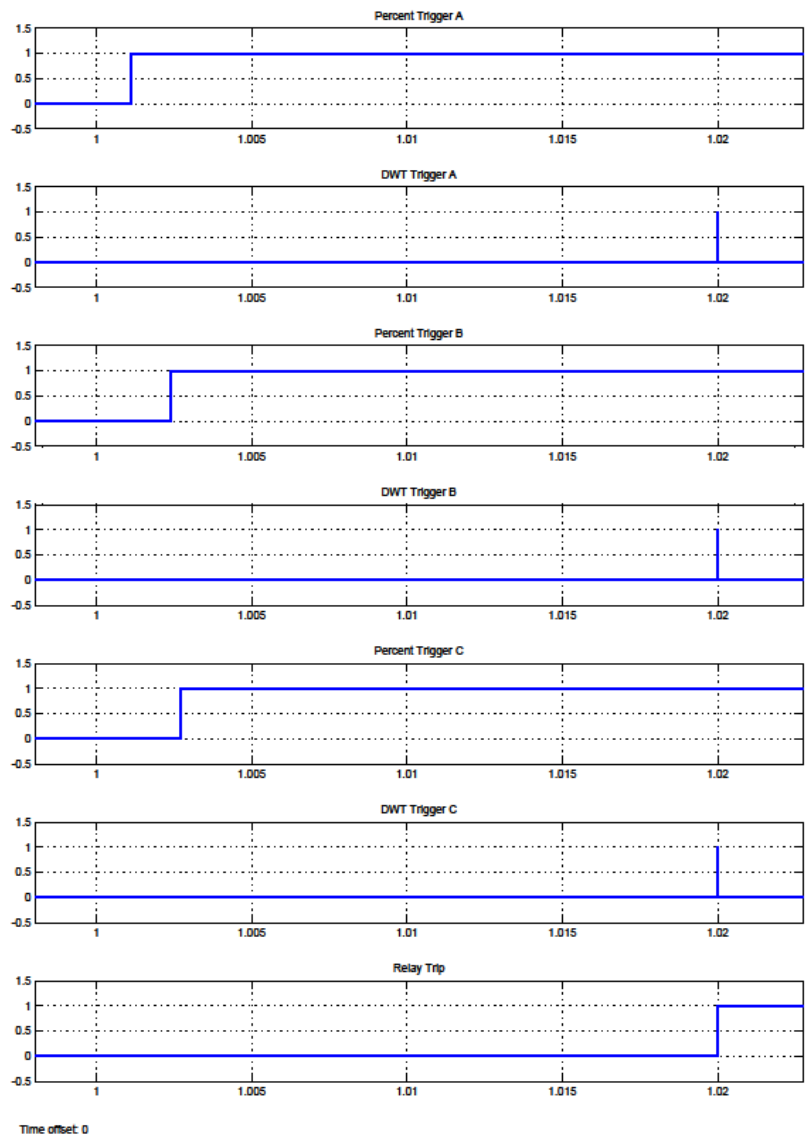


Fig. 5-20. Evolución de los disparadores desde el inicio de la falta hasta el disparo del relé con el transformador en vacío.

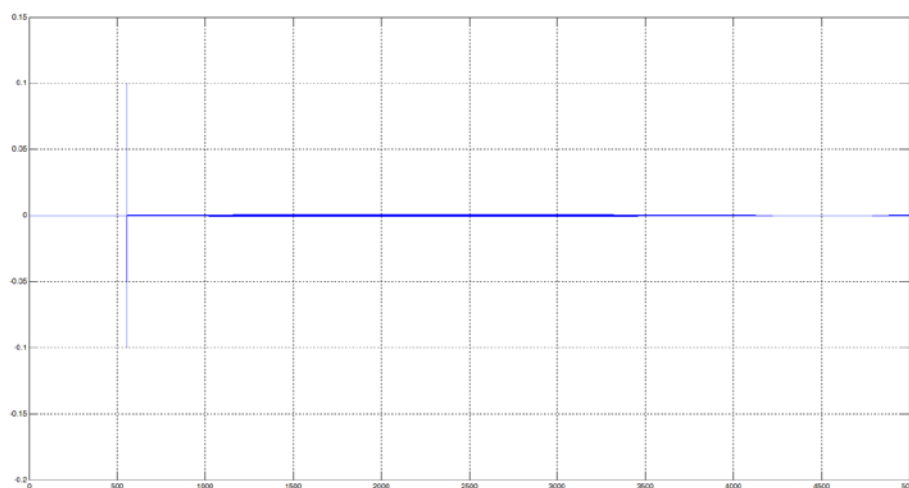


La Fig. 4-20 muestra la evolución de los disparadores del relé desde que se inicia la falta a tierra en el transformador hasta que se produce la activación del disparador del relé diferencial.

El disparador de la unidad porcentual de la fase dañada, la fase A, se activa transcurrido 1 ms desde el inicio de la falta. Es el tiempo que tarda la intensidad diferencial en aumentar desde el valor inicial del estado previo a la falta hasta superar a la intensidad circulante en el porcentaje seleccionado en el tarado previo del relé, que en el caso de estudio actual es del 20 %.

Los disparadores de las unidades porcentuales de las fases sanas se activan más tarde ya que el crecimiento de la intensidad no es tan rápido en ellas.

Una vez activados los disparadores de las unidades porcentuales se inicia el procesado de las señales de las intensidades diferenciales de cada fase en las unidades DWT. Veamos en detalle este procesado para la fase A, que es la fase en falta.



*Fig. 5-21. Señal de detalle de la transformada wavelet discreta de la intensidad diferencial de la fase A para el intervalo desde 1000 hasta 1010 ms desde el inicio de la simulación.*

La Fig. 4-21 muestra la señal de detalle de la transformada wavelet discreta de la intensidad diferencial en el intervalo de 10 ms que se inicia a los 1000 ms, esto es, el primer intervalo que se tiene al producirse la falta.

Puesto que antes de producirse la falta el transformador está en vacío, la intensidad diferencial es la misma intensidad de vacío, ya que la intensidad secundaria es despreciable frente a la primaria en valores p.u. Al producirse la falta la intensidad crece desde la intensidad de vacío hasta la intensidad de cortocircuito, y esa transición abrupta tiene como resultado un elevado valor de la señal de detalle de la transformada wavelet discreta. Es el pico tanto positivo como negativo que se observa en la Fig. 4-21.

La Fig. 4-22 muestra una ampliación de la señal mostrada en la Fig. 4-21 para los valores en los que se muestra el pico de la señal.

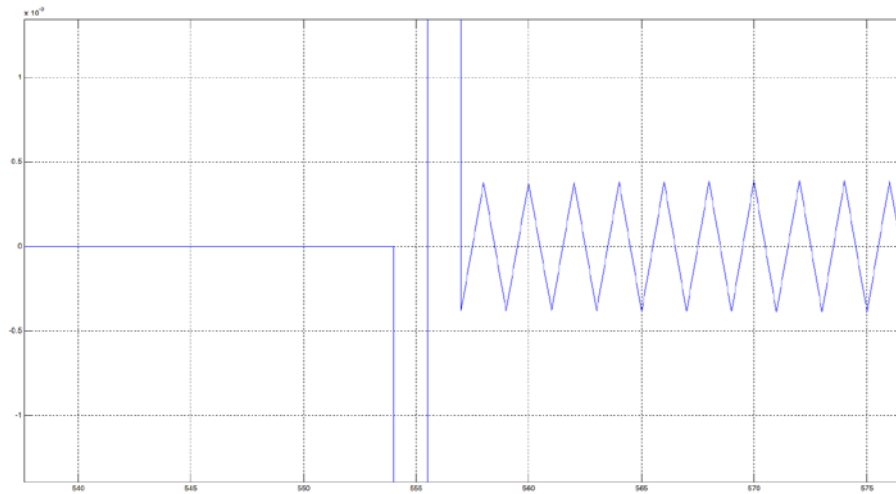


Fig. 5-22. Ampliación de la señal mostrada en la Fig. 4-21.

Se observa que se produce un pico muy elevado al iniciarse la falta y posteriormente se estabiliza la señal en unos valores mucho más bajos. La Tabla 1 muestra el valor que tienen diez puntos situados alrededor del pico de la señal.

Tabla 1. Valores del detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A.

t(ms)	1000'1100	1000'1102	1000'1104	1000'1106	1000'1108	1000'1110	1000'1112	1000'1114	1000'1116	1000'1118
SD(p.u.)	0	0	0	0	-0.1001	0.1001	-0.0004	0.0004	-0.0004	0.0004

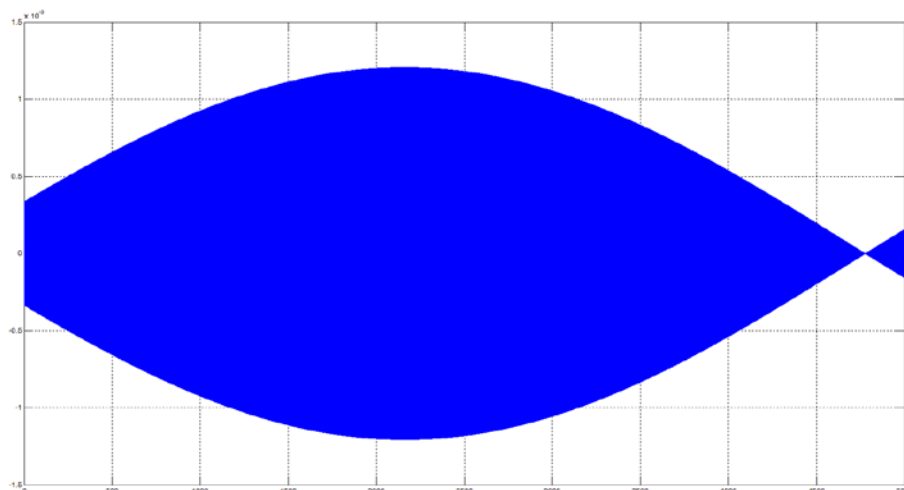
El valor de pico es 250 veces superior al valor del resto de puntos, razón por la cual en la Fig. 4-21 apenas se separan del eje horizontal los puntos posteriores al pico.

Este valor de pico tan elevado tiene como consecuencia inmediata que la unidad DWT que trata este dato tome como valor umbral el 30 % del valor de pico del intervalo, que en este caso es

$$umbral = 0'3 \cdot 0'1001 = 0'03p. u.$$

Puesto que el resto de valores del intervalo no supera este valor umbral, el tiempo bajo umbral del intervalo es prácticamente el ancho del intervalo (10 ms), por lo que la unidad DWT no activa su disparador y pasa a procesar el siguiente intervalo de 10 ms.

La Fig. 4-23 muestra la señal de detalle para el segundo intervalo de 10 ms.



*Fig. 5-23. Segundo intervalo de 10 ms de la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para falta interna con el transformador en vacío.*

En este caso se puede comprobar a simple vista que el tiempo bajo umbral es inferior al 30 % de la duración del intervalo, por lo que la unidad DWT activará su disparador como se muestra en la Fig. 4-20.

Por tanto el tiempo de disparo del relé diferencial desde que se inicia la falta a tierra es de 20 ms, resultado de los 10 ms que dura el intervalo inicial y que no activa su disparador más los 10 ms que se precisan para obtener y tratar el segundo intervalo.

#### **5.1.4. Falta interna con el transformador en carga.**

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una falta interna y con una carga conectada en su secundario, se conecta la carga del secundario manteniendo cerrado el interruptor trifásico del secundario del transformador.

Así mismo se desactiva la falta en el bloque de simulación de falta externa y se activa el bloque de simulación de falta interna para que se produzca una falta a tierra de la fase A transcurridos 1000 ms desde el inicio de la simulación. Puesto que es preciso que el transformador esté conectado a la red se mantendrán las condiciones de conexión de los apartados anteriores, esto es, conexión a la red del transformador transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-24 muestra las intensidades primarias y secundarias para falta interna del transformador en carga. A diferencia del caso anterior, con el transformador en vacío, las

intensidades secundarias tienen un valor no despreciable puesto que el transformador alimenta a una carga trifásica. Al producirse la falta a tierra de la fase A la intensidad secundaria de esa fase se reduce sensiblemente debido a la baja tensión de la fase A con respecto al neutro por desplazamiento del mismo.

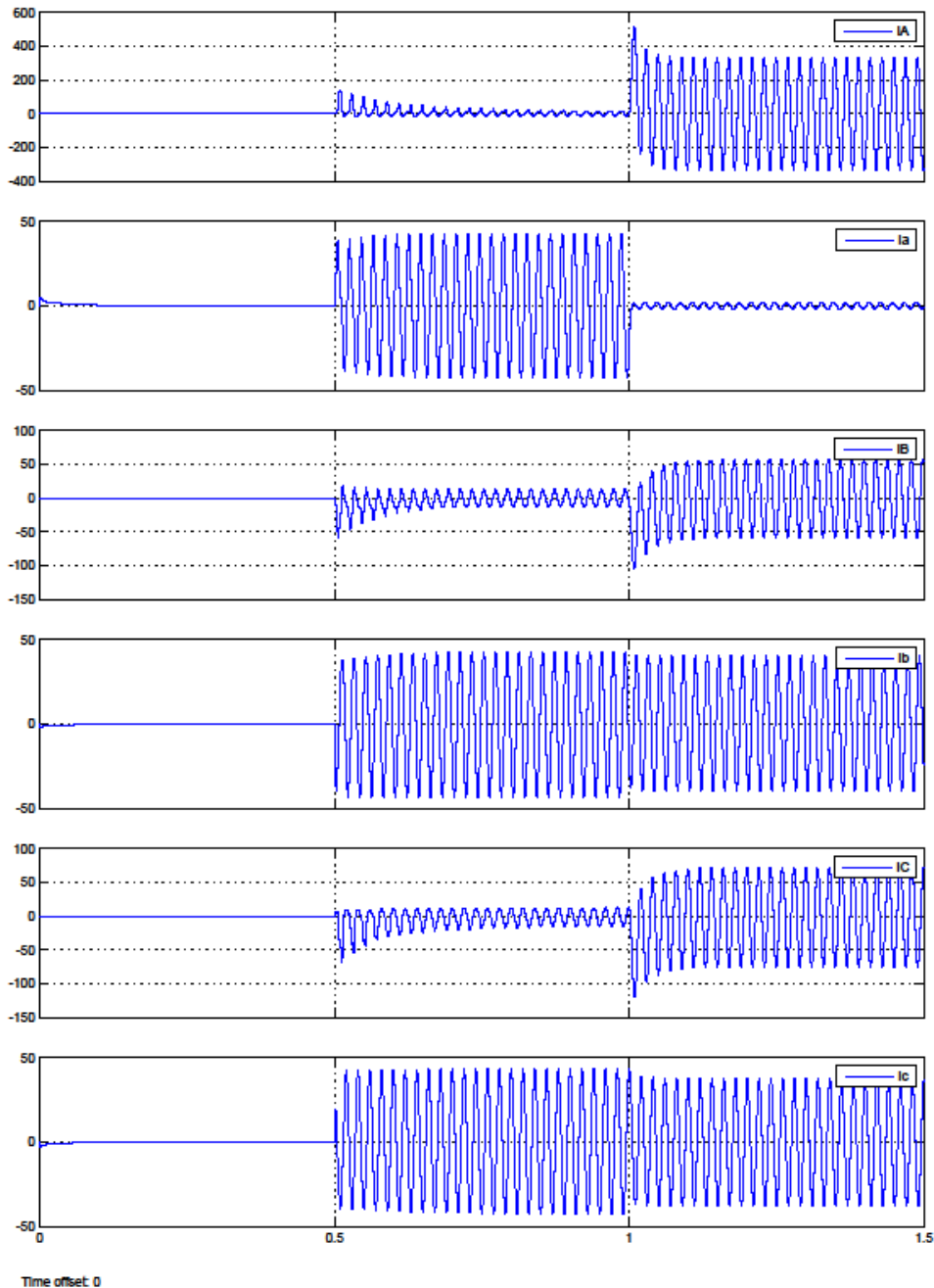


Fig. 5-24. Intensidades primarias y secundarias para falta interna con el transformador en carga.

La Fig. 4-25 muestra las intensidades diferenciales para este caso. A pesar de que las intensidades secundarias tienen un valor apreciable, la falta provoca la aparición de corrientes

de cortocircito en el primario por lo que las intensidades diferenciales presentan altos valores que activan los disparadores de las correspondientes unidades porcentuales.

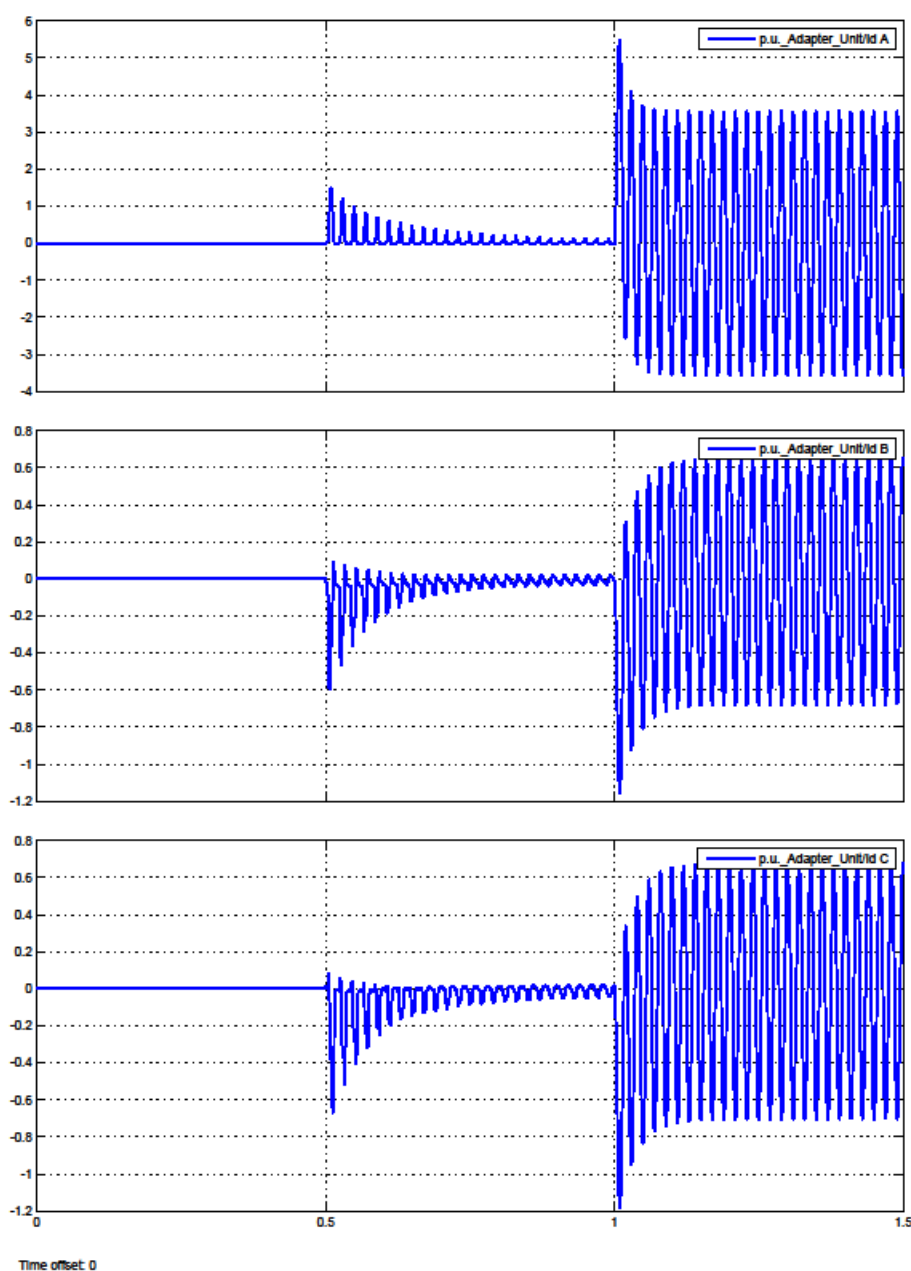


Fig. 5-25. Intensidades diferenciales para falta interna con el transformador en carga.

La Fig. 4-26 muestra las señales de los disparadores para este caso. Al iniciarse la falta se activan los disparadores de las unidades porcentuales que a su vez habilitan a las correspondientes unidades DWT. Se observa que se produce el disparo del relé ya que todas unidades DWT activan sus disparadores.

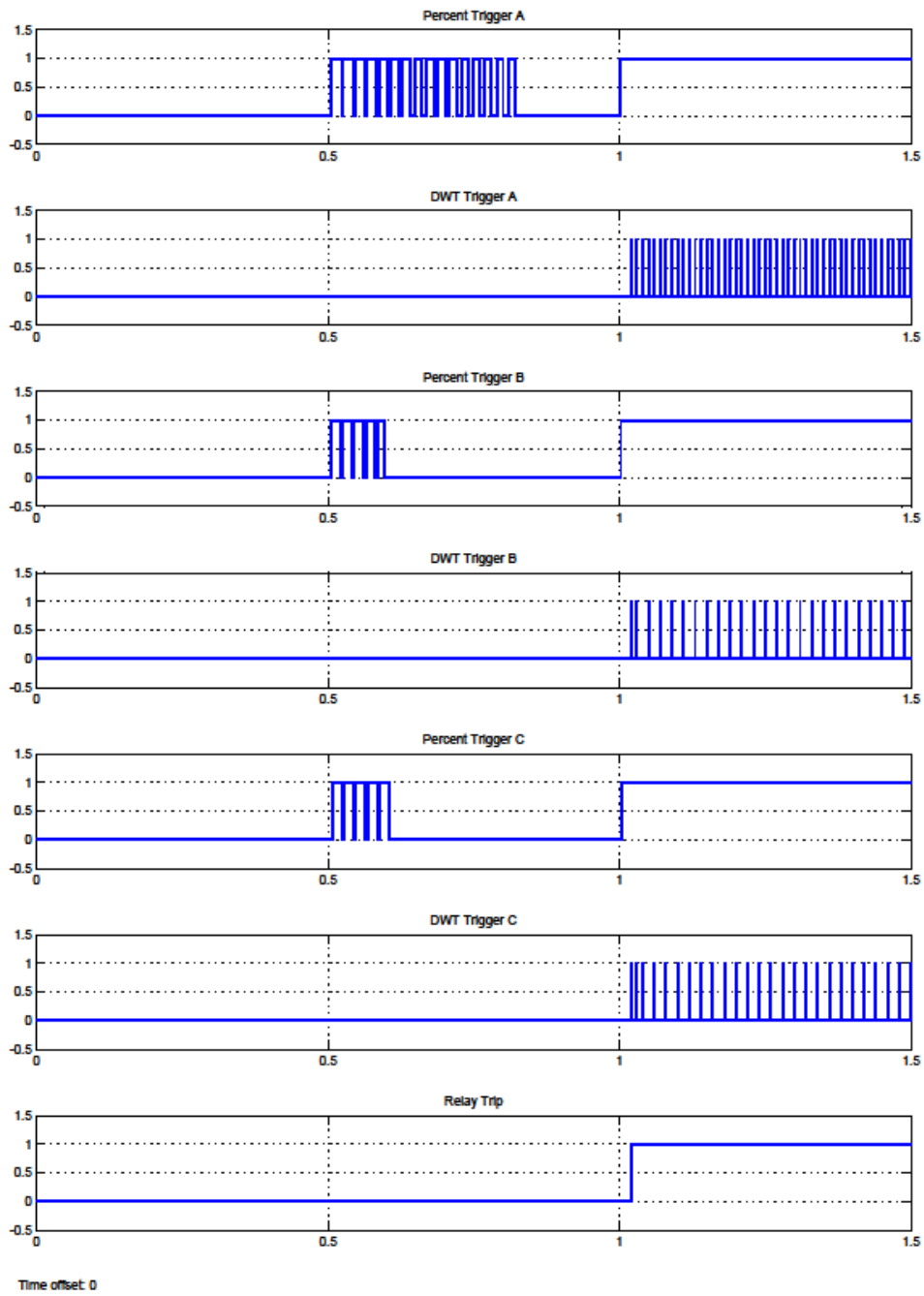


Fig. 5-26. Señales en los disparadores para falta interna del transformador en carga.

### 5.1.4.1. Tiempo de disparo.

La Fig. 4-27 muestra la evolución de los disparadores desde el inicio de la falta hasta el disparo del relé. Como en el caso de falta interna con el transformador en vacío se tiene un tiempo de disparo de 20 ms.

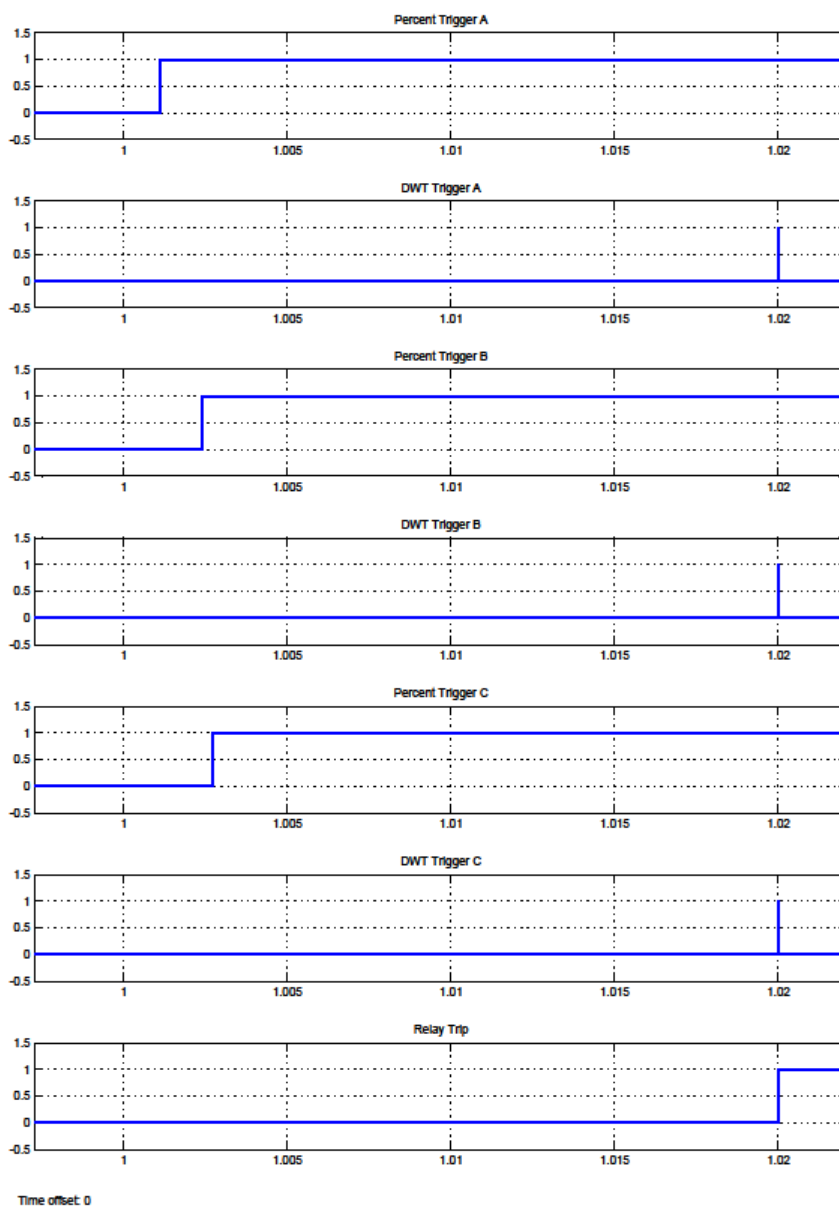


Fig. 5-27. Evolución de los disparadores desde el inicio de la falta hasta el disparo del relé para falta interna con el transformador en carga.

La razón de este tiempo de disparo es la misma que en el caso de falta interna con el transformador en vacío: Las unidades DWT necesitan analizar en el peor de los escenarios posibles dos intervalos de 10 ms antes de activar el disparo del relé.

Como se puede comprobar en la Fig. 4-28, al igual que sucede en el caso de falta interna con el transformador en vacío, se presenta un pico en la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A que hace que el tiempo bajo umbral sea prácticamente el mismo que la duración del intervalo, por lo que no se activa el disparador de esta unidad DWT.

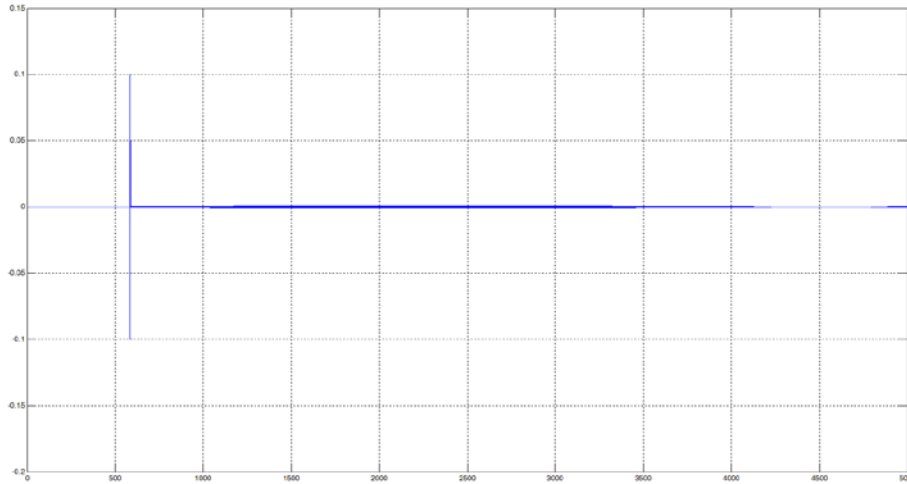


Fig. 5-28. Señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para el intervalo desde 1000 hasta 1010 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-29 muestra una ampliación de la zona en la que se produce el pico, comprobándose que se tiene una situación similar a la producida en el caso de falta interna con el transformador en vacío

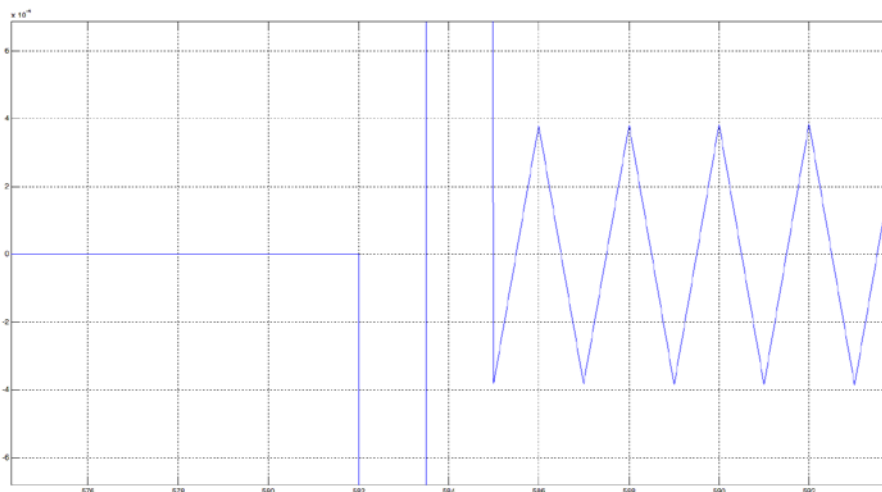


Fig. 5-29. Ampliación de la señal mostrada en la Fig. 4-28.



Una vez analizado el primer intervalo de 10 ms en la unidad DWT se pasa a analizar el siguiente intervalo. La Fig. 4-30 muestra la señal correspondiente a este segundo intervalo.

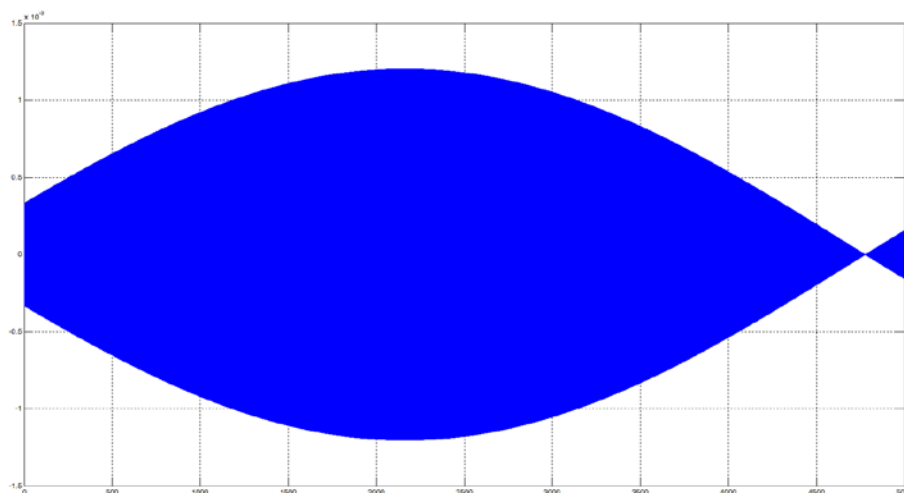


Fig. 5-30. Segundo intervalo de 10 ms de la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial de la fase A para falta interna con el transformador en carga.

Se puede comprobar que en este caso el tiempo bajo umbral es inferior al 30 % de la duración del intervalo lo que activa el disparador correspondiente y con ello el disparo del relé, como muestran las señales de la Fig. 4-27, resultando un tiempo de disparo del relé de 20 ms.

### 5.1.5. Falta externa con el transformador en vacío.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una falta externa y sin que esté conectada al secundario del mismo carga alguna, se desconecta la carga del secundario manteniendo abierto el interruptor trifásico del secundario del transformador.

Así mismo se desactiva la falta en el bloque de simulación de falta interna y se activa el bloque de simulación de falta externa para que se produzca una falta a tierra de la fase A transcurridos 1000 ms desde el inicio de la simulación. Puesto que es preciso que el transformador esté conectado a la red se mantendrán las condiciones de conexión de los apartados anteriores, esto es, conexión a la red del transformador transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

La Fig. 4-31 muestra las intensidades primarias y secundarias para falta externa del transformador en vacío. Se observa cómo la intensidad de la fase afectada alcanza un elevado valor, pero también sucede lo mismo con la intensidad primaria, por lo que las intensidades diferenciales de cada fase son de reducido valor, como muestra la Fig. 4-32.

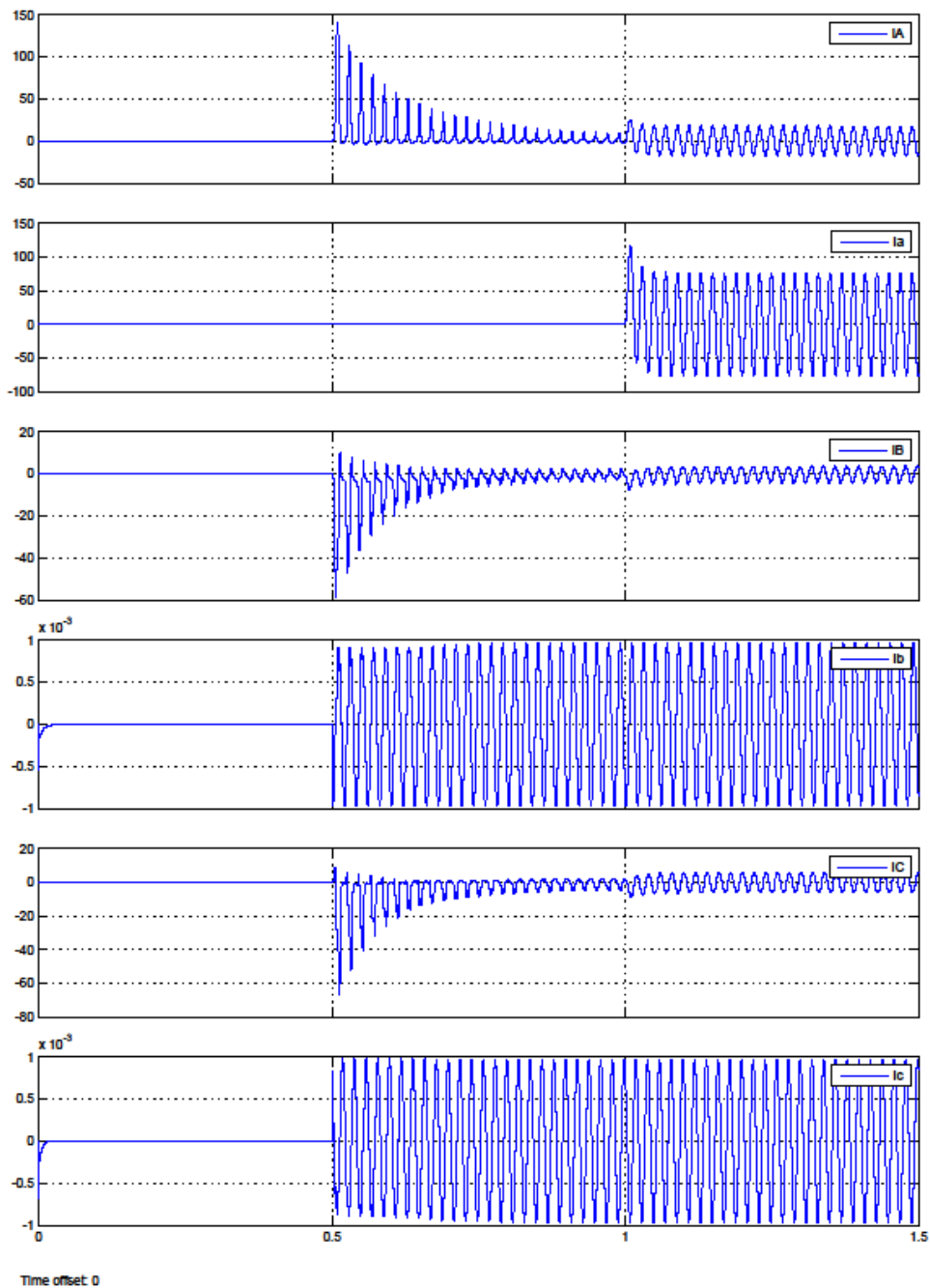


Fig. 5-31. Intensidades primarias y secundarias para falta externa del transformador en vacío.

Debido al bajo valor de las intensidades diferenciales de las tres fases no se activa ninguno de los disparadores de las unidades porcentuales y como consecuencia de ello ninguno de los disparadores de las unidades DWT ni el disparo del relé diferencial. La Fig. 4-33 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso, comprobándose que no se activa ninguno de los disparadores mencionados.

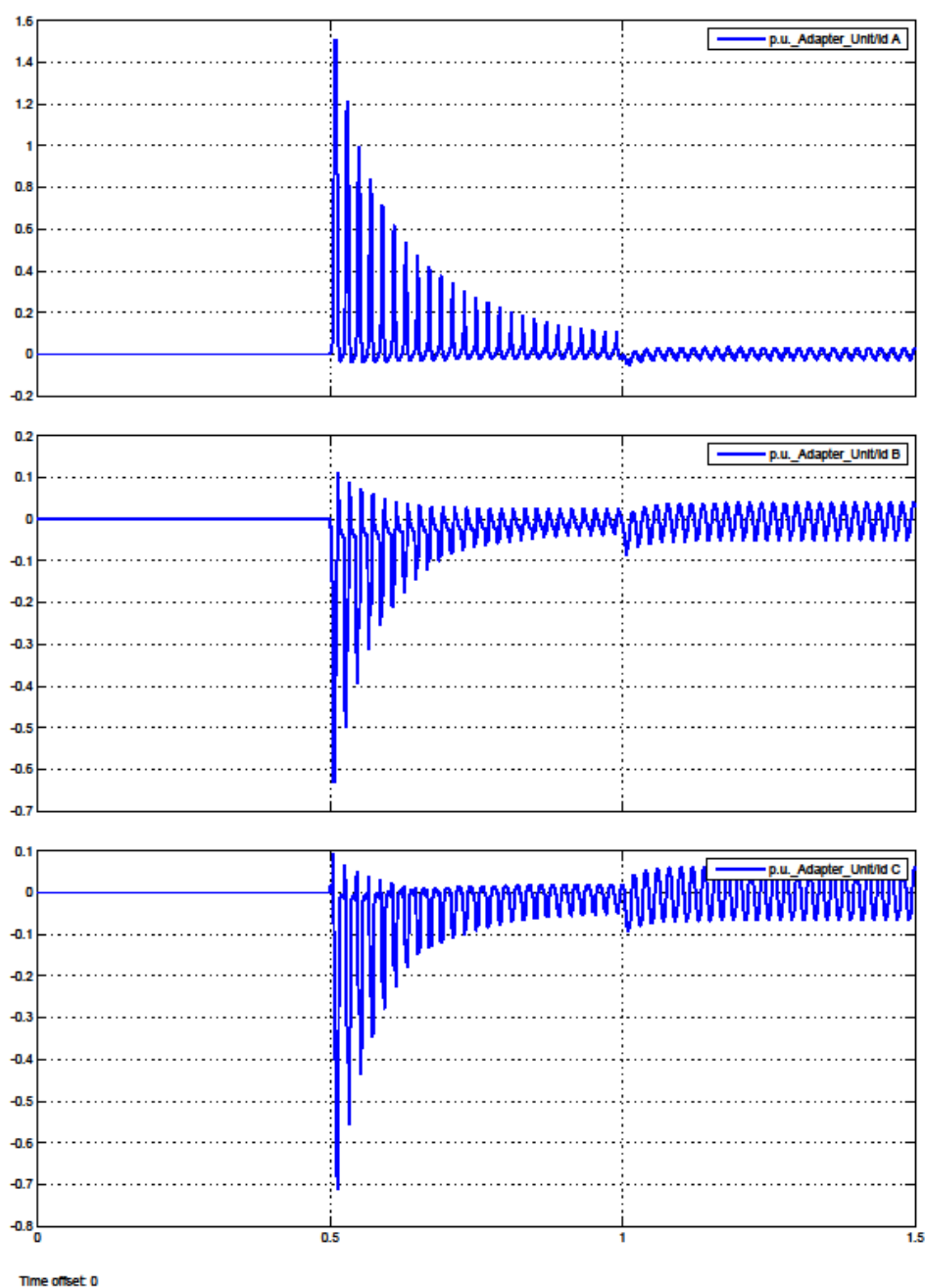


Fig. 5-32. Intensidades diferenciales para falta externa con el transformador en vacío.

Este comportamiento es el esperado para el relé, pues una falta externa, si bien provoca la circulación de altas intensidades de falta a través de los devanados del transformador, no debe disparar el relé diferencial del transformador ya que esa misión correspondería a los relés de protección de la red externa en la que se produce la falta.

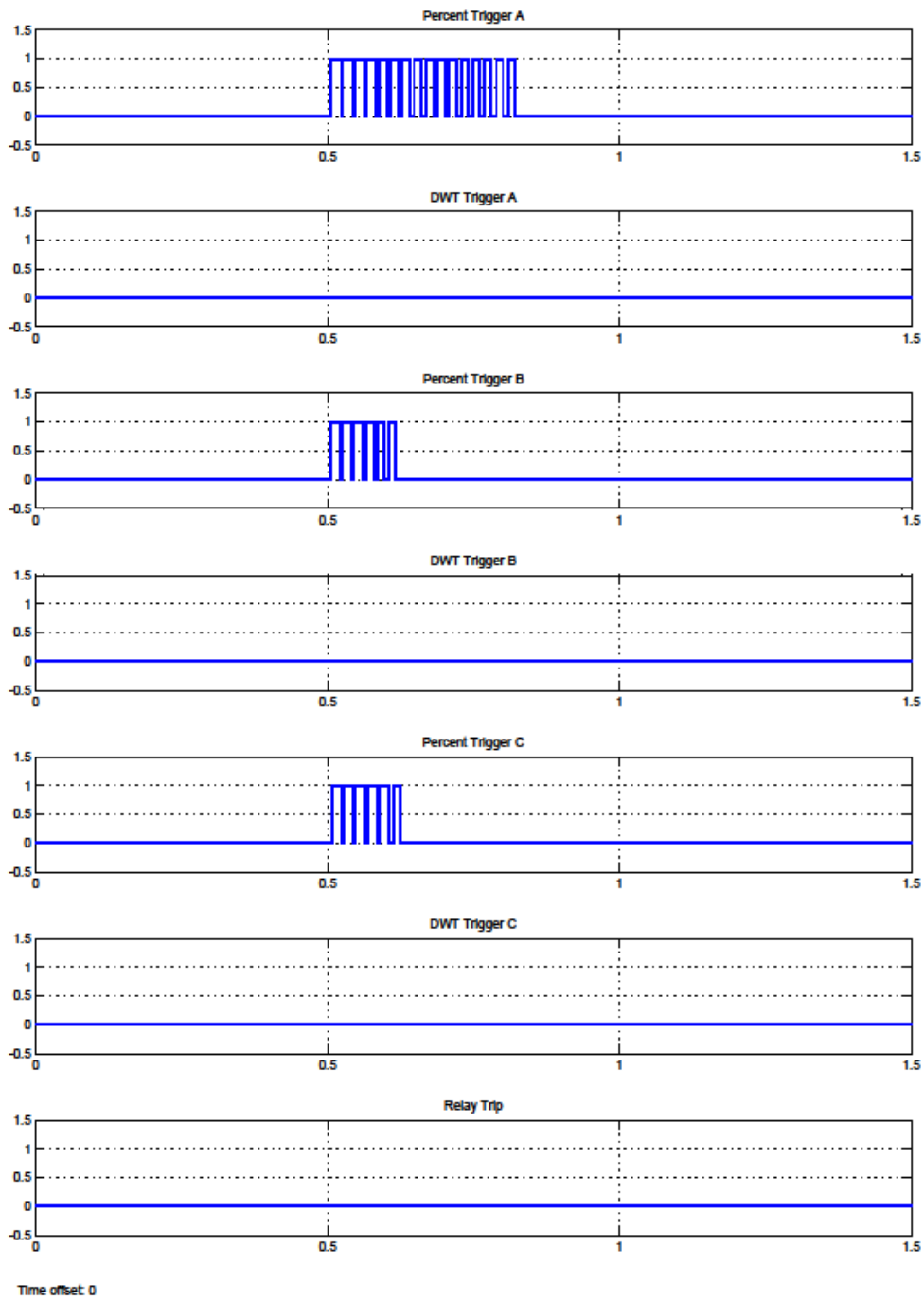


Fig. 5-33. Evolución de los disparadores del relé para falta externa con el transformador en vacío.

### 5.1.6. Falta externa con el transformador en carga.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante una falta externa y con una carga conectada en el secundario, se conecta la carga del secundario manteniendo cerrado el interruptor trifásico del secundario del transformador.

Así mismo se desactiva la falta en el bloque de simulación de falta interna y se activa el bloque de simulación de falta externa para que se produzca una falta a tierra de la fase A transcurridos 1000 ms desde el inicio de la simulación. Puesto que es preciso que el transformador esté conectado a la red se mantendrán las condiciones de conexión de los apartados anteriores, esto es, conexión a la red del transformador transcurridos 500 ms desde el inicio de la simulación.

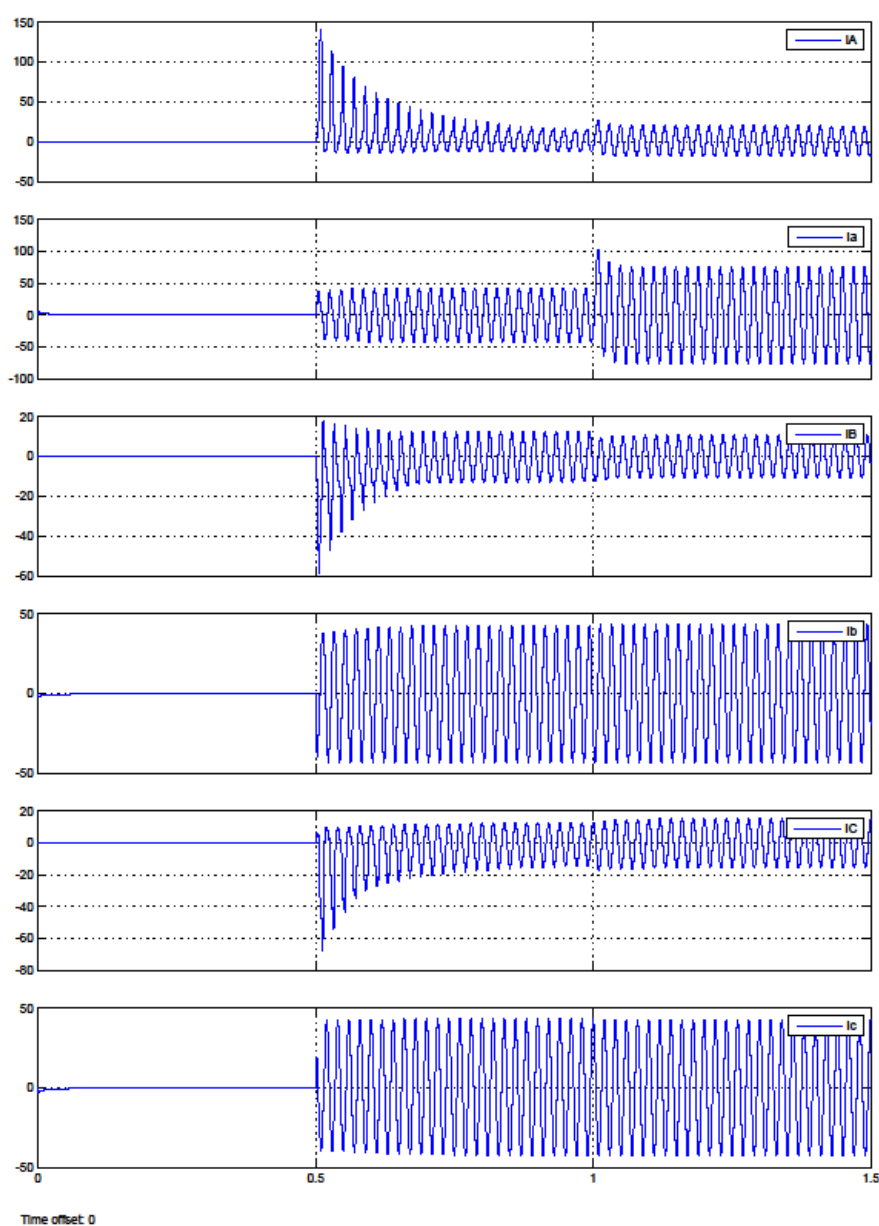


Fig. 5-34. Intensidades primarias y secundarias para falta externa con el transformador en carga.

La Fig. 7-28 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador. Puesto que está en carga, previamente a la falta a tierra las intensidades secundarias tienen un valor no despreciable. Al producirse la falta a tierra de la fase A aguas abajo del transformador las intensidades primaria y secundaria de dicha fase adquieren un valor elevado. No obstante, las intensidades diferenciales tienen un valor reducido, como se observa en la Fig. 7-29, a excepción de la intensidad diferencial de la fase afectada por la falta, diferencia debida a la saturación del transformador.

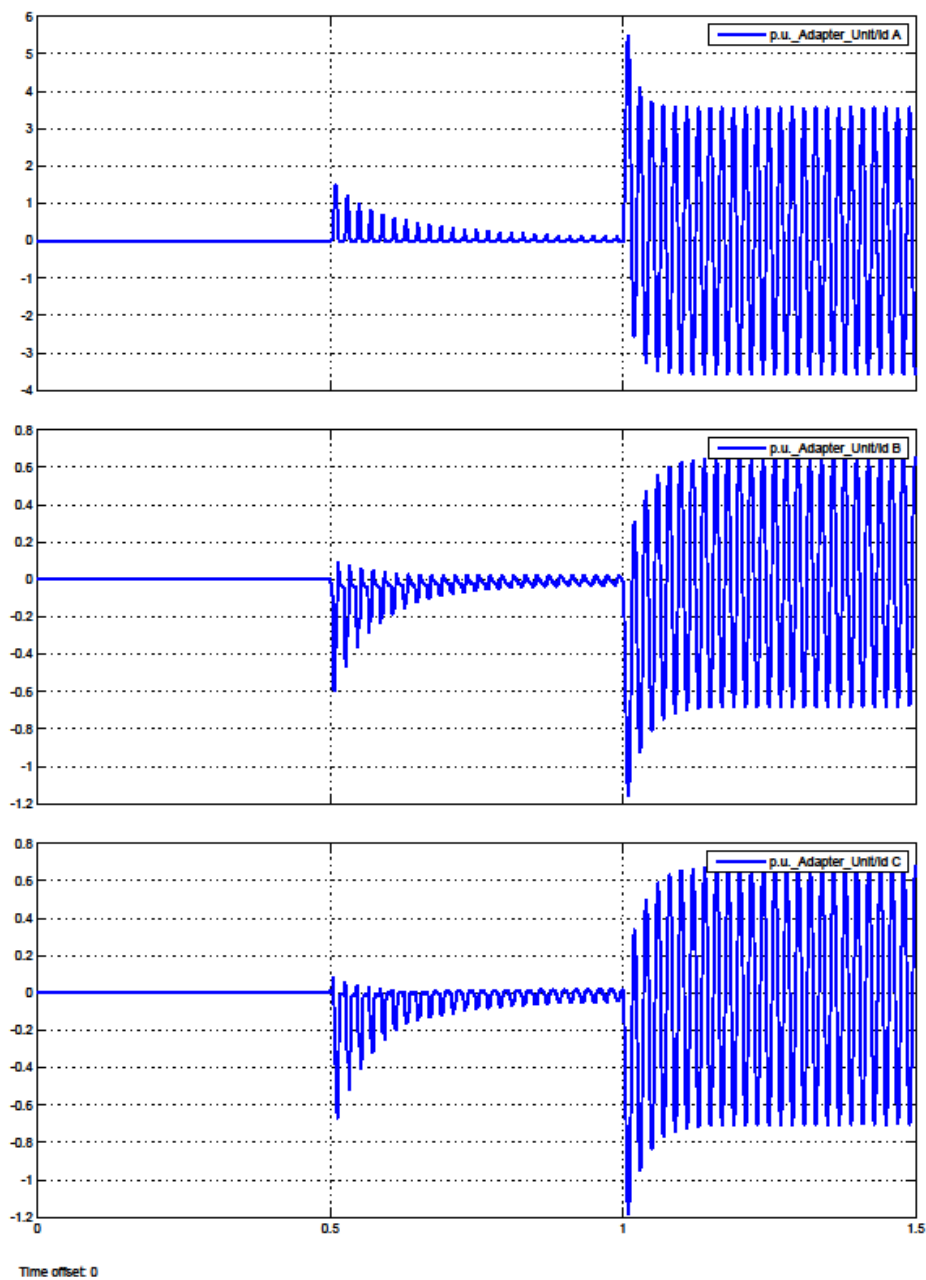


Fig. 5-35. Intensidades diferenciales para falta externa con el transformador en carga.

No obstante la unidad porcentual de la fase A no activa su disparador ya que aunque la intensidad diferencial es elevada, también lo es la intensidad circulante, por lo que al no superar la intensidad diferencial en un 20 % a la intensidad circulante, no se activa dicho disparador, y por ello tampoco se activa el disparador de su unidad DWT asociada. La Fig. 7-30 muestra la evolución de los disparadores del relé en este caso.

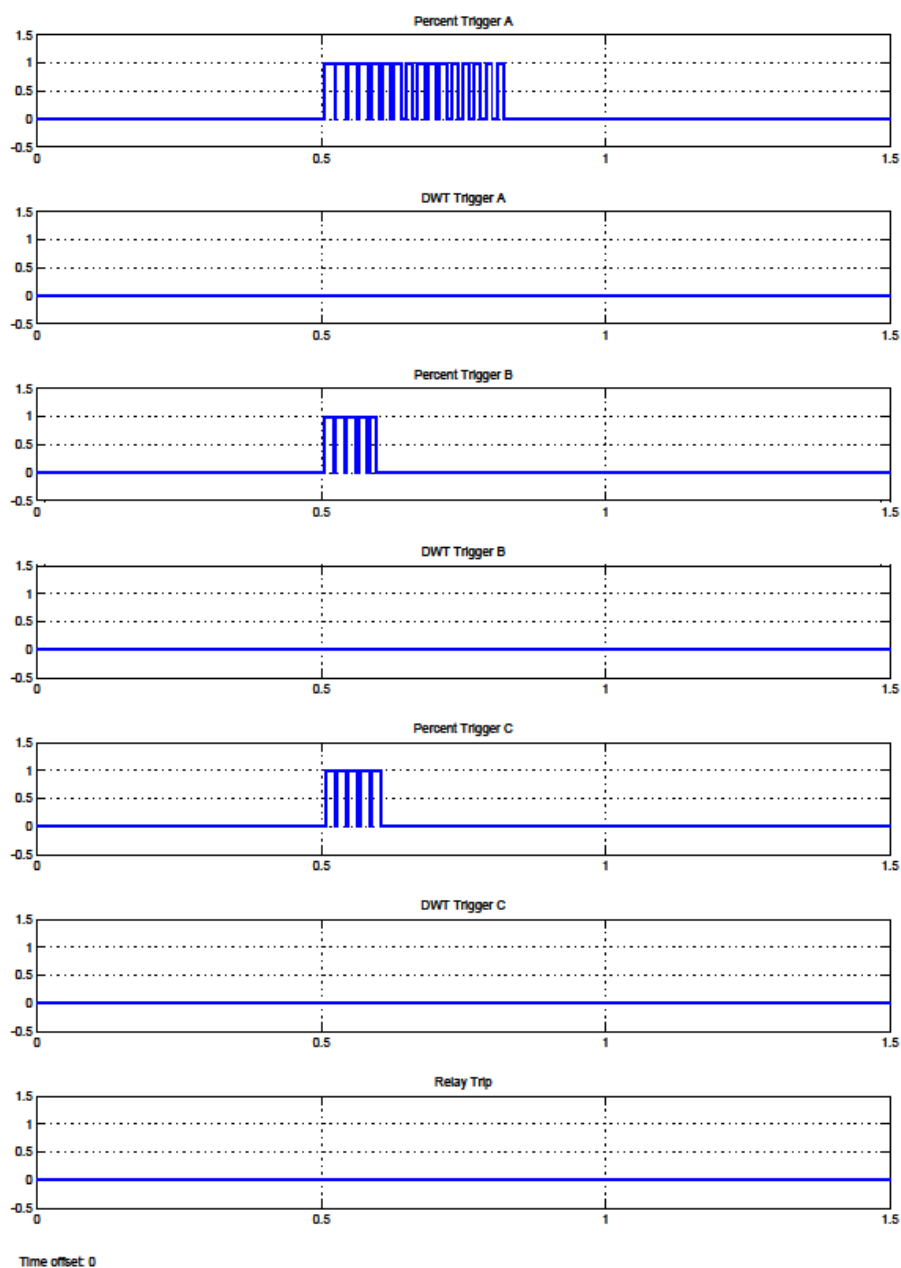


Fig. 5-36. Evolución de los disparadores para falta externa con el transformador en carga.

Se observa que no se activa ninguno de los disparadores de las unidades porcentuales y por tanto ninguno de los disparadores de las unidades DWT, lo que no activa el disparo del relé, siendo éste el funcionamiento esperado, ya que al igual que sucede en el caso anterior, una falta externa, si bien provoca la circulación de altas intensidades de falta a través de los devanados del transformador, no debe disparar el relé diferencial del transformador ya que esa misión correspondería a los relés de protección de la red externa en la que se produce la falta.

### **5.1.7. Comportamiento del relé con otros transformadores.**

Uno de los objetivos en la modelización del relé diferencial es que sirva para proteger a cualquier tipo de transformador de potencia trifásico, con independencia de sus características asignadas. Los casos de estudio llevados a cabo en los anteriores apartados se realizaron con un modelo de transformador de 225 kVA, 2.400/600 V, el modelo de transformador 1.

Para comprobar el correcto funcionamiento en los casos de estudio seleccionado se realizan las mismas simulaciones para dos tipos más de transformadores. Los resultados se muestran en los siguientes apartados.

#### **5.1.7.1. Casos de estudio con transformador 2.**

El transformador 2 es un modelo de transformador trifásico de columnas de 250 kVA, 25.000/420 V. El modelo utilizado es el mismo que para el transformador 1 corrigiendo los parámetros eléctricos y magnéticos de la máquina a ensayar.

Los casos de estudio que se realizan con este transformador son los mismos llevados a cabo con el transformador 1.

La Fig. 4-37 muestra las intensidades primarias y secundarias para el caso de la energización del transformador en vacío. Se observa que estas intensidades son similares a las que se presentan en el caso del transformador 1, aunque los valores de las amplitudes y los tiempos son diferentes.

La Fig. 4-38 muestra las intensidades diferenciales resultantes, que son similares a las que se presentan para el transformador 1.

Estas intensidades diferenciales tienen un alto valor inicial que hace que se activen los disparadores de los elementos porcentuales.



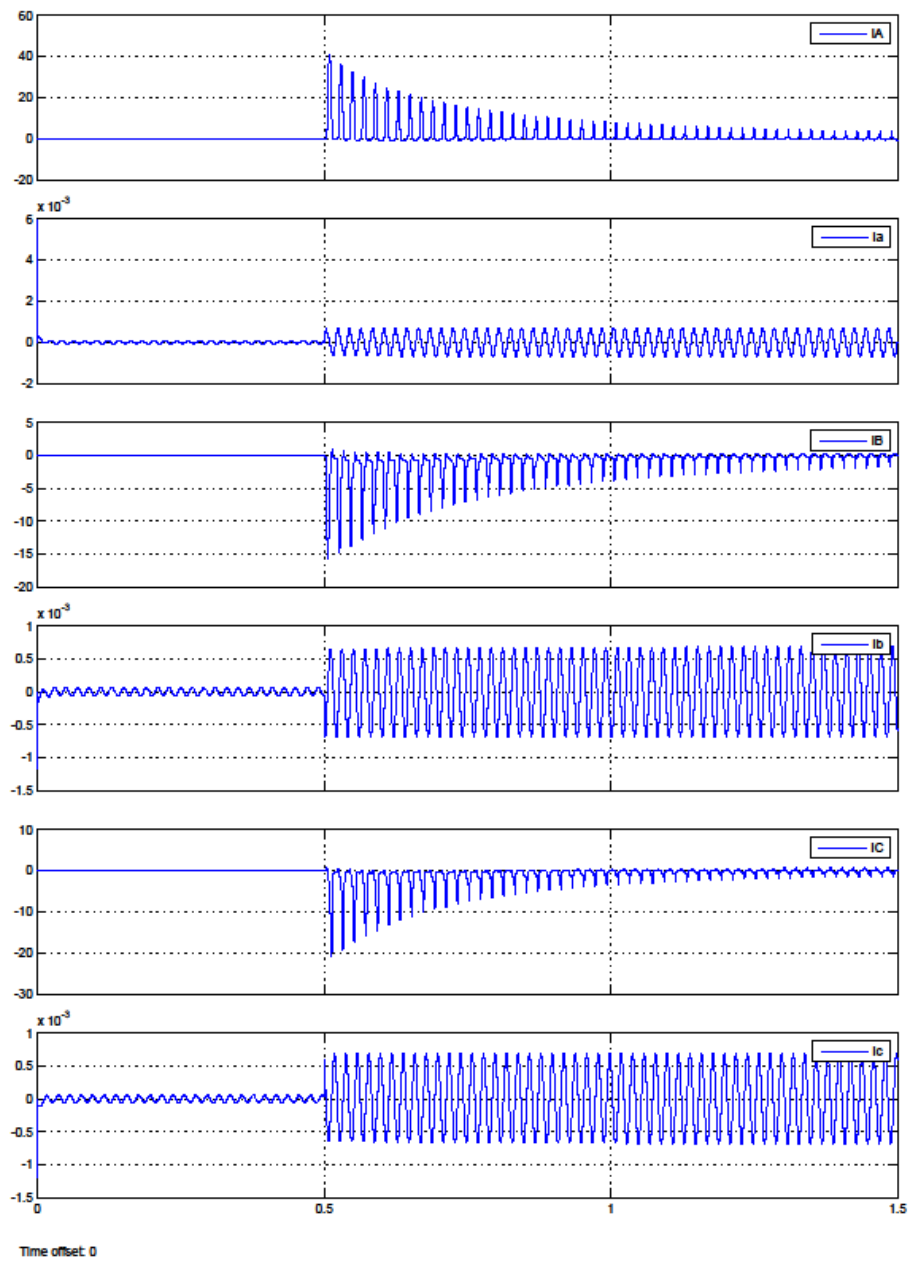


Fig. 5-37. Intensidades primarias y secundarias para energización en vacío del transformador 2.

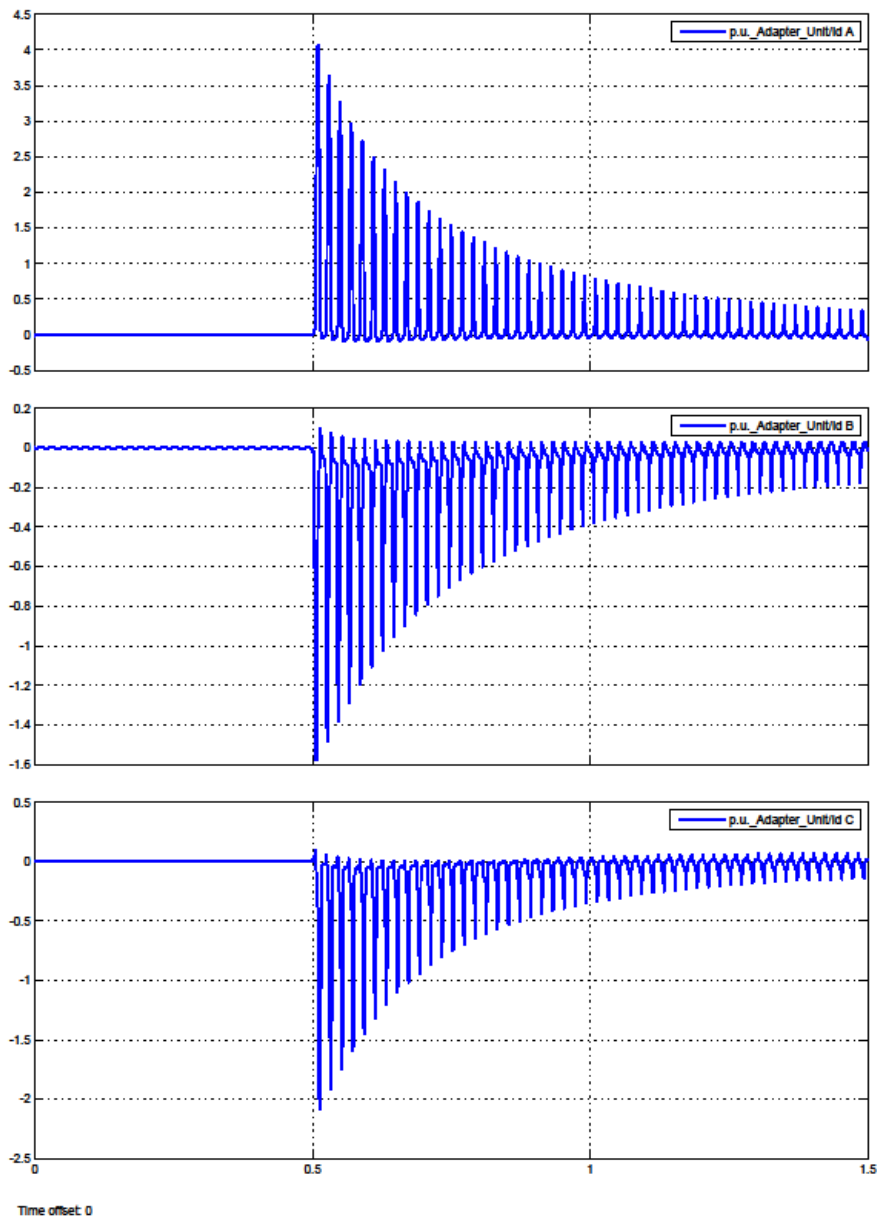


Fig. 5-38. Intensidades diferenciales para la energización en vacío del transformador 2.

La Fig. 4-39 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se comprueba que las elevadas intensidades diferenciales activan las correspondientes unidades porcentuales, pero al tratarse de una corriente de conexión no se activan los disparadores de las unidades DWT, y por tanto no actúa la protección como es lo esperado.

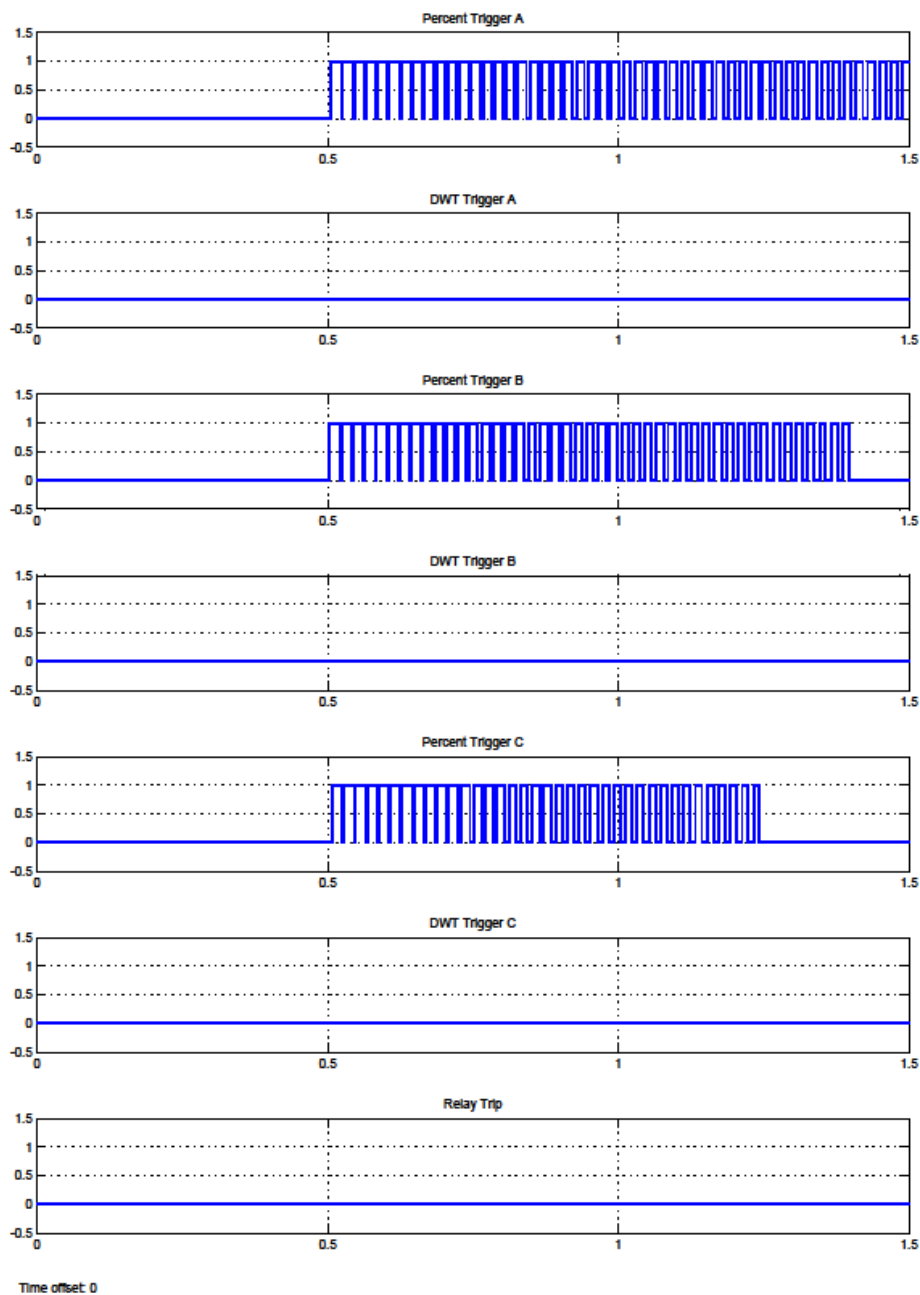


Fig. 5-39. Evolución de los disparadores para energización en vacío del transformador 2.

La Fig. 4-40 muestra las intensidades primarias y secundarias para el caso de energización en carga del transformador 2. En este caso se ha aumentado el tiempo de simulación a dos segundos debido a que el mayor tamaño del transformador 2 hace que las intensidades de conexión tengan unas constantes de tiempo mayores.

Las intensidades son las esperadas, con un alto valor inicial de las intensidades primarias debido a la energización del transformador y con un valor no despreciable de las intensidades secundarias debido a la carga que alimenta el transformador.

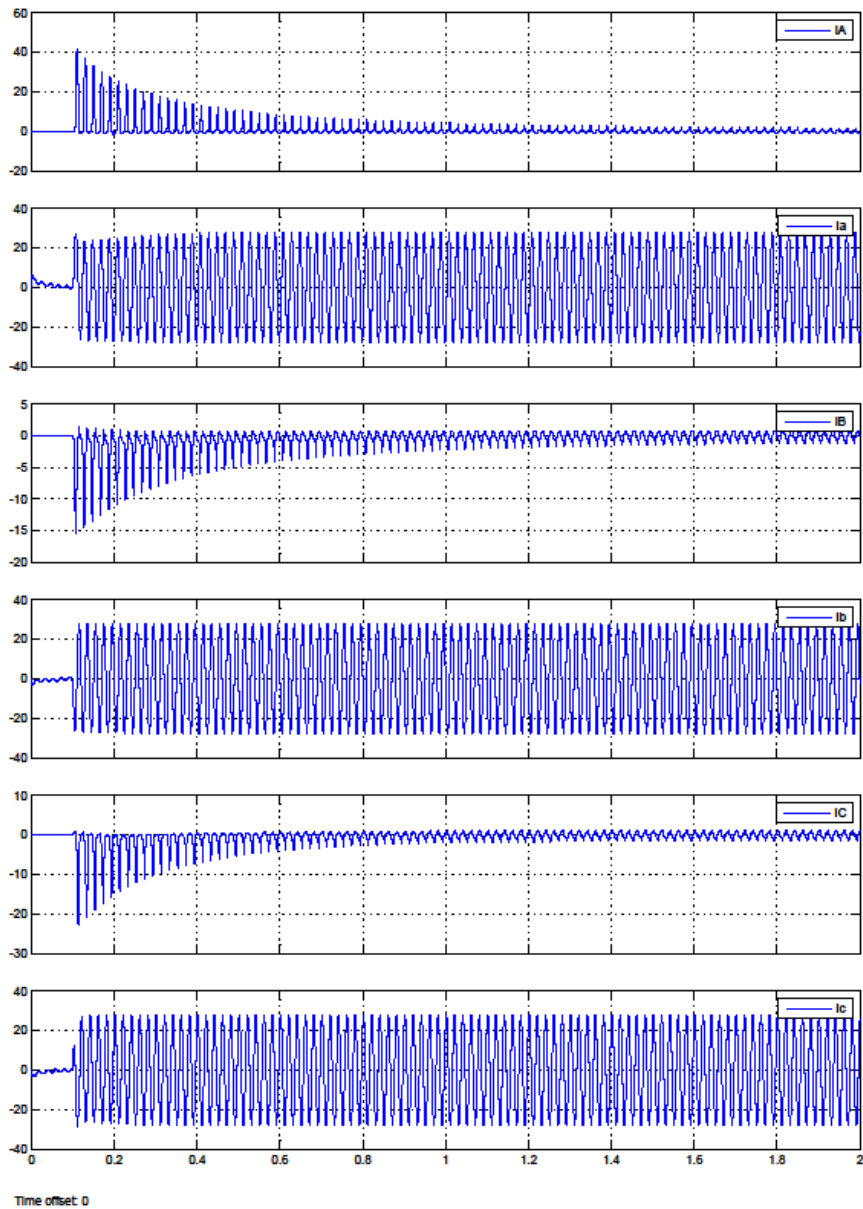


Fig. 5-40. Intensidades primarias y secundarias para la energización en carga del transformador 2.

Las elevadas intensidades primarias iniciales dan como resultado una elevada intensidad diferencial para cada una de las fases como se muestra en la Fig. 4-41. Esta situación da como resultado la activación de las unidades porcentuales del relé.

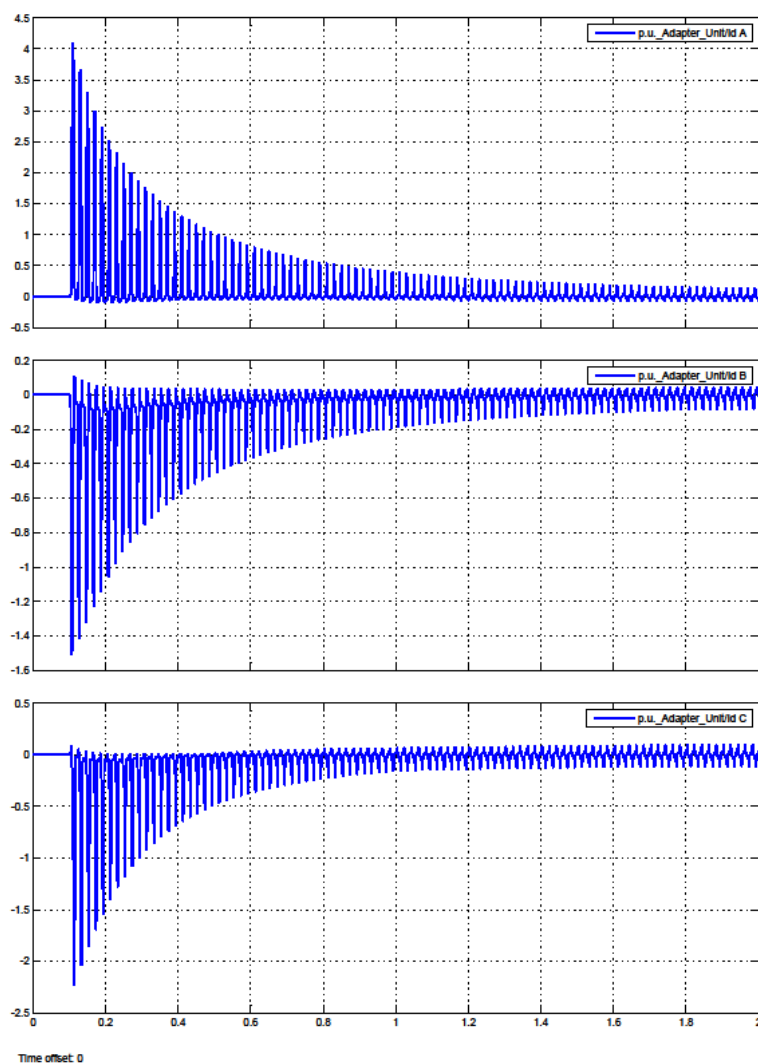


Fig. 5-41. Intensidades diferenciales para la energización en carga del transformador 2.

La Fig. 4-42 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Como era de esperar se activan los disparadores de las unidades porcentuales, pero las unidades DWT no activan sus disparadores pues se trata de una energización y no hay por qué disparar las protecciones del transformador.

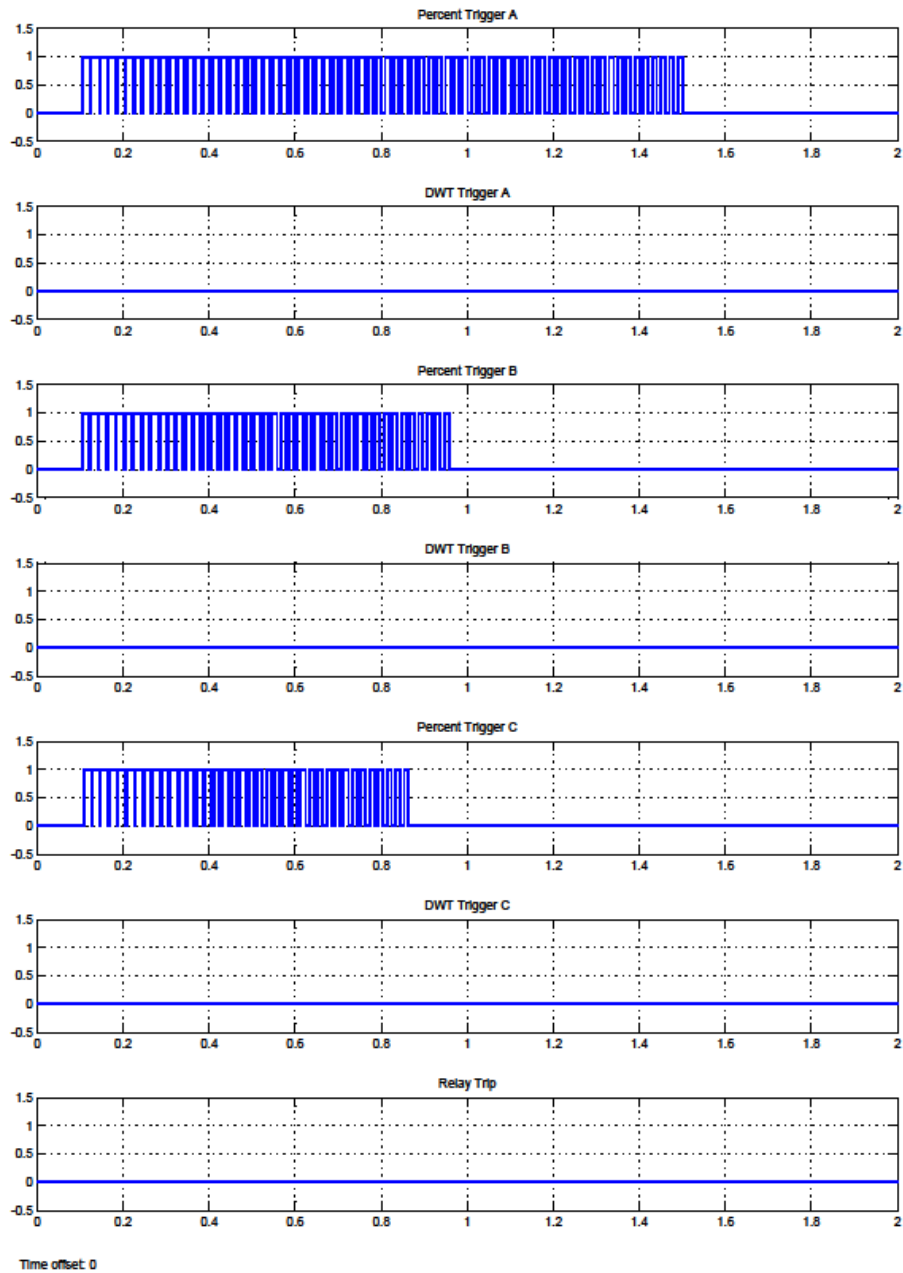


Fig. 5-42. Evolución de los disparadores para energización en carga del transformador 2.

Para el caso de falta interna del transformador se produce la falta interna a los dos segundos de iniciada la simulación, y la simulación se realiza para 2,5 segundos. Ello es debido a la mayor duración del transitorio de la intensidad de conexión para este transformador.

La Fig. 4-43 muestra las intensidades primarias y secundarias para este caso. Puede comprobarse el elevado valor de la intensidad de la fase A que es la afectada por la puesta a tierra. Este elevado valor es el responsable del elevado valor que tomará así mismo la intensidad diferencial de esta fase, así como el de las otras fases debido al desequilibrio

introducido por la falta a tierra. Por tanto se activarán los disparadores de las unidades porcentuales.

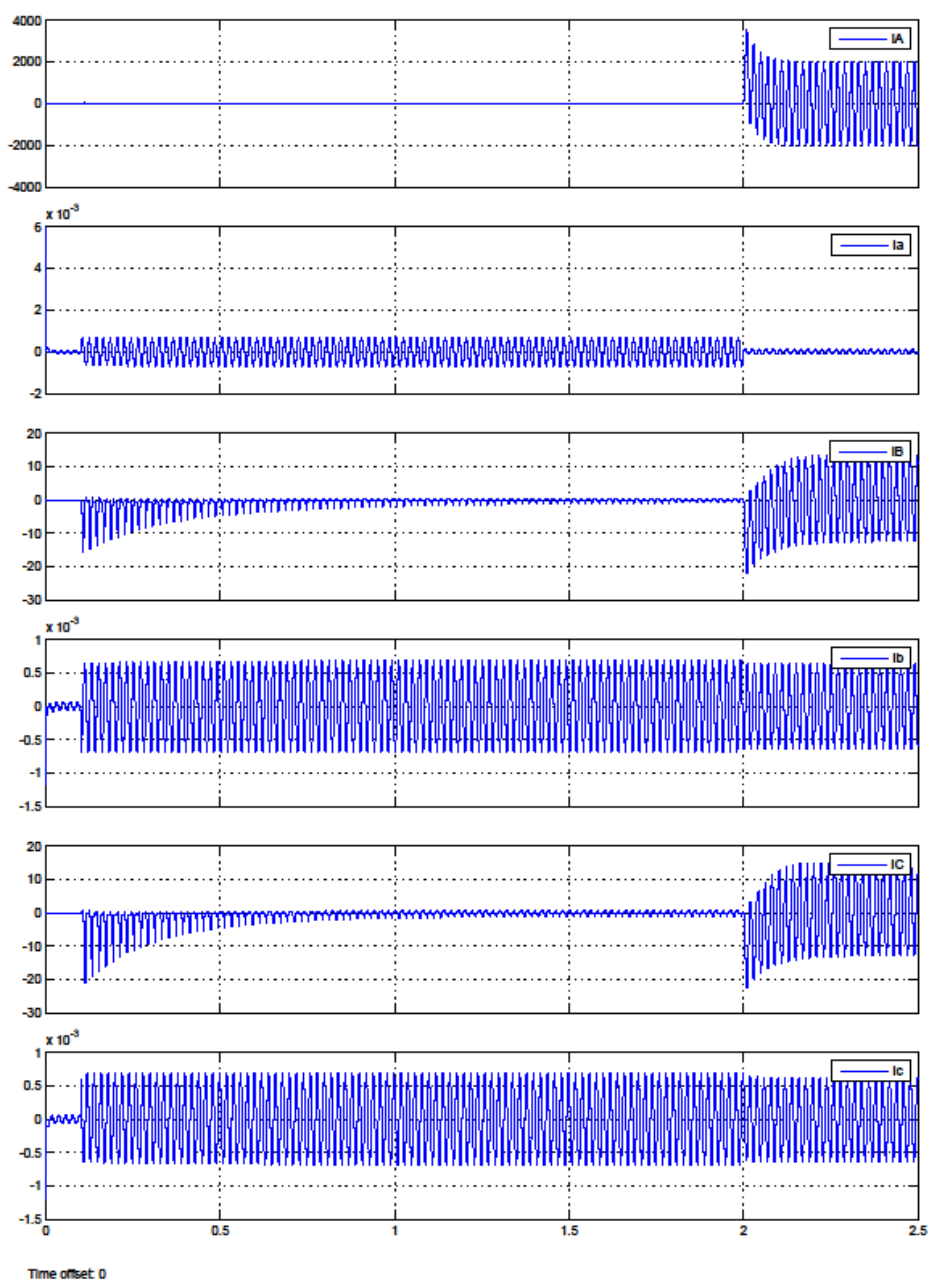


Fig. 5-43. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en vacío del transformador 2.

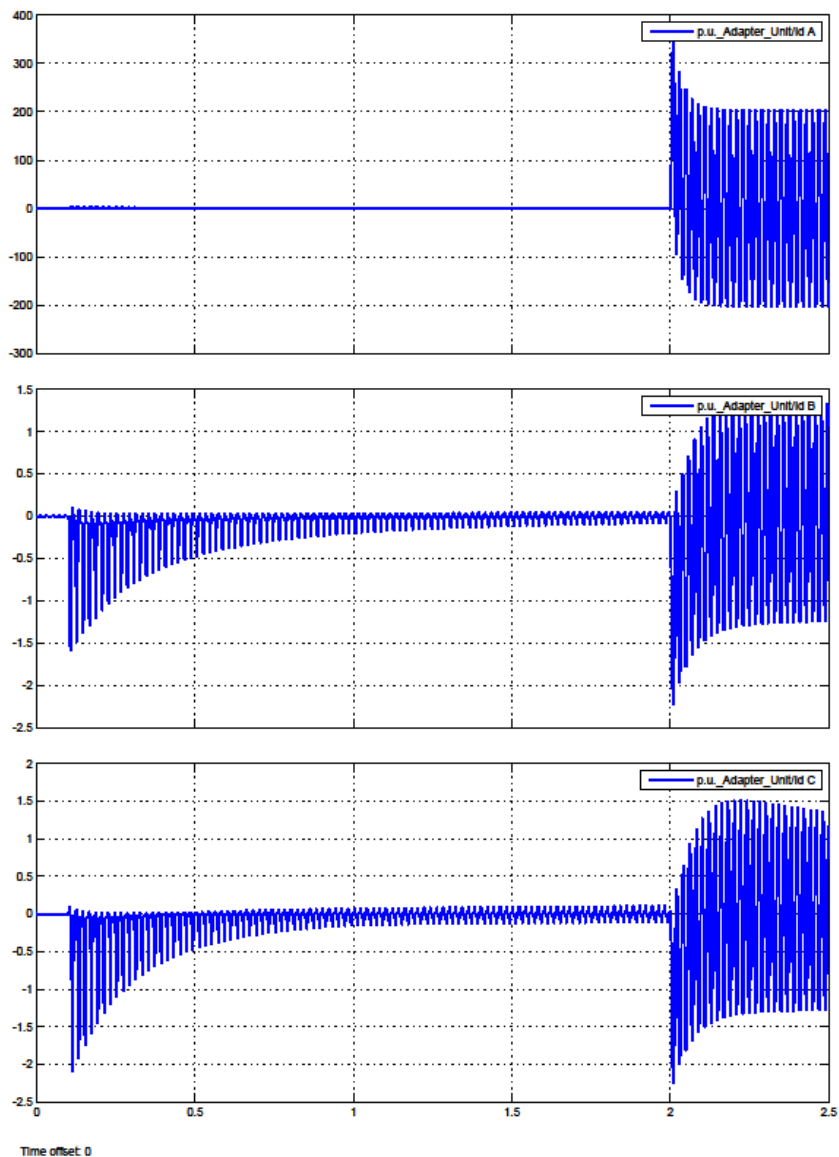


Fig. 5-44. Intensidades diferenciales para falta interna en vacío del transformador 2.

La Fig. 4-45 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. A los 100 ms de iniciada la simulación se produce la energización del transformador que como se ha visto no activa el disparo del relé. A los 2 segundos de iniciada la simulación se produce una falta interna a tierra del a fase A y las elevadas intensidades diferenciales activan los disparadores de las unidades porcentuales, y puesto que se trata de una falta interna, las unidades DWT activan sus disparadores produciéndose el disparo del relé diferencial.



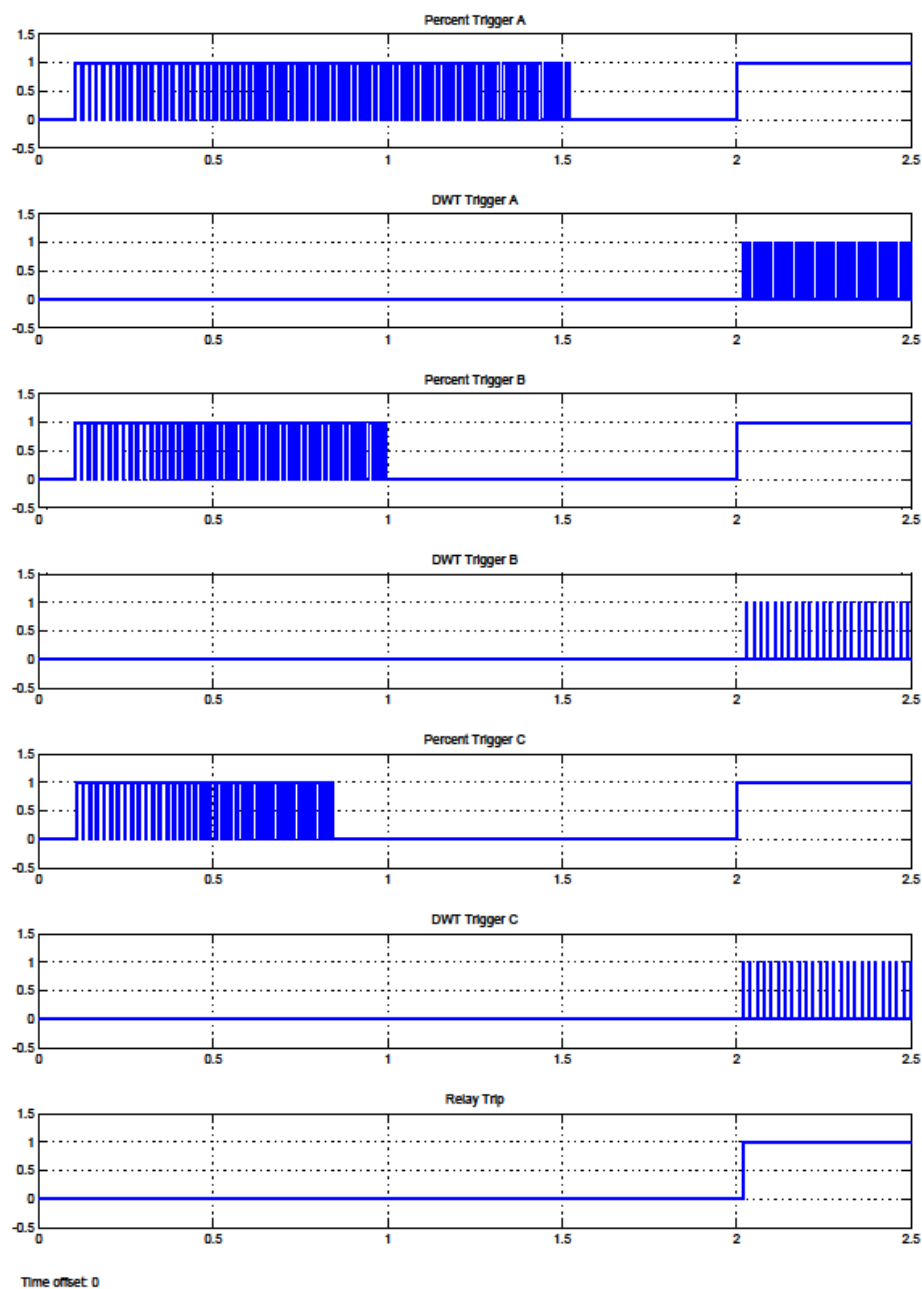


Fig. 5-45. Evolución de los disparadores para falta interna en vacío para el transformador 2.

La Fig. 4-46 muestra el detalle de los tiempos de activación de los diferentes disparadores. Como se puede comprobar, la activación del disparo del relé se produce a los 20 ms de iniciada la falta, tal y como sucede en la falta interna para el transformador 1. Es el resultado esperado, pues una falta interna es una situación de funcionamiento no deseable para el transformador.

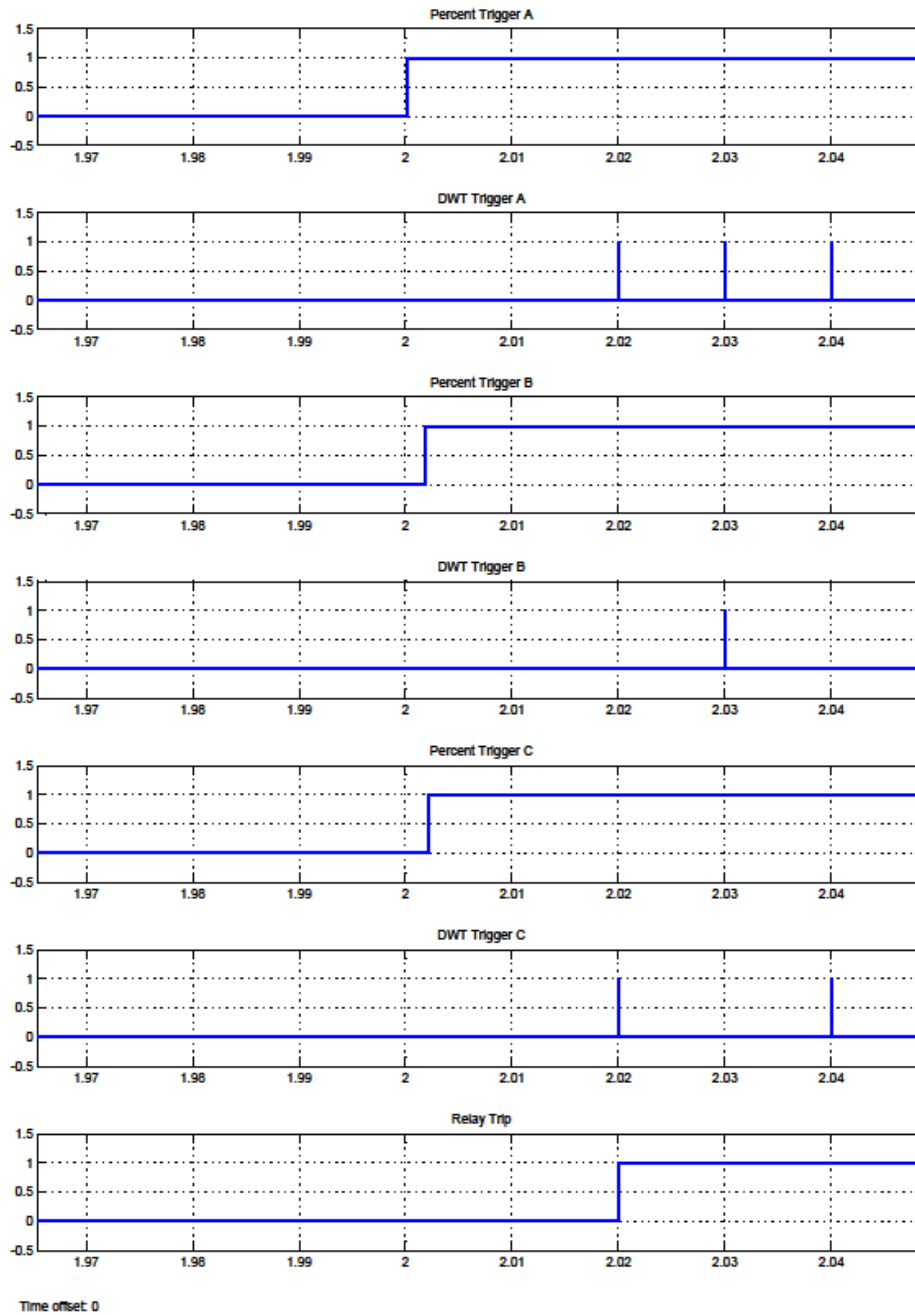


Fig. 5-46. Detalle del tiempo de activación de los disparadores para falta interna en vacío del transformador 2.

La Fig. 4-47 muestra las intensidades primarias y secundarias para falta interna del transformador 2 en carga. El elevado valor de la intensidad primaria de la fase afectada por la falta tiene como consecuencia inmediata un elevado valor de la intensidad diferencial de esa fase y de las otras fases también debido al desequilibrio introducido por la falta.

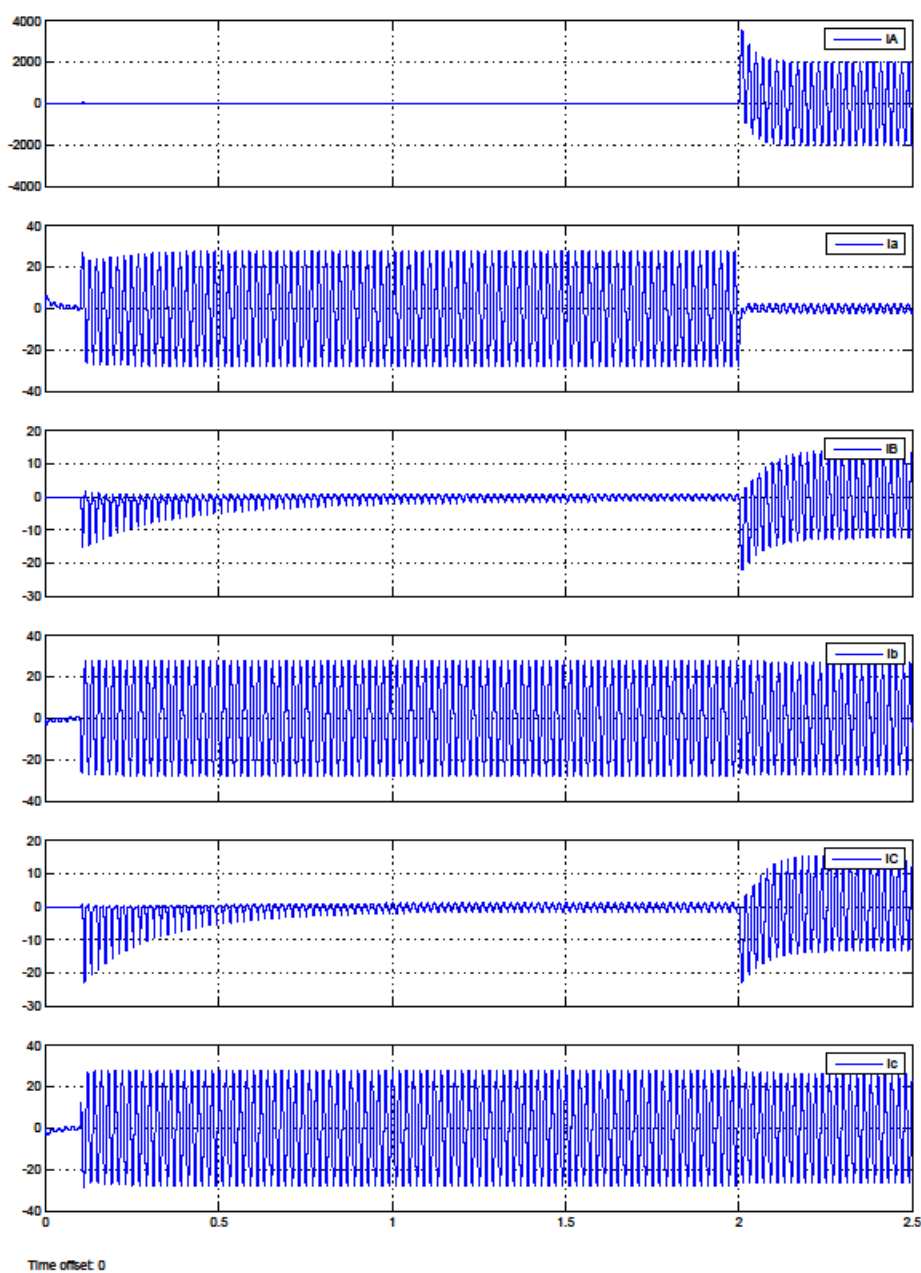


Fig. 5-47. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en carga para el transformador 2.

La Fig. 4-48 muestra la evolución de estas intensidades diferenciales. Se comprueba el elevado valor que presentan al inicio de la falta, lo que tiene como consecuencia la activación de los disparadores de las unidades porcentuales del relé.

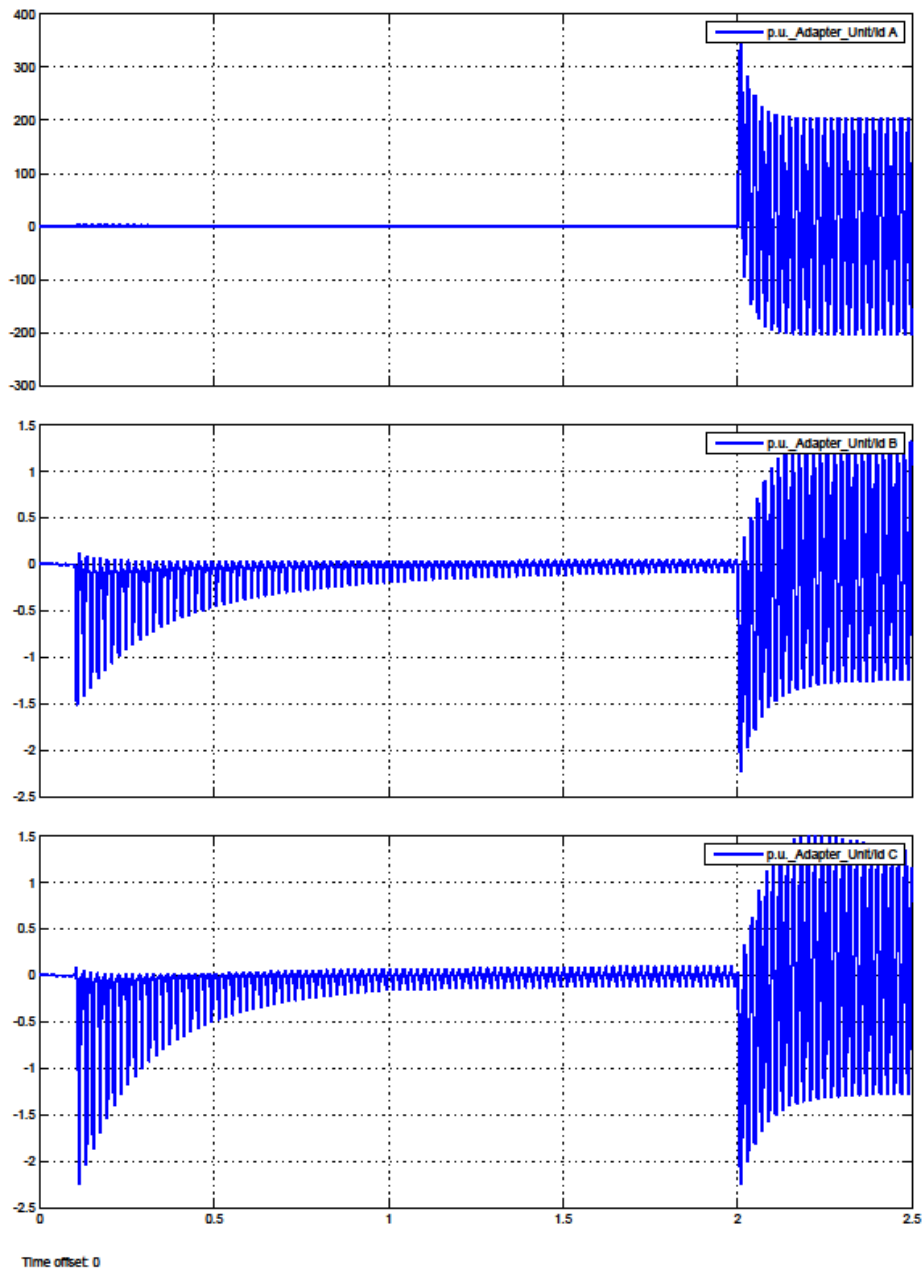


Fig. 5-48. Intensidades diferenciales para falta interna en carga del transformador 2.

En la Fig. 4-49 se puede comprobar la evolución de los disparadores del relé para este caso. Además de la energización previa, a los dos segundos de iniciada la simulación se produce la falta interna y las elevadas corrientes diferenciales activan los disparadores de las unidades porcentuales que a su vez habilitan a las unidades DWT para activar sus disparadores pues se trata de una falta interna. La activación de los disparadores de las unidades DWT activa el disparo del relé, siendo la actuación esperada del relé ante una falta interna.

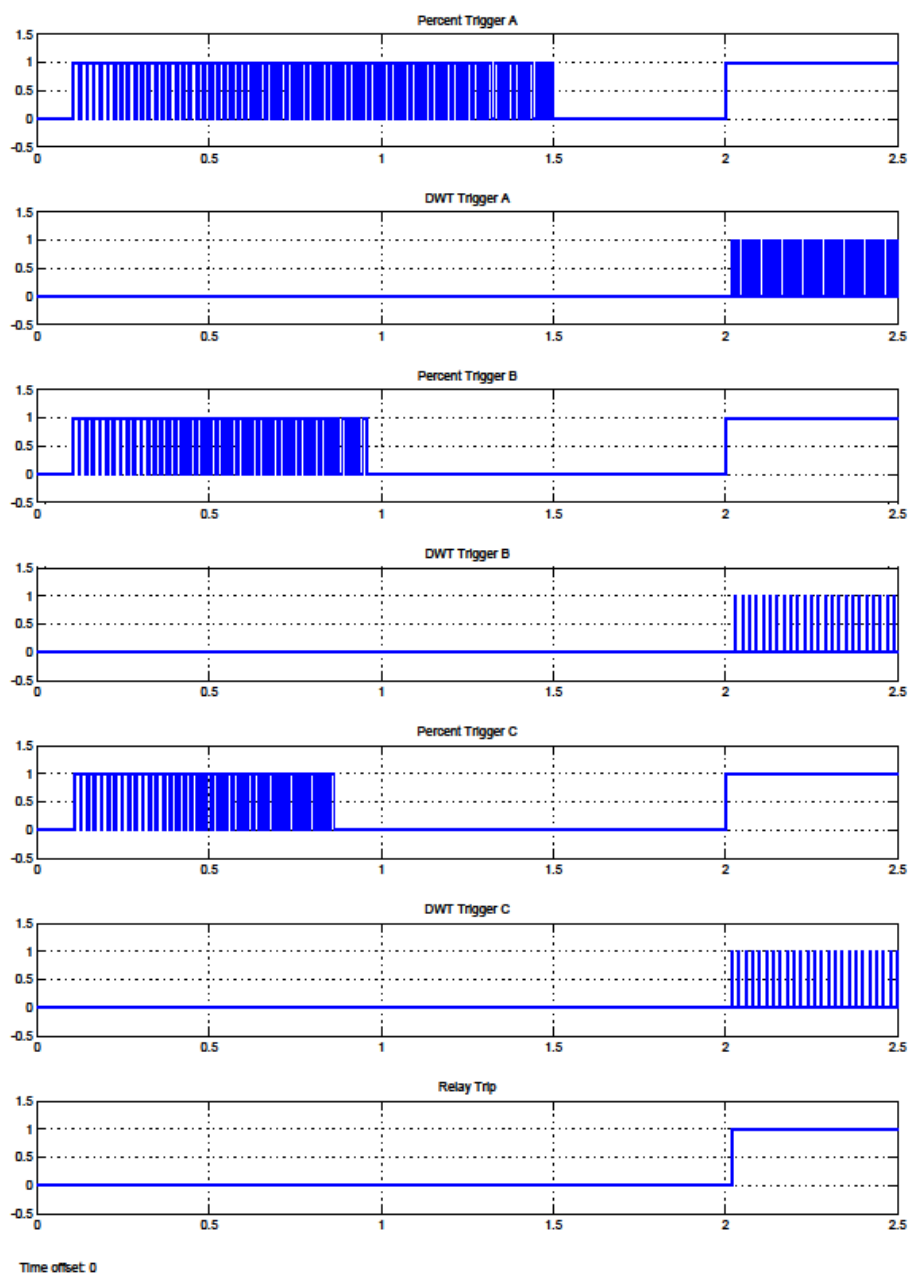


Fig. 5-49. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2.

La Fig. 4-50 muestra el detalle de los tiempos de activación de los disparadores para este caso. Se comprueba que como en todos los casos de falta interna el relé activa su disparo a los 20 ms de iniciada la falta.

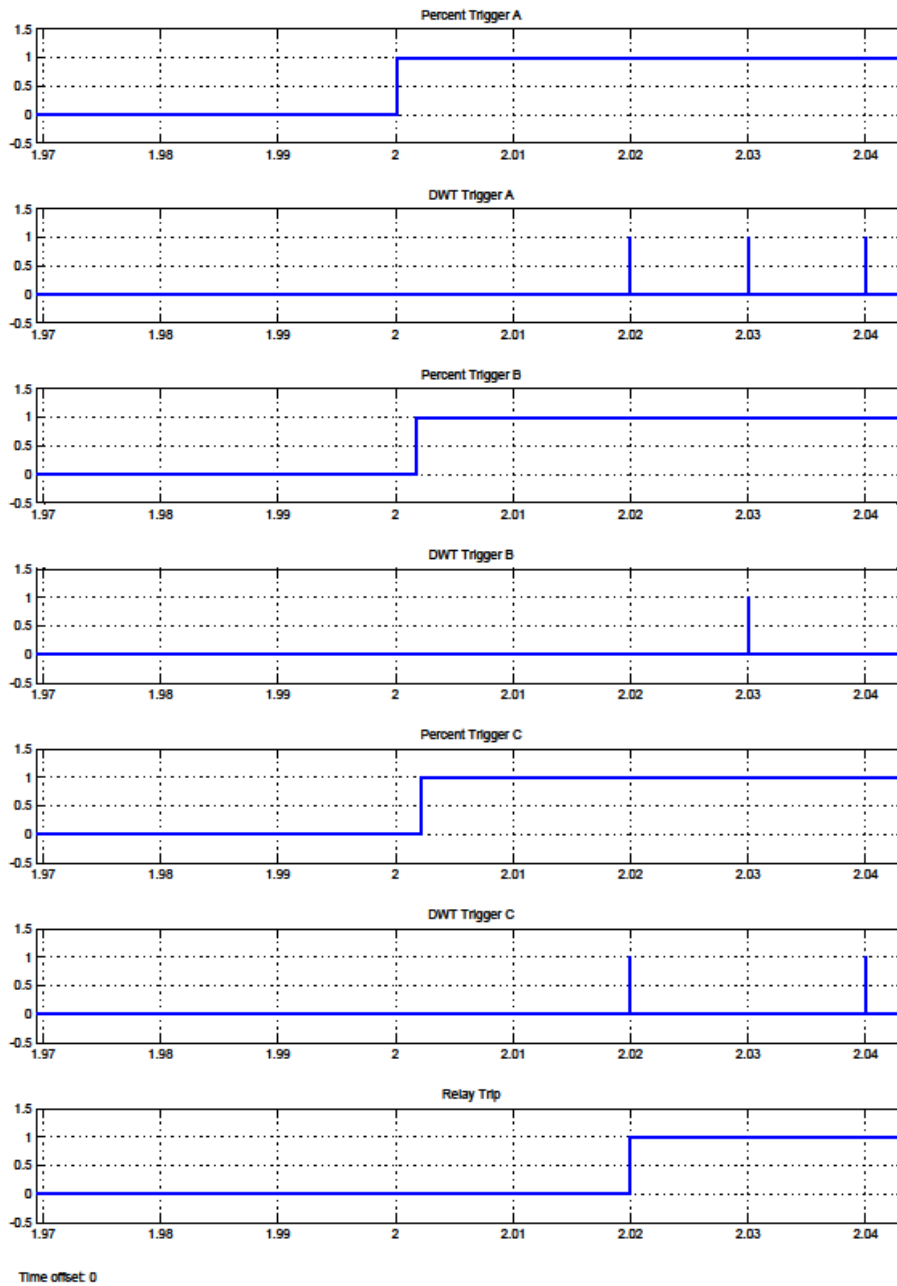


Fig. 5-50. Detalle del tiempo de activación de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2.

La Fig. 4-51 muestra las intensidades primarias y secundarias para el caso de falta externa en carga del transformador 2. Se observa que a partir de la falta externa a tierra de la fase A que sucede a los 2 segundos de iniciada la simulación se produce una intensidad de cortocircuito en la fase afectada tanto en la intensidad primaria como en la secundaria. Por tanto al intensidad diferencial resultante será de reducido valor.

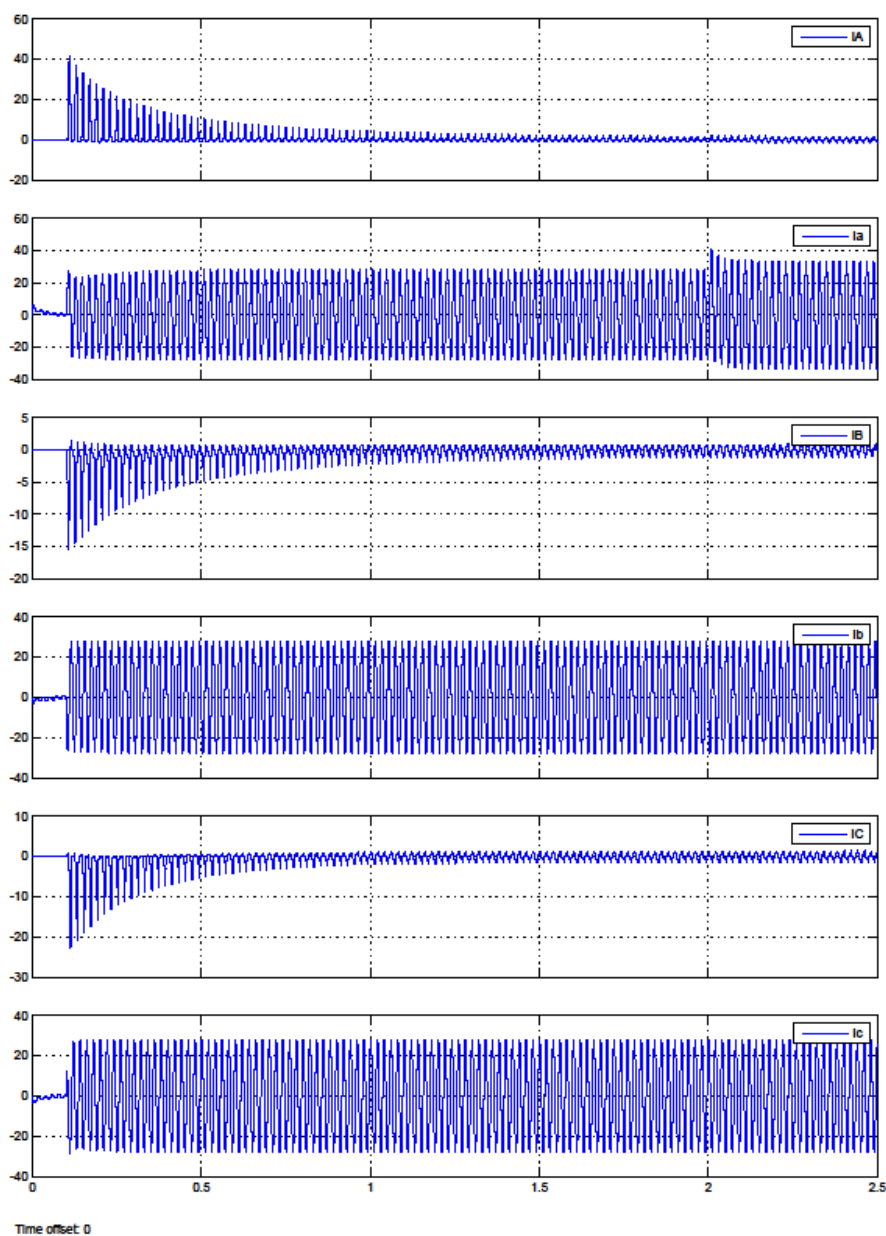


Fig. 5-51. Intensidades primarias y secundarias para falta externa en carga para el transformador 2.

La Fig. 4-52 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se comprueba el bajo valor de las mismas para el instante en el que se produce la falta, y como consecuencia de ello no se activan los disparadores de las unidades porcentuales.

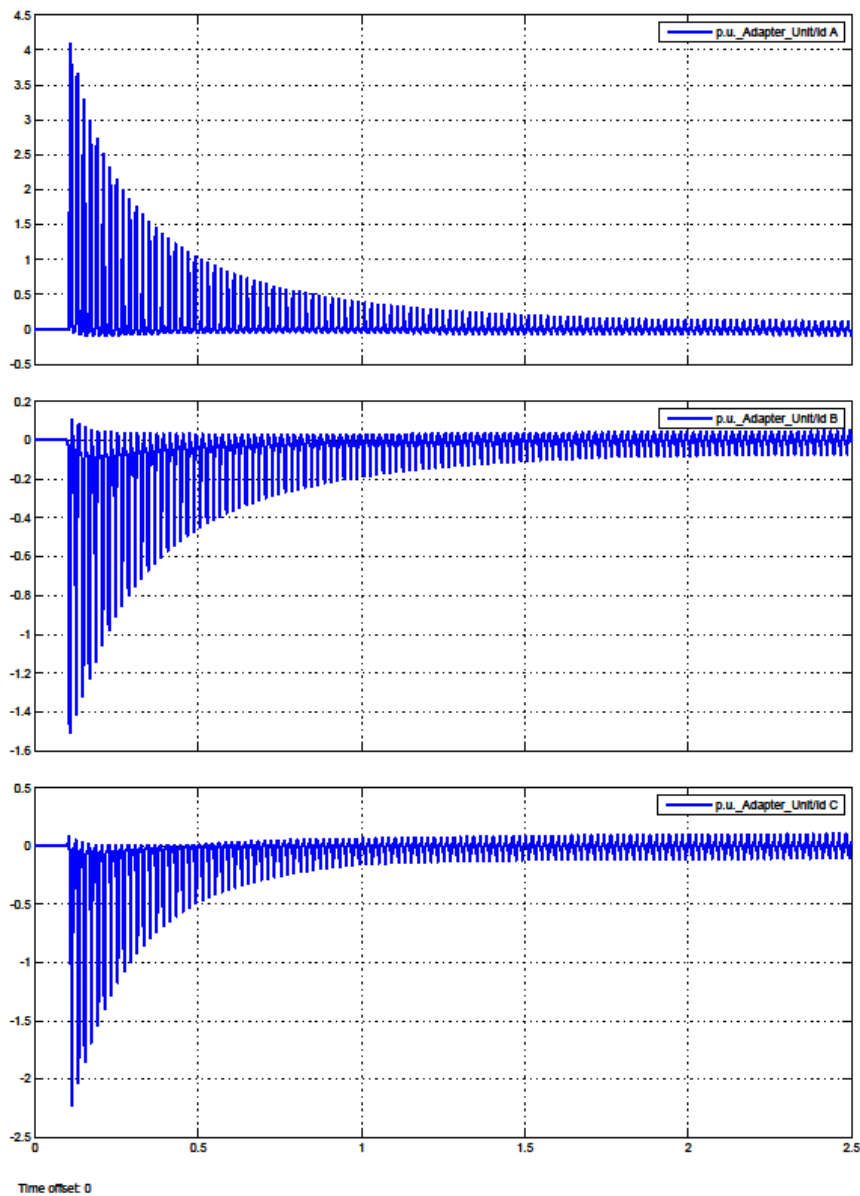


Fig. 5-52. Intensidades diferenciales para falta externa en carga del transformador 2.

La Fig. 4-53 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se comprueba que como consecuencia del bajo valor de las intensidades diferenciales no se activan los disparadores de las unidades porcentuales y por tanto tampoco los disparadores de las unidades DWT ni el disparador del relé, siendo el comportamiento del relé el esperado para esta situación.



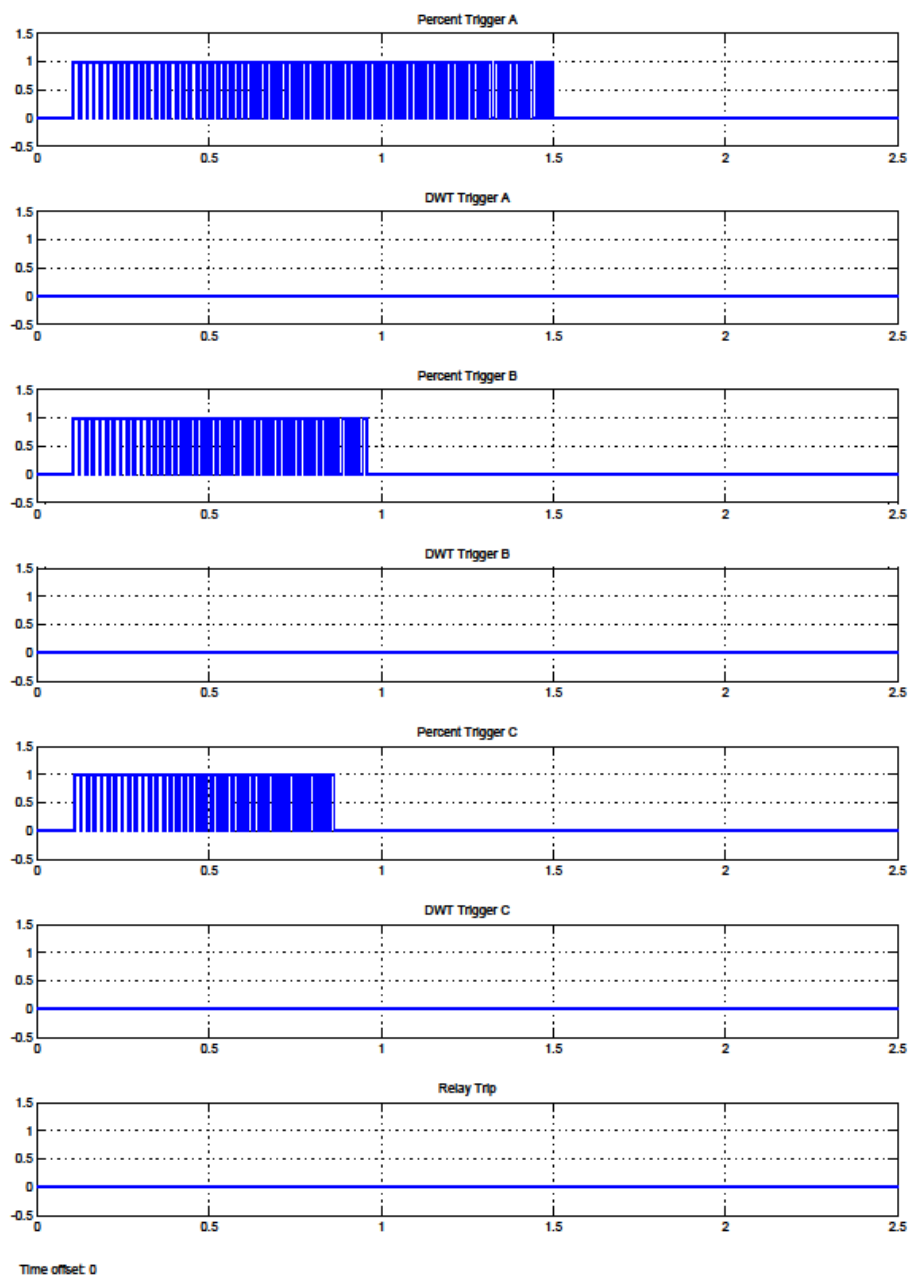


Fig. 5-53. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 2.

### 5.1.7.2. Casos de estudio con transformador 3.

Como se expuso en el apartado 4.1.7.1 para comprobar el correcto comportamiento del relé para diferentes tipos de transformadores a proteger, se van a realizar los casos de estudio aplicados a los dos transformadores anteriores a un nuevo transformador. El

transformador 3 es un modelo de transformador trifásico como los modelados en los apartados anteriores con una potencia de 100 MVA, 132.000/20.000 V.

La Fig. 4-54 muestra las intensidades primarias y secundarias en el caso de energización en vacío del transformador 3. Puesto que se trata de un transformador de gran tamaño la duración del transitorio de conexión del transformador es más elevado que para el caso de transformadores de menor tamaño. Por ello se han extendido los tiempos de simulación, comenzando la conexión del transformador a la red a los 100 ms de iniciada la simulación y se extiende hasta los 4 segundos desde el inicio de la simulación.

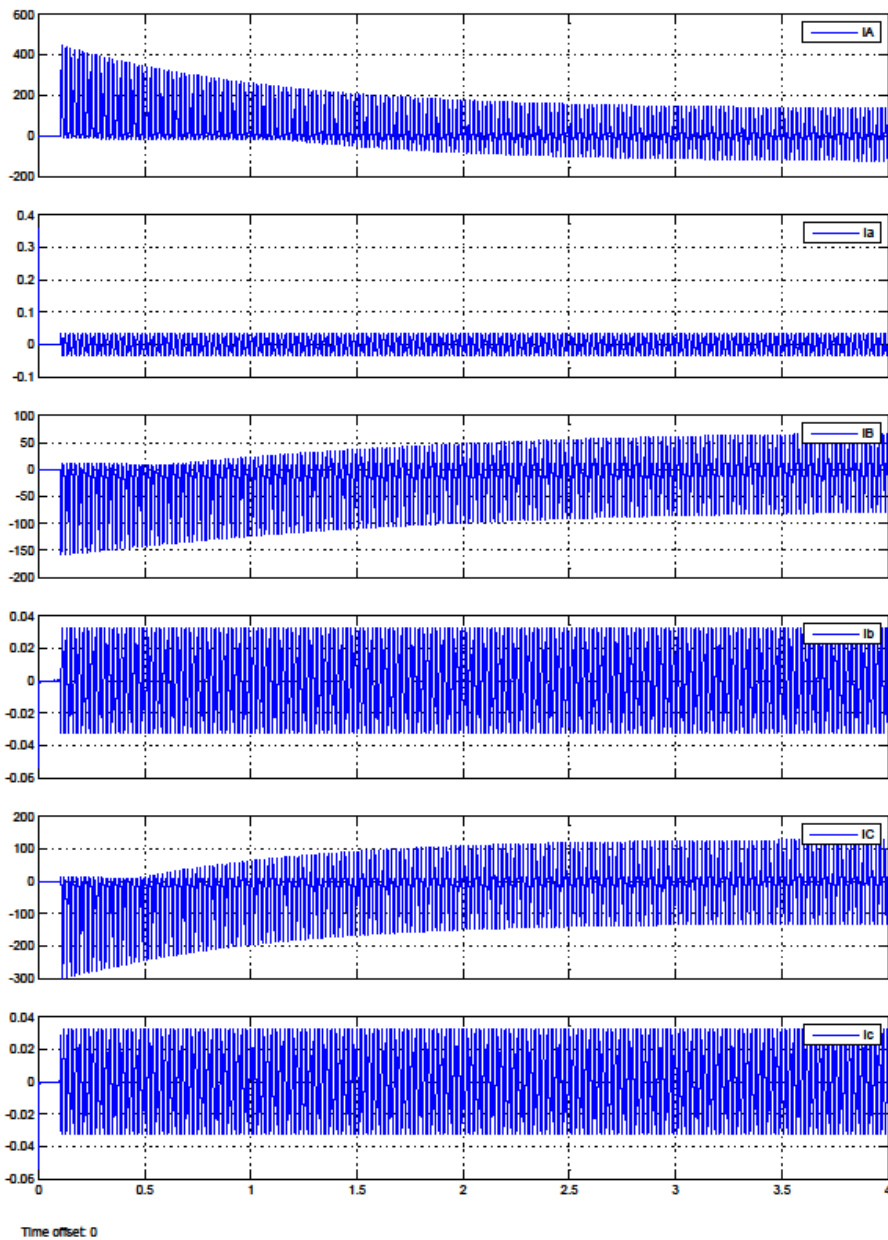


Fig. 5-54. Intensidades primarias y secundarias para energización en vacío del transformador 3.

La Fig. 4-55 muestra las intensidades diferenciales para energización en vacío del transformador. Debido a la elección del tiempo de simulación no se distinguen a simple vista los diferentes ciclos de la señal, pero desde el punto de vista de las unidades porcentuales que analizan la magnitud de la señal, la envolvente de la señal proporciona información que permite comprobar que el elevado valor inicial de las intensidades diferenciales activarán los correspondientes disparadores de las unidades porcentuales.

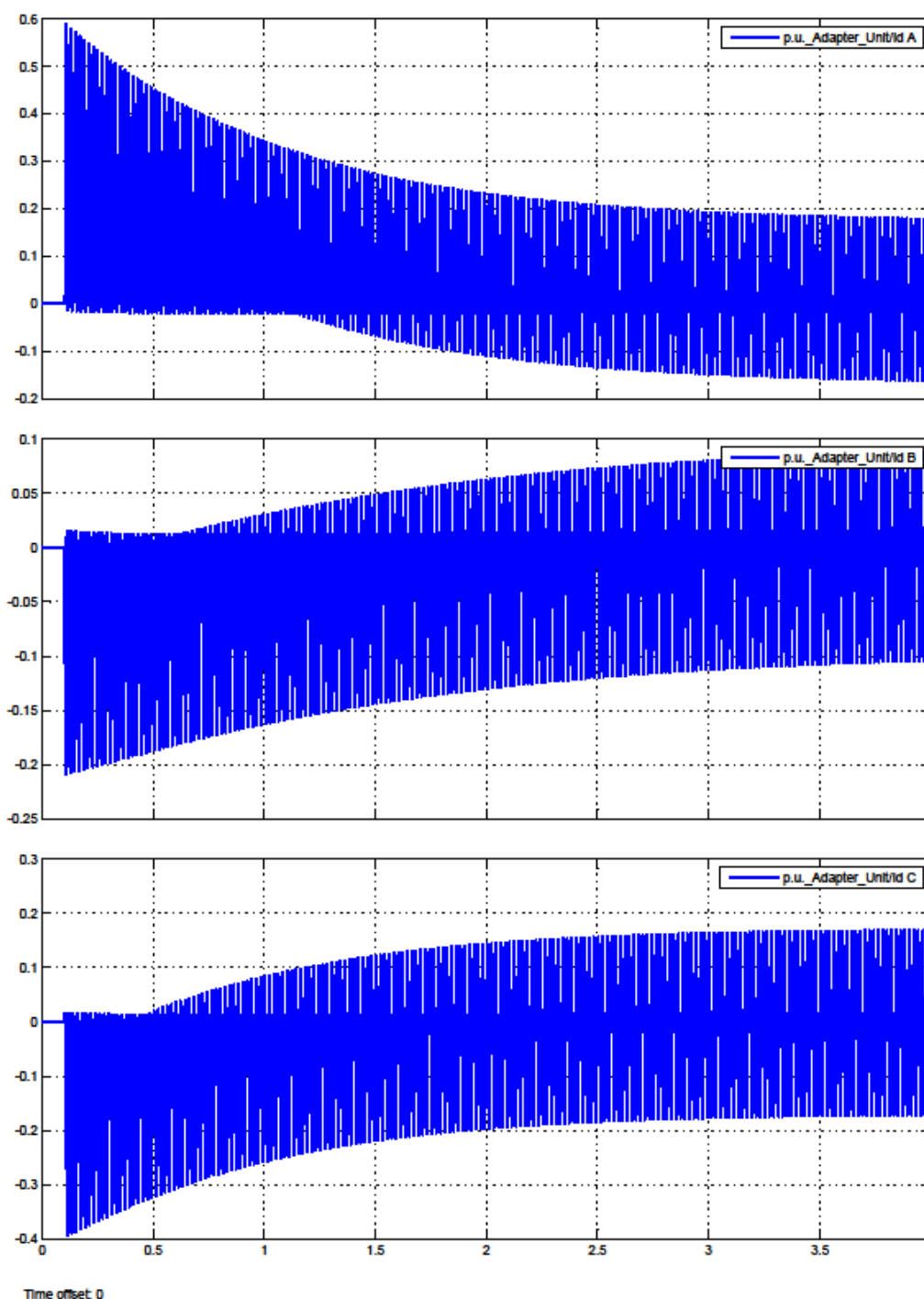


Fig. 5-55. Intensidades diferenciales para energización en vacío del transformador 3.

La Fig. 4-56 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. La elevada duración del transitorio de conexión activa los disparadores de las unidades porcentuales un tiempo relativamente largo, pero al tratarse de intensidades de conexión no se activan los disparadores de las unidades DWT, lo que tiene como consecuencia que no se active el disparo del relé, actuación que es la correcta en este caso.

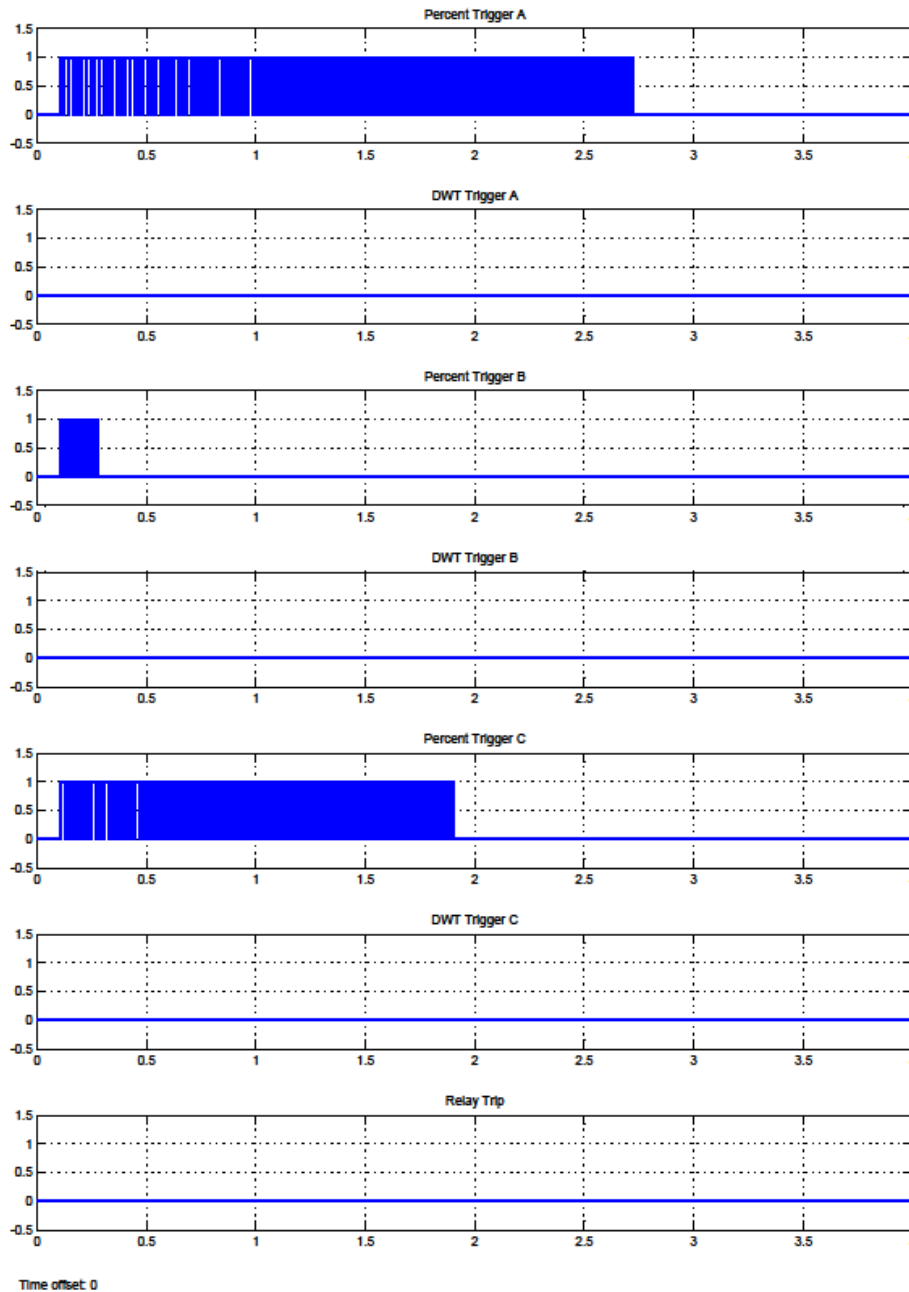


Fig. 5-56. Evolución de los disparadores para energización en vacío del transformador 3.

La Fig. 4-57 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador 3 en el caso de energización en carga. Como sucede en el caso anterior el relativamente elevado

tiempo de simulación comprime las señales de las intensidades, pero desde el punto de vista del funcionamiento de las unidades porcentuales interesa evaluar la envolvente de las señales.

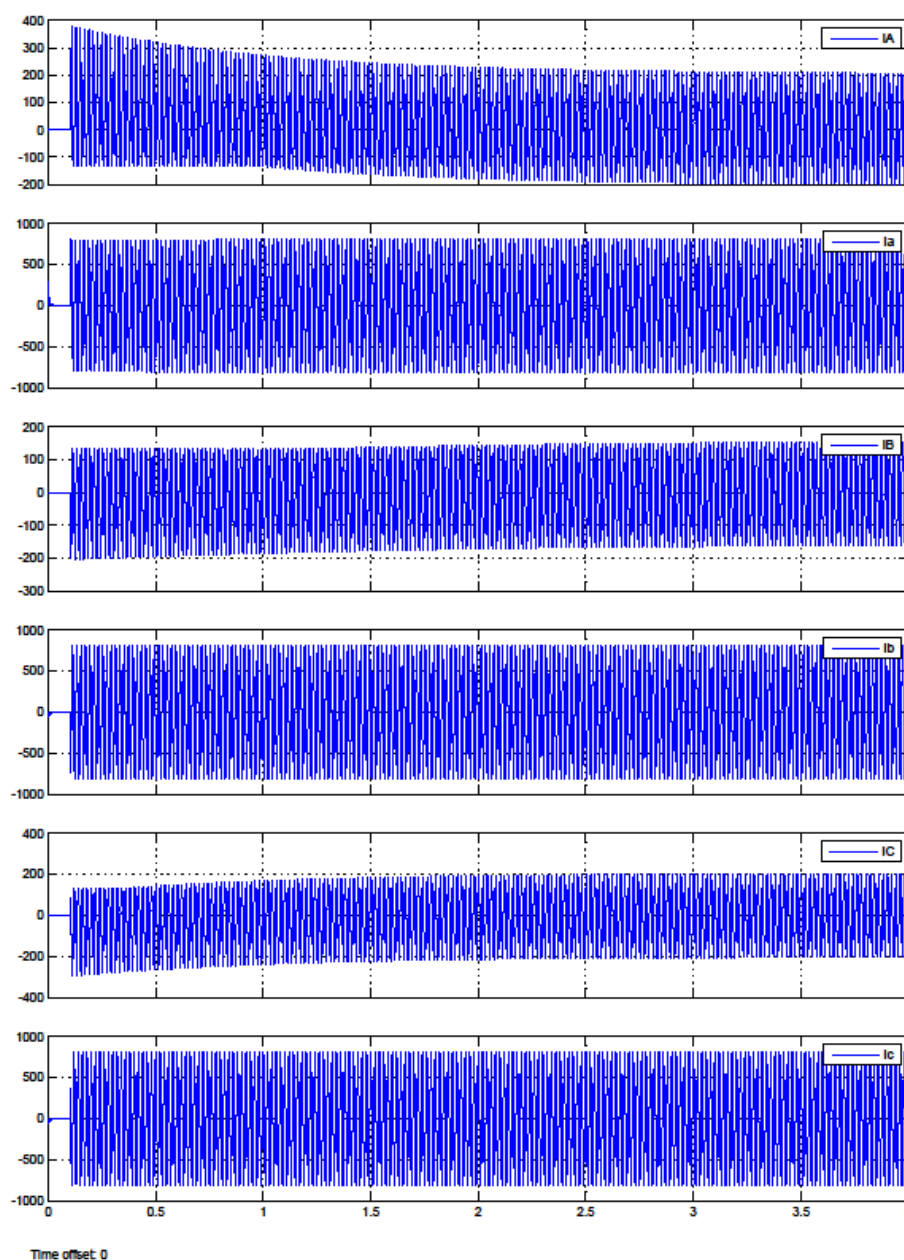


Fig. 5-57. Intensidades primarias y secundarias para energización en carga del transformador 3.

La Fig. 4-58 muestra las intensidades diferenciales para este caso. El valor inicial de las mismas es elevado puesto que lo es la intensidad de conexión primaria, por lo que a pesar de existir una intensidad secundaria no despreciable debida a la carga conectada al transformador la intensidad diferencial es elevada al inicio de la conexión del transformador. Esta situación hace que se activen los disparadores de las unidades porcentuales.

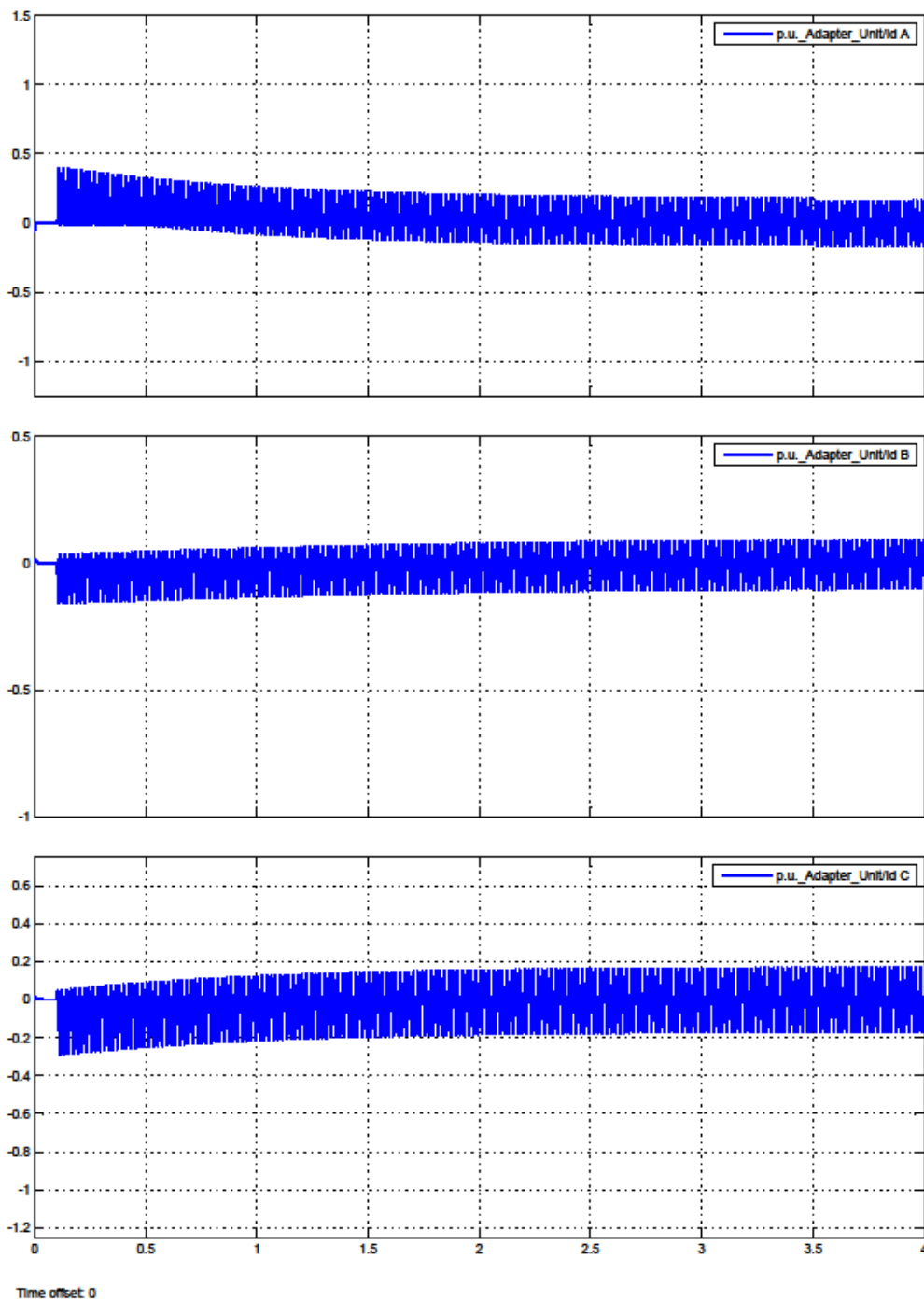


Fig. 5-58. Intensidades diferenciales para energización en carga del transformador 3.

La Fig. 4-59 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se comprueba la activación de los disparadores de las unidades porcentuales pero no los de las unidades DWT, comportamiento correcto del relé pues no se activa el disparo del relé.

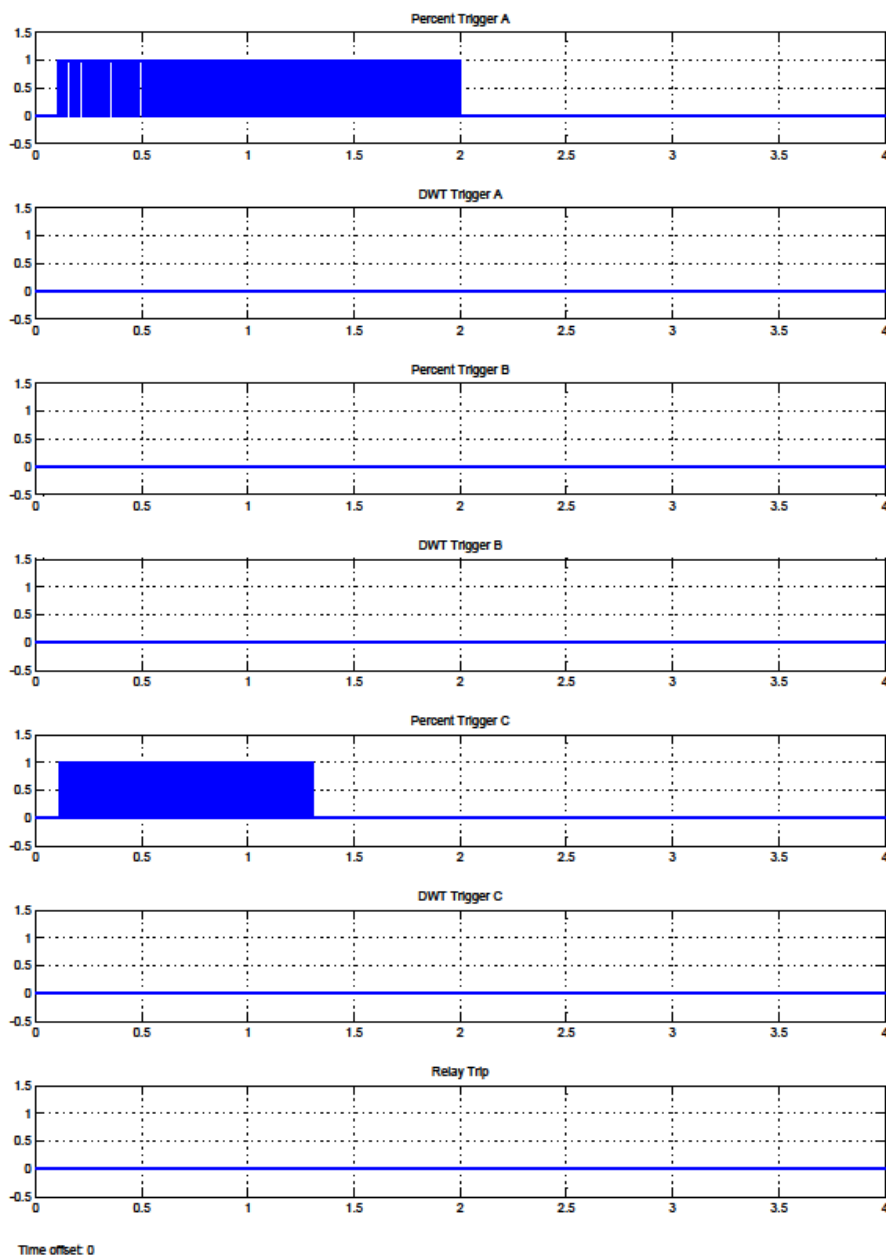


Fig. 5-59. Evolución de los disparadores para energización en carga del transformador 3.

La Fig. 4-60 muestra las intensidades primarias y secundarias para falta interna en vacío del transformador 3. Se comprueba el elevado valor de la intensidad primaria de cortocircuito de la fase afectada por la falta, la fase A.

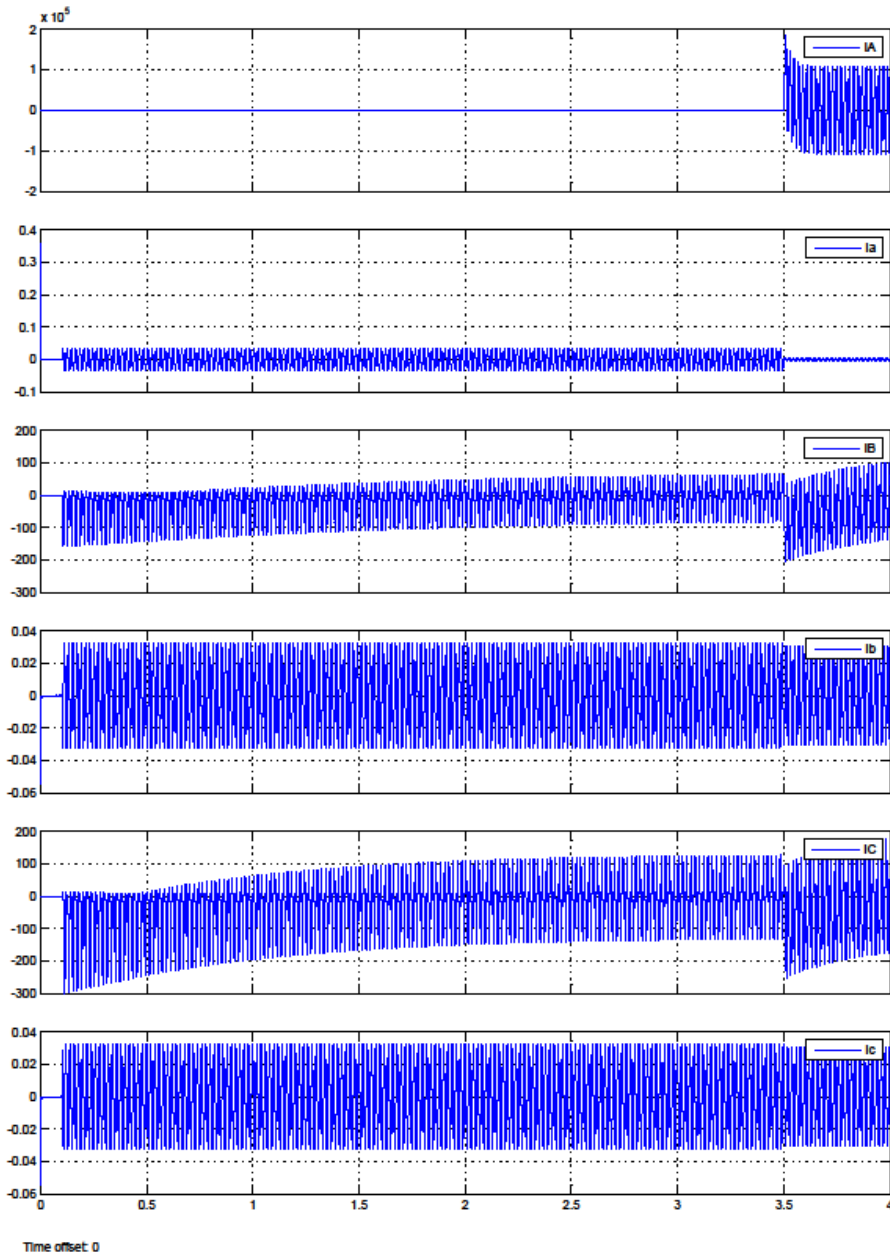


Fig. 5-60. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en vacío del transformador 3.

La Fig. 4-61 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se observan las intensidades diferenciales elevadas debidas a la conexión del transformador pero para el caso de la fase A no. No es que sea nula, sino que debido al alto valor de la corriente de falta a tierra de la fase A los valores de la correspondiente intensidad diferencial para la energización son comparativamente despreciables. No obstante la unidad porcentual de la fase A sí detecta valores elevados en la energización de dicha fase.

Al producirse la falta las intensidades diferenciales son muy elevadas por lo que se activan los correspondientes disparadores de las unidades porcentuales.



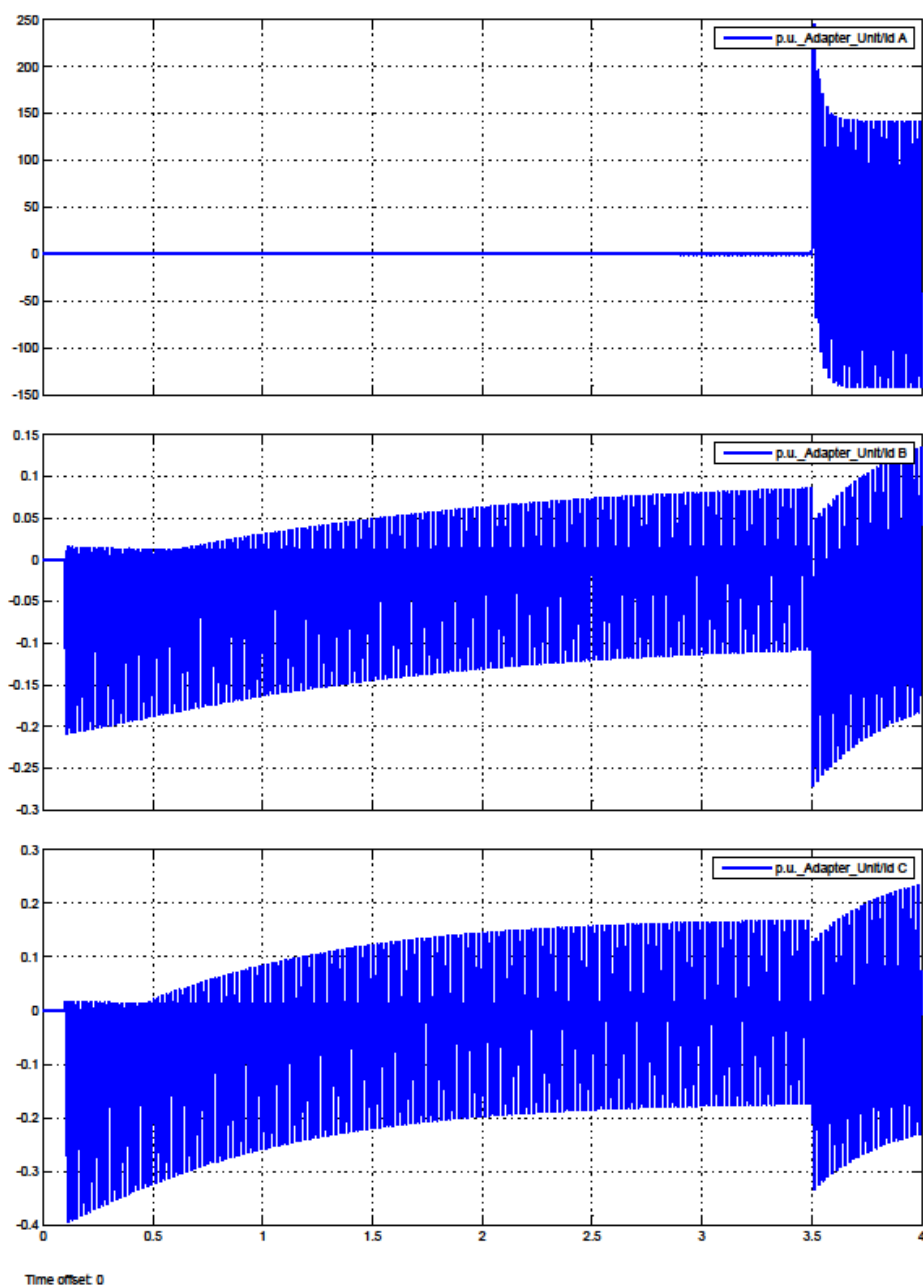


Fig. 5-61. Intensidades diferenciales para falta interna en vacío del transformador 3.

Las situaciones comentadas en los párrafos anteriores se muestran en la Fig. 4-62, donde se muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se comprueba la activación del disparador de la unidad porcentual de la fase A para la energización y así mismo se comprueba la activación de los disparadores de todas las unidades porcentuales al producirse la falta así como la activación del disparo del relé, activación correcta pues se trata de una falta interna en el transformador.

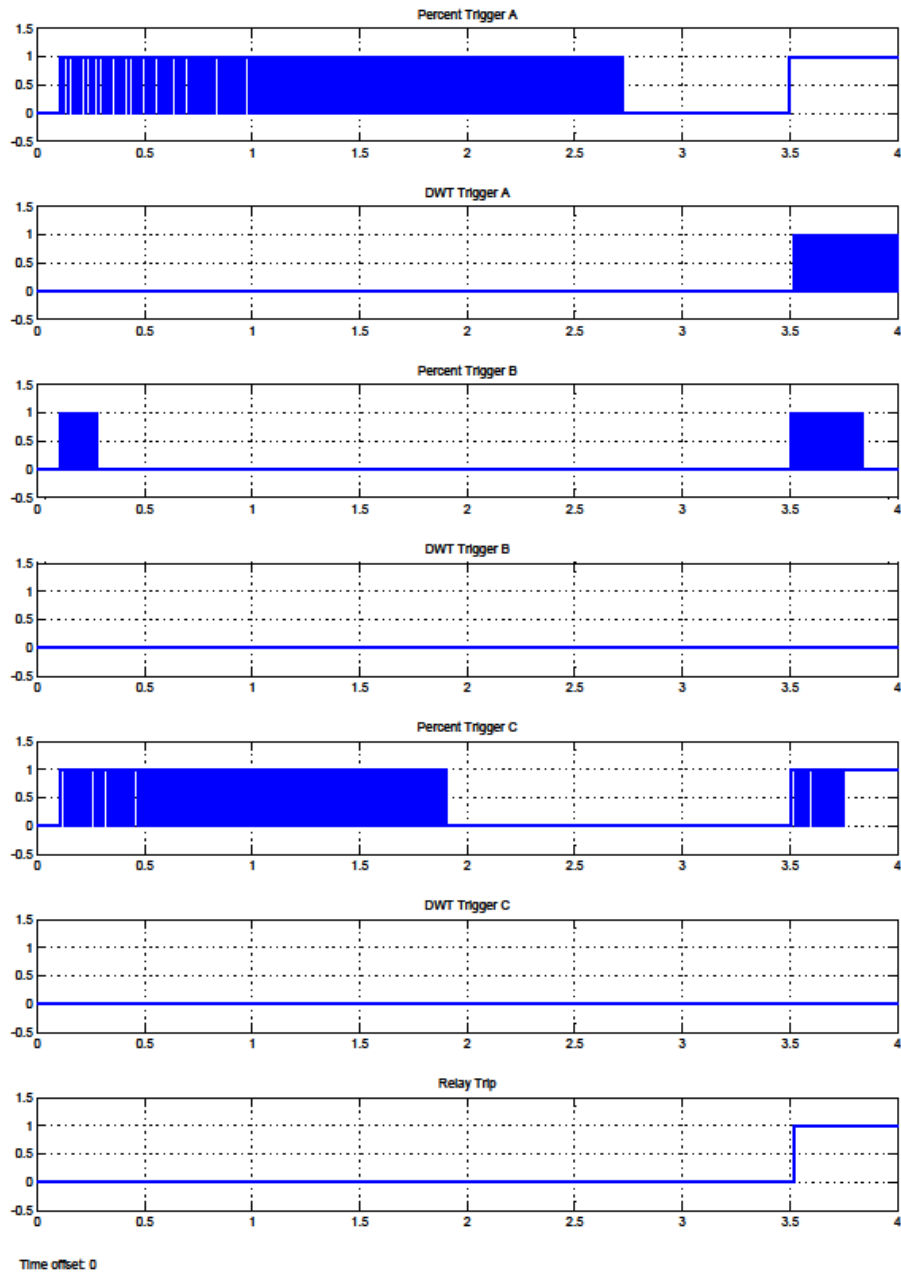


Fig. 5-62. Evolución de los disparadores para falta interna en vacío del transformador 3.

La Fig. 4-63 muestra el detalle ampliado de la evolución de los disparadores desde que se produce la falta a los 3,5 segundos desde el inicio de la simulación hasta que se produce el disparo del relé. Se observa que como en todos los casos anteriores, el tiempo de disparo es de 20 ms desde el inicio de la falta.

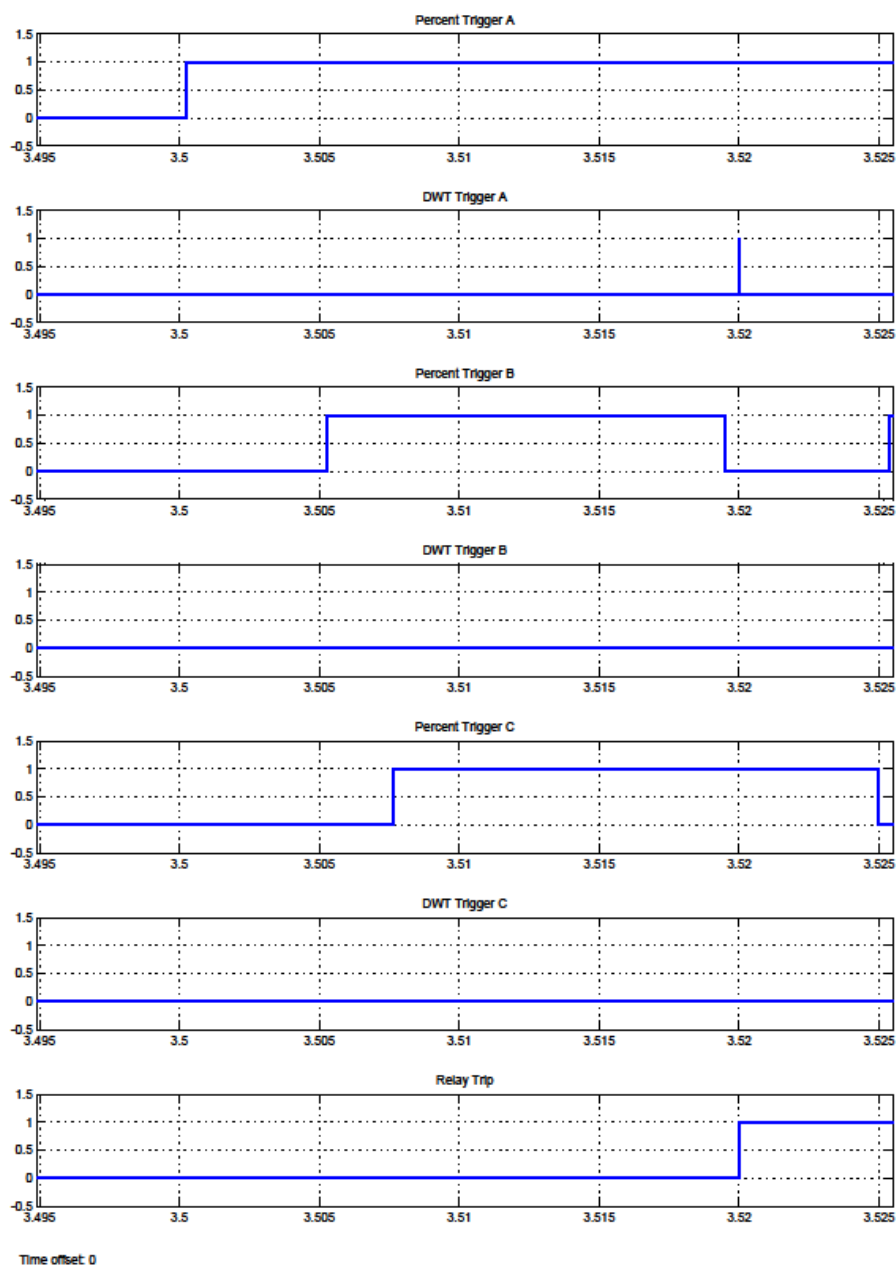


Fig. 5-63. Detalle de la evolución de los disparadores de la figura Fig. 7-56.

La Fig. 4-64 muestra las intensidades primarias y secundarias para falta interna en carga del transformador. En este caso se puede comprobar que las intensidades secundarias no son despreciables debido a la carga lo que tiene como resultado que las intensidades diferenciales no sean como en el caso anterior, inferiores en valor.

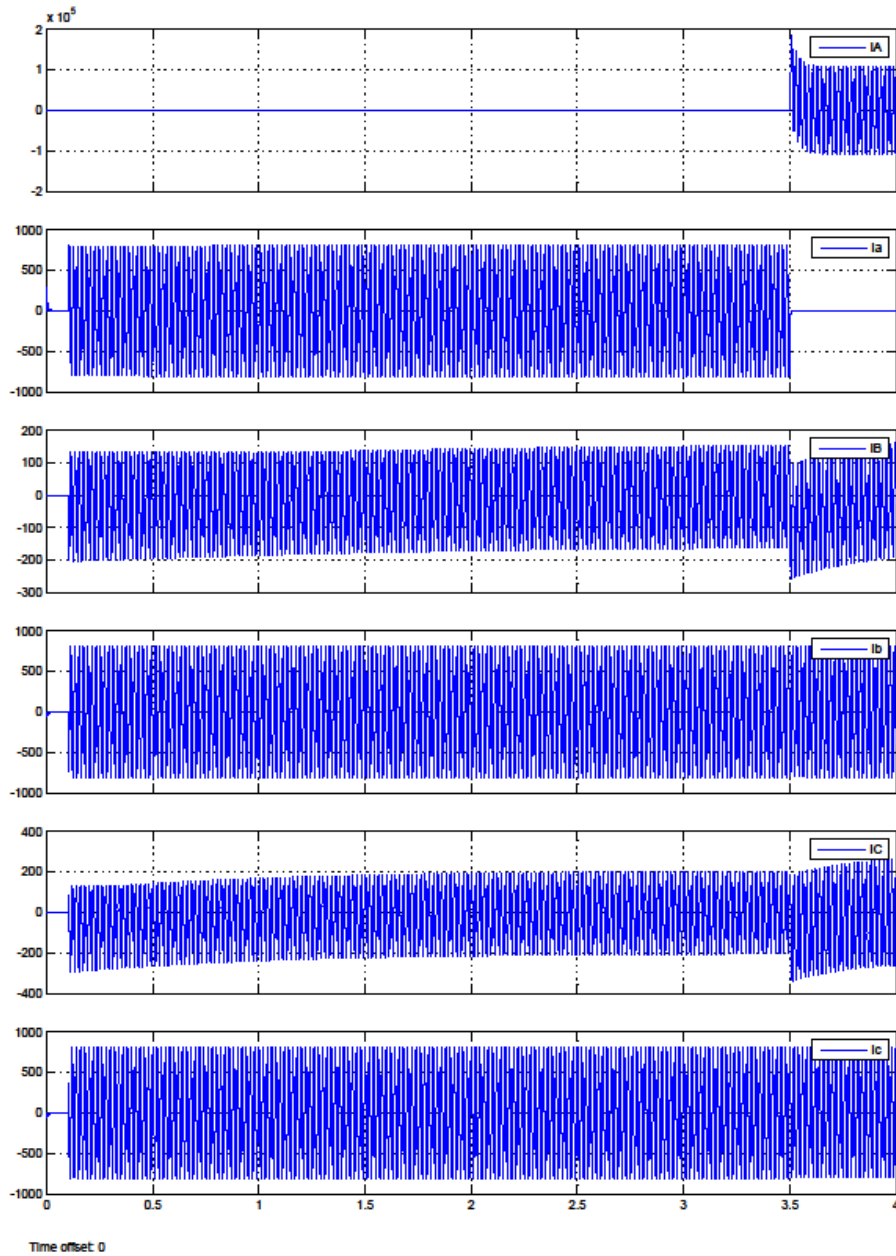


Fig. 5-64. Intensidades primarias y secundarias para falta interna en carga del transformador 3.

La Fig. 4-65 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se observa el elevado valor que presentan sobre todo en la fase afectada por la falta, lo que provoca la activación del disparador de la unidad porcentual asociada.

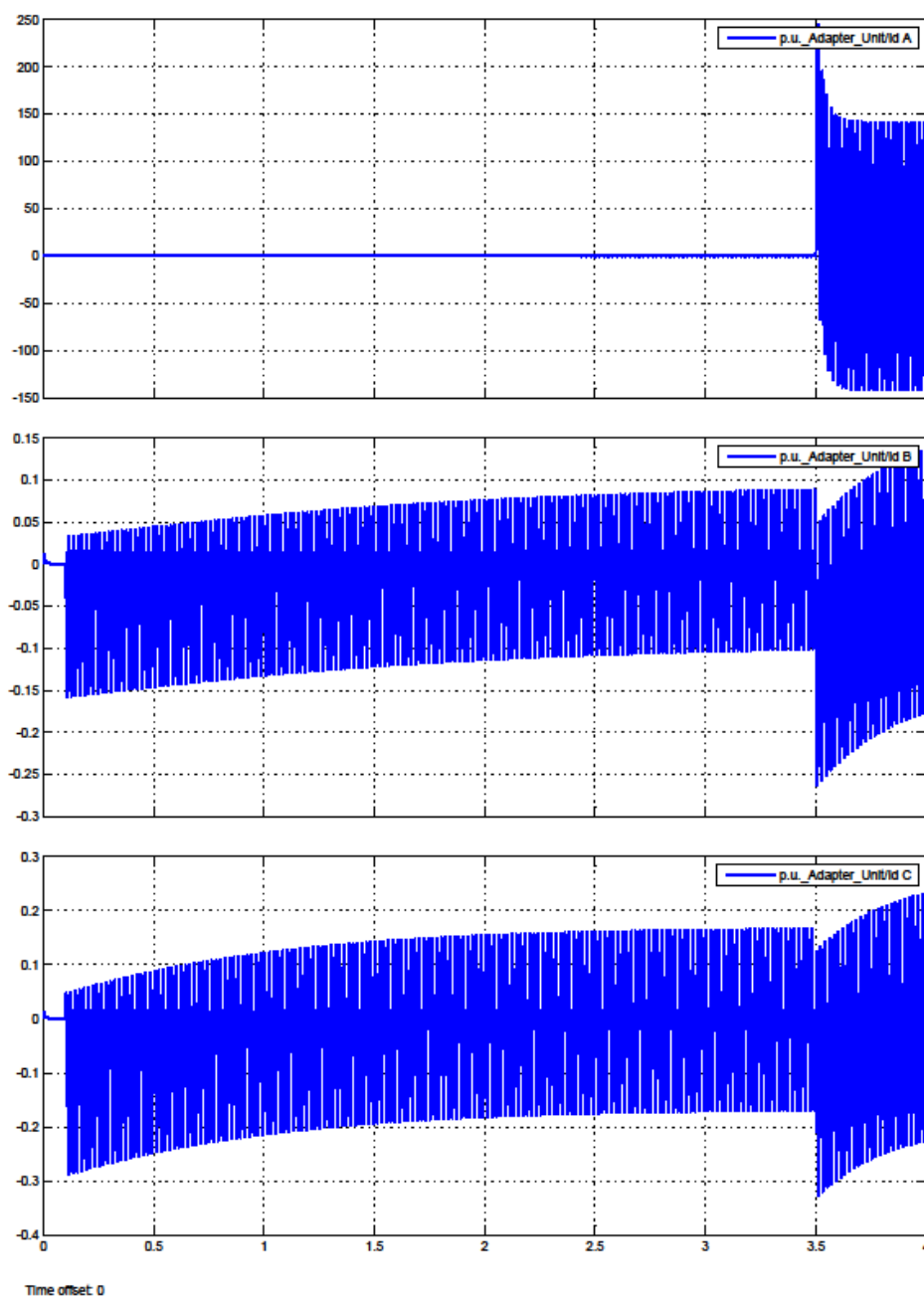


Fig. 5-65. Intensidades diferenciales para falta interna en carga del transformador 3.

La Fig. 4-66 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. En ella se comprueba la activación de los disparadores de las unidades porcentuales debido al alto valor de las intensidades diferenciales y el disparo de la unidad DWT de la fase afectada por la falta así como del relé, actuación correcta pues se trata de una falta interna.

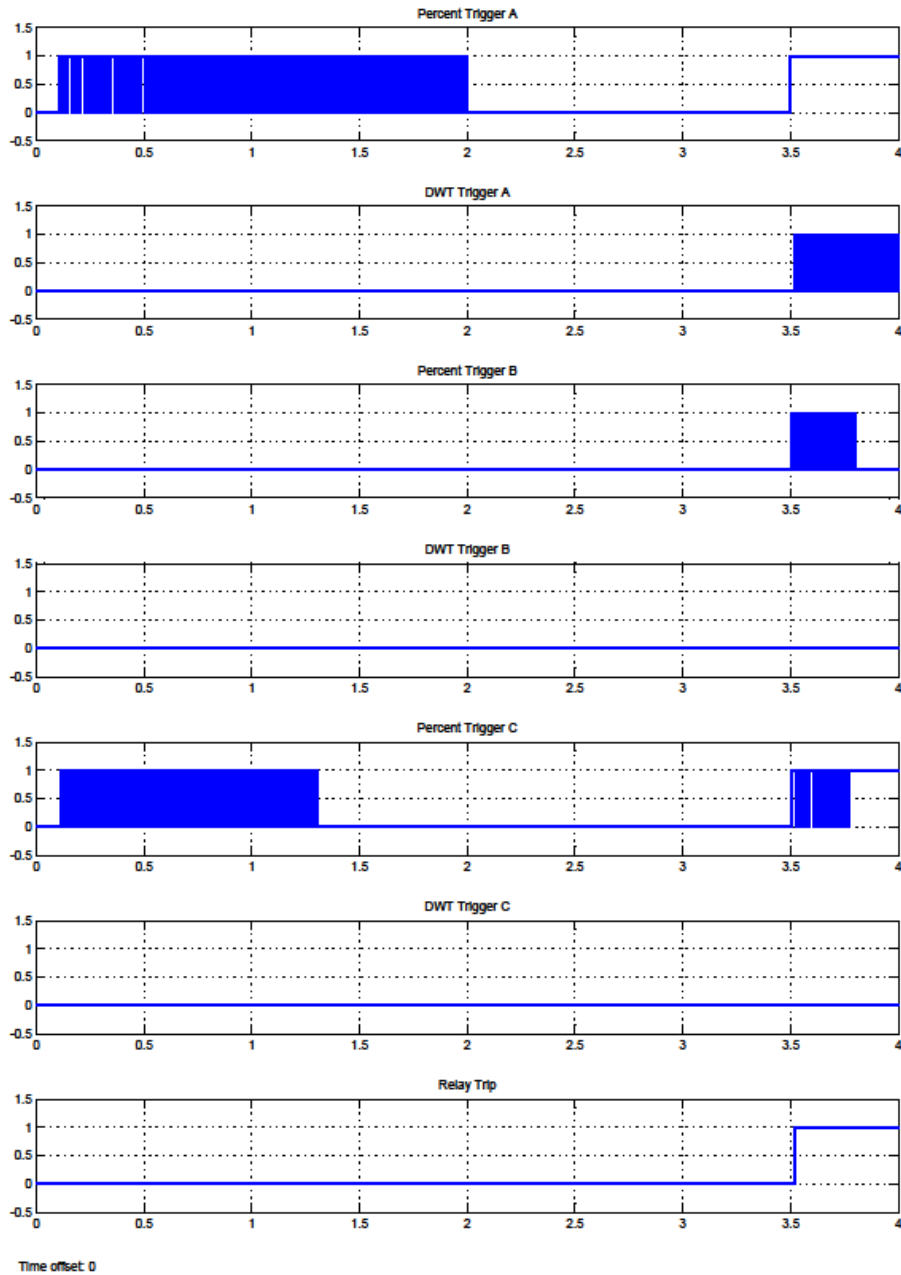


Fig. 5-66. Evolución de los disparadores para falta interna en carga del transformador 3.

La Fig. 4-67 muestra el detalle ampliado de la evolución de los disparadores desde que se produce la falta a los 3,5 segundos desde el inicio de la simulación hasta que se produce el disparo del relé. Se observa que como en todos los casos anteriores, el tiempo de disparo es de 20 ms desde el inicio de la falta.

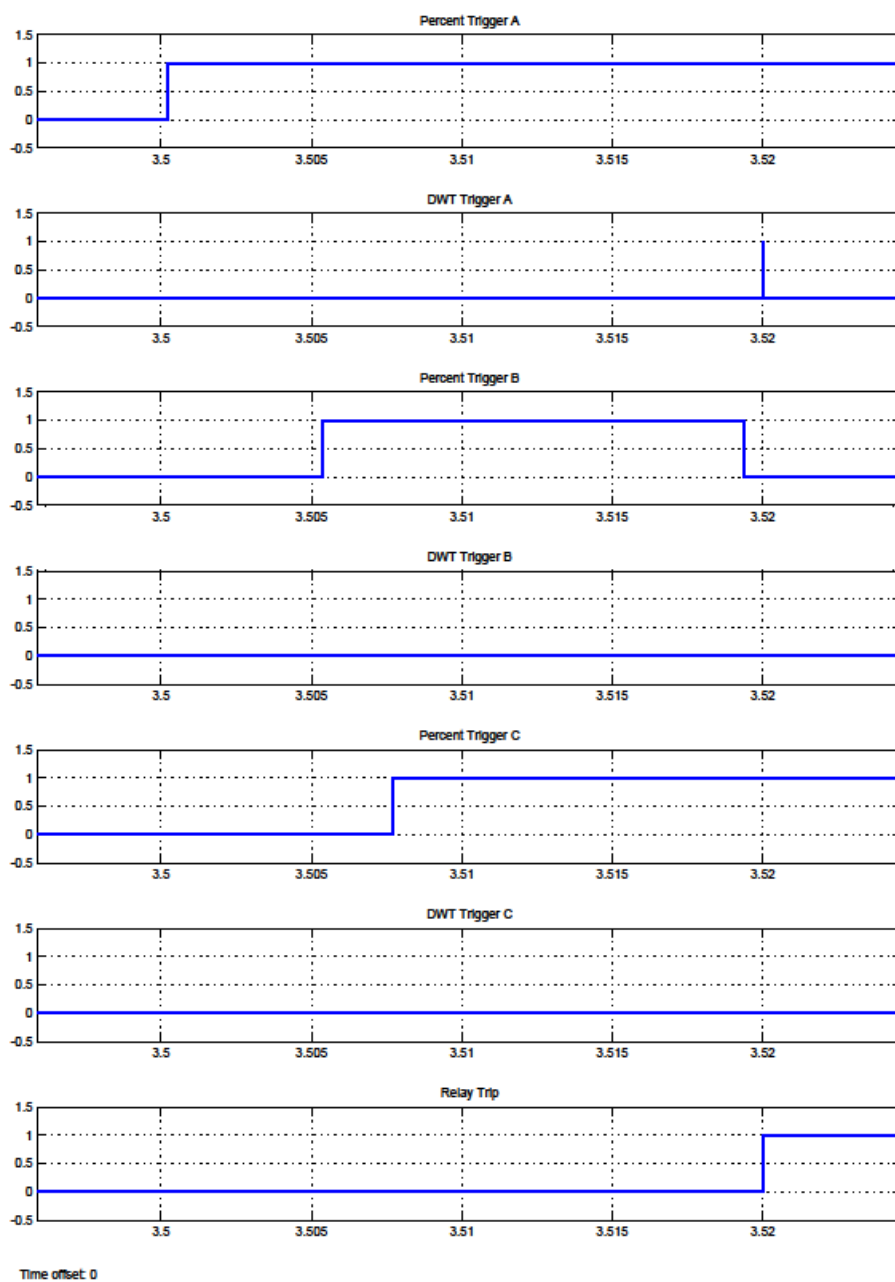


Fig. 5-67. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-60.

La Fig. 4-68 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador para falta externa en carga. Se observa la elevada intensidad de falta que circula por el primario y secundario de la fase afectada por la falta a tierra. Las intensidades de las fases sanas apenas notan el efecto de la falta puesto que ya estaban cargadas.

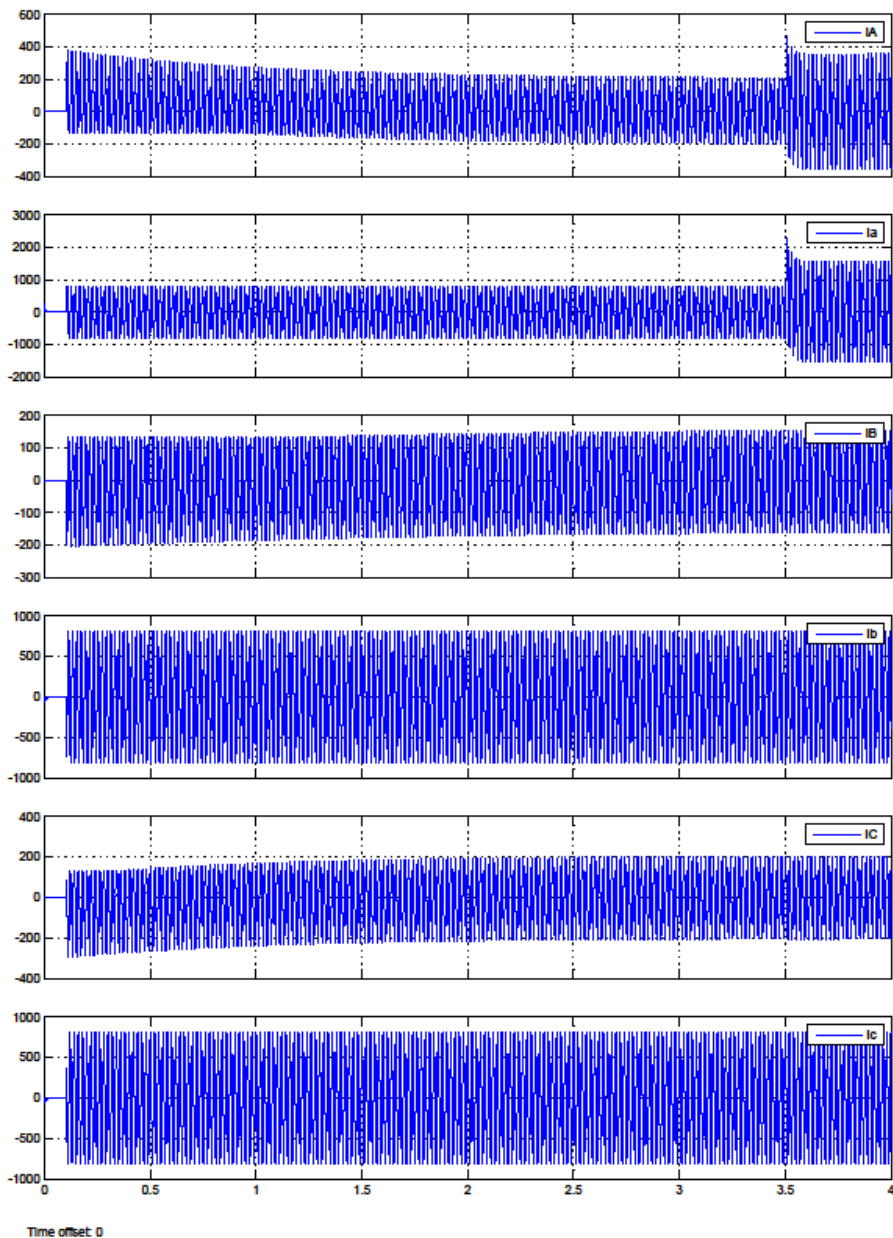


Fig. 5-68. Intensidades primarias y secundarias para falta externa en carga para el transformador 3.

La Fig. 4-69 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se observa que se mantienen en un valor bajo, pues las intensidades primarias y secundarias son porcentualmente equivalentes. Eso tiene como consecuencia que no se active ninguno de los disparadores de las unidades porcentuales.



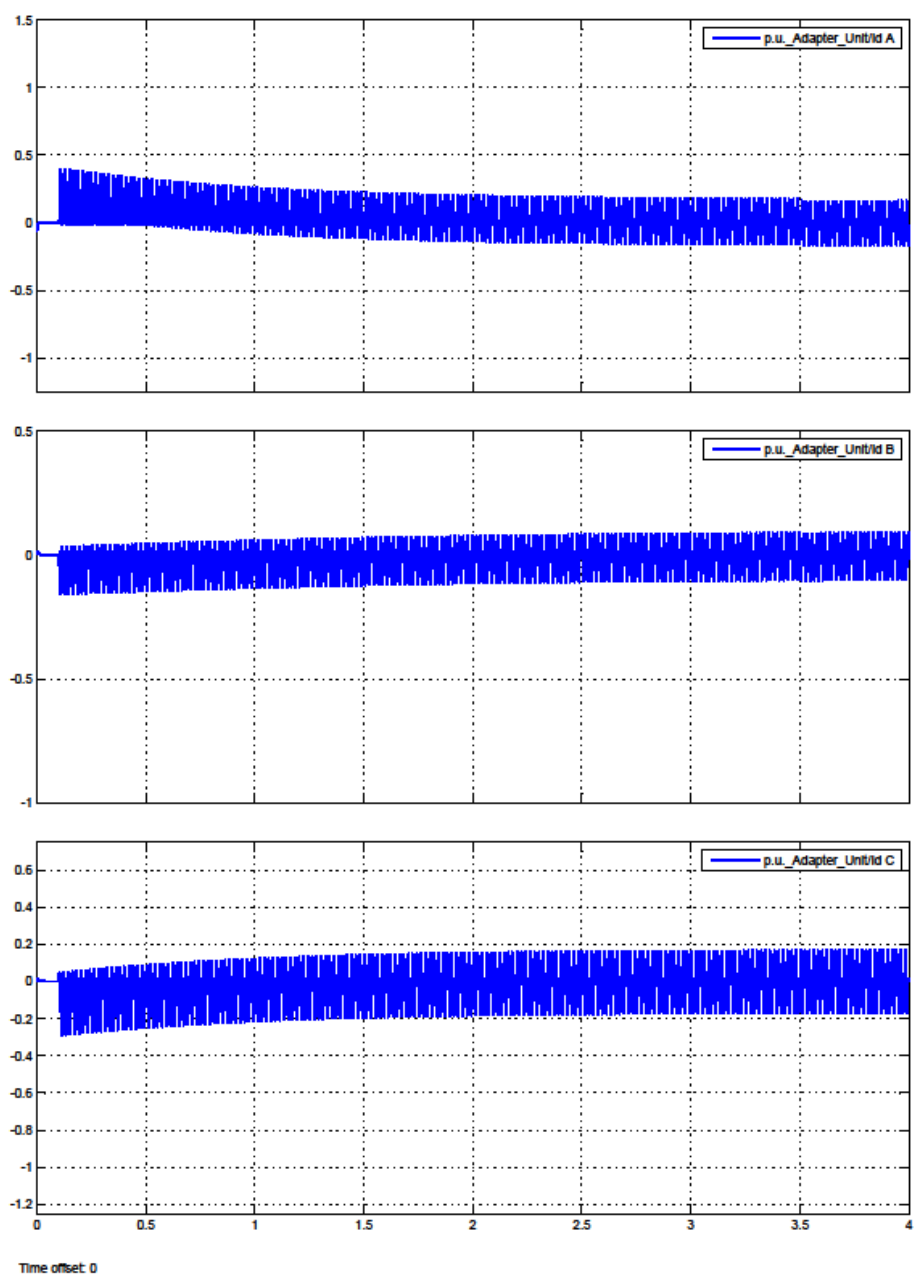


Fig. 5-69. Intensidades diferenciales para falta externa en carga en el transformador 3.

La Fig. 4-70 muestra la evolución de los disparadores del relé para falta externa en carga del transformador. Como era previsible las reducidas intensidades diferenciales no activan ninguno de los disparadores de las unidades porcentuales, y por tanto tampoco se activa el disparo del relé, actuación correcta pues en falta externa no debe disparar el relé diferencial.

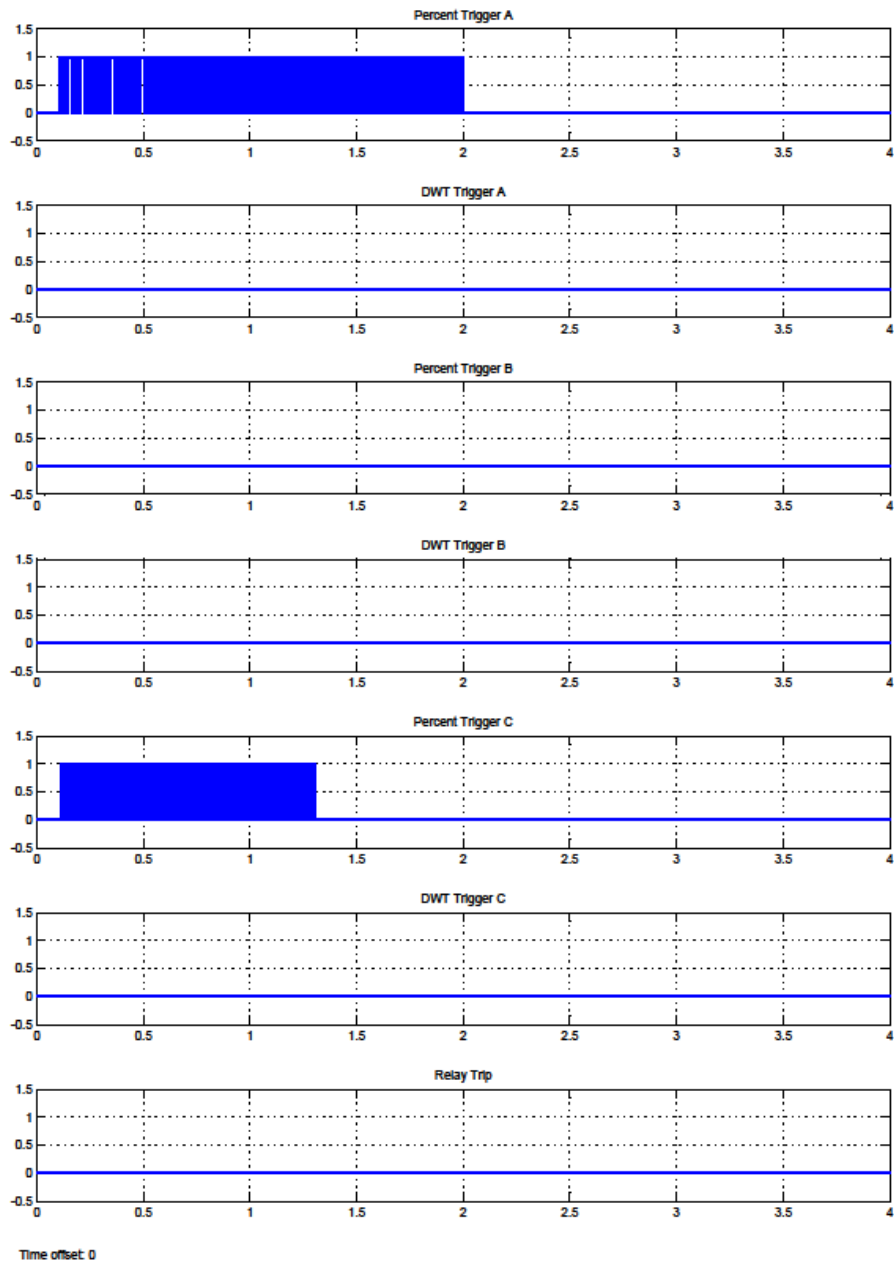


Fig. 5-70. Evolución de los disparadores para falta externa en carga del transformador 3.

### 5.1.8. Casos de estudio para faltas no usuales.

Todos los casos de estudio llevados a cabo en los diferentes tipos de transformadores están relacionados con la discriminación entre intensidades de falta interna e intensidades de energización. Para las faltas se ha considerado únicamente la más común de las faltas que puede presentarse en un transformador de potencia, que es la falta monofásica a tierra.

---

Sin embargo existen otro tipo de faltas que pueden presentarse en el transformador que si bien tienen una probabilidad de aparición baja, no es nula, por lo que debe estudiarse el comportamiento del relé ante la presencia de este tipo de faltas. Las faltas que se consideran son:

- Falta interna bifásica.
- Falta externa bifásica.
- Falta interna bifásica a tierra.
- Falta externa bifásica a tierra.
- Falta interna trifásica.
- Falta externa trifásica.

Para el análisis del comportamiento del relé en este tipo de falta se utiliza el transformador 3 en carga.

#### **5.1.8.1. Falta interna bifásica.**

Para analizar el comportamiento del relé diferencial ante faltas bifásicas se utiliza el transformador 3. Para analizar la falta bifásica interna se activa el bloque de simulación de faltas internas para que produzca una falta bifásica entre las fases A y B a los 3,5 segundos de iniciada la simulación. La simulación se realiza en carga para analizar por ser la situación más común.

La Fig. 4-71 muestra las intensidades primarias y secundarias para este caso. Como era previsible al iniciarse la falta circula una alta intensidad de falta por las dos fases afectadas, A y B. La intensidad secundaria de estas fases se reduce significativamente pero no se anula. A pesar de este hecho la intensidad diferencial resultante tiene un valor muy alto.

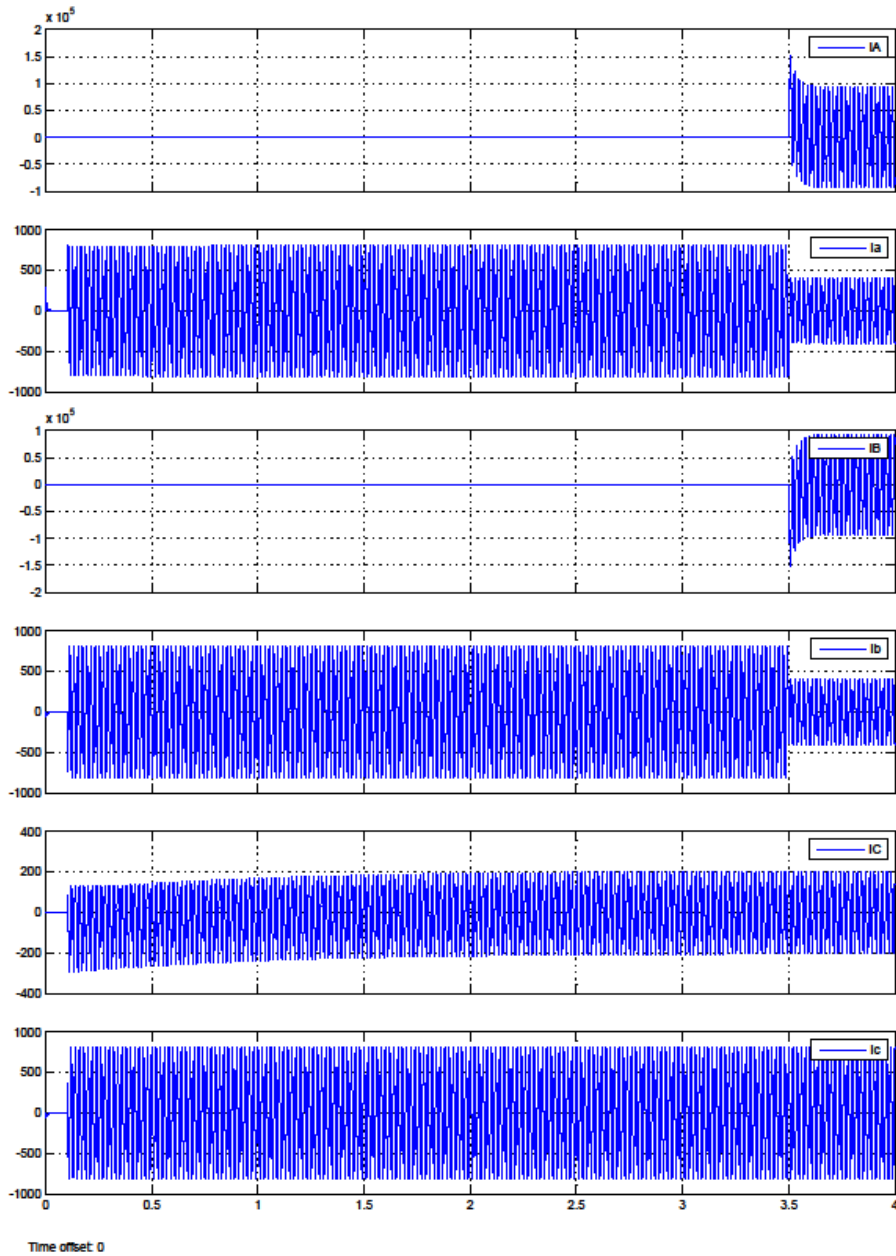


Fig. 5-71. Intensidades primarias y secundarias para falta bifásica en carga del transformador 3.

La Fig. 4-72 muestra las intensidades diferenciales resultantes para este caso. Se observa un elevado valor de la intensidad diferencial de las fases afectadas lo que tiene como consecuencia inmediata la activación de los disparadores de las unidades porcentuales de las fases afectadas.

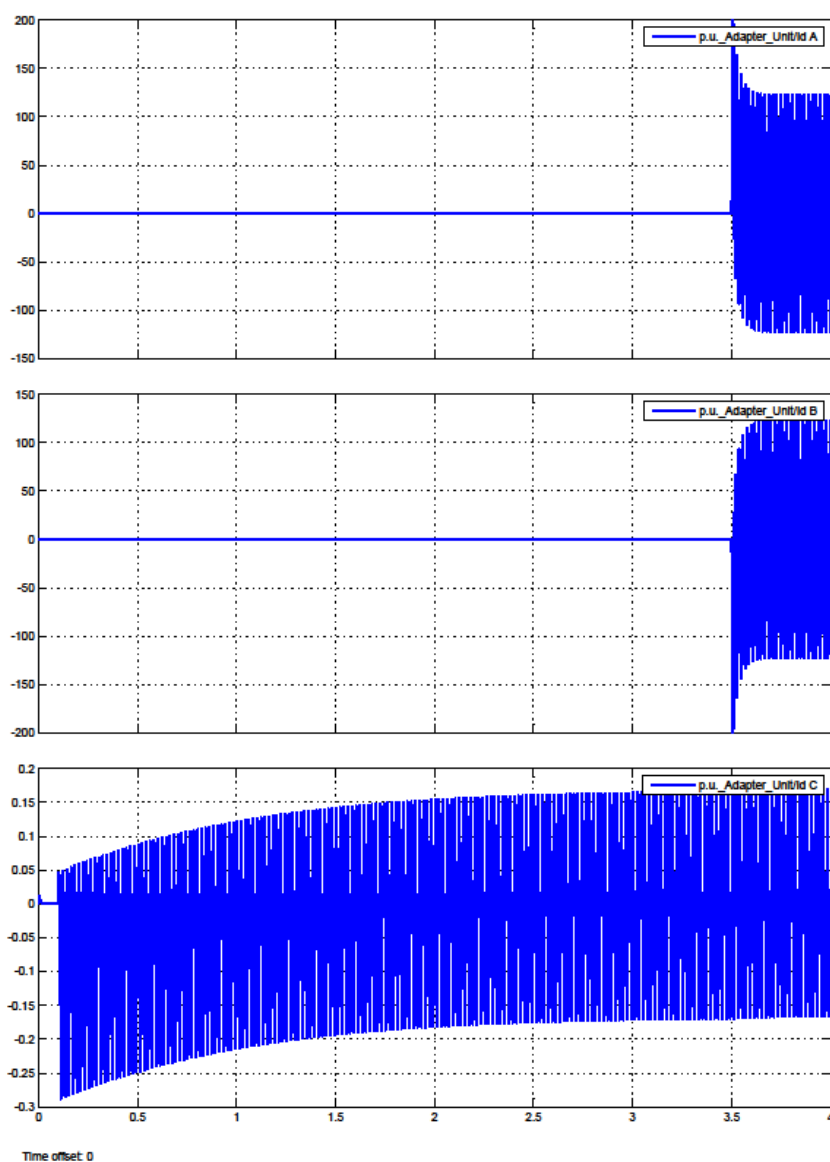


Fig. 5-72. Intensidades diferenciales para falta bifásica del transformador 3.

La Fig. 4-73 muestra la evolución de los disparadores del relé diferencial para este caso. Se observa la activación de los disparadores de los elementos porcentuales de las fases afectadas así como la activación de los disparadores de las unidades DWT asociadas y por tanto activando de manera correcta el disparo del relé, pues se trata de una falta interna y debe actuar la protección del transformador.

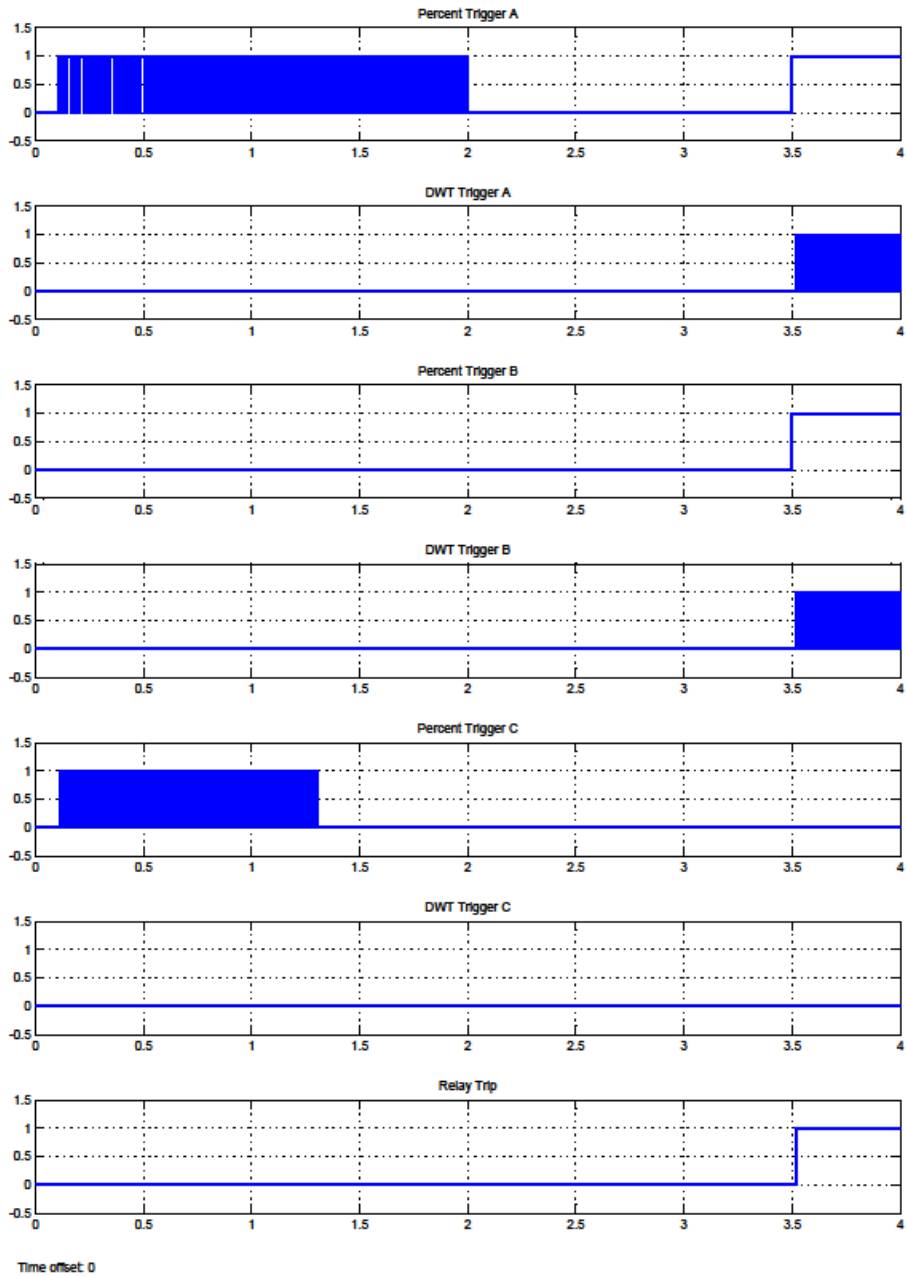


Fig. 5-73. Evolución de los disparadores para falta interna bifásica del transformador 3.

La Fig. 4-74 muestra el detalle del tiempo de disparo del relé en este caso, pudiéndose comprobar que el relé activa su salida de disparo en 20 ms desde el inicio de la falta.

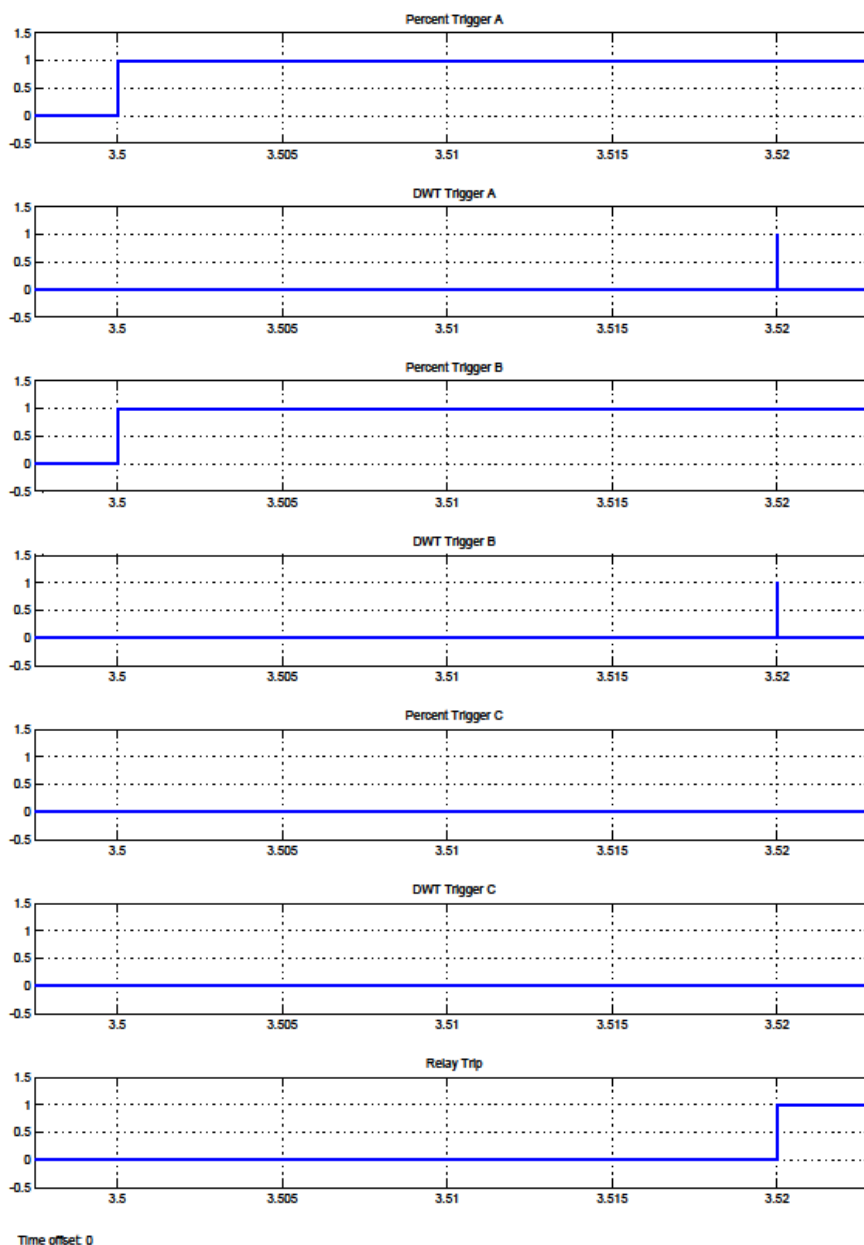


Fig. 5-74. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-67.

### 5.1.8.2. Falta externa bifásica.

Para la simulación de falta externa bifásica en el transformador se desactiva el bloque de faltas internas y se activa el bloque de faltas externas para falta bifásica entre las fases A y B. Como en el caso anterior también está en carga el transformador.

En la Fig. 4-75 se muestran las intensidades primarias y secundarias del transformador en este caso. Se comprueba el elevado valor de las intensidades de falta en las dos fases

afectadas, A y B, aunque al ser porcentualmente equivalentes la intensidad diferencial tendrá un valor bajo.

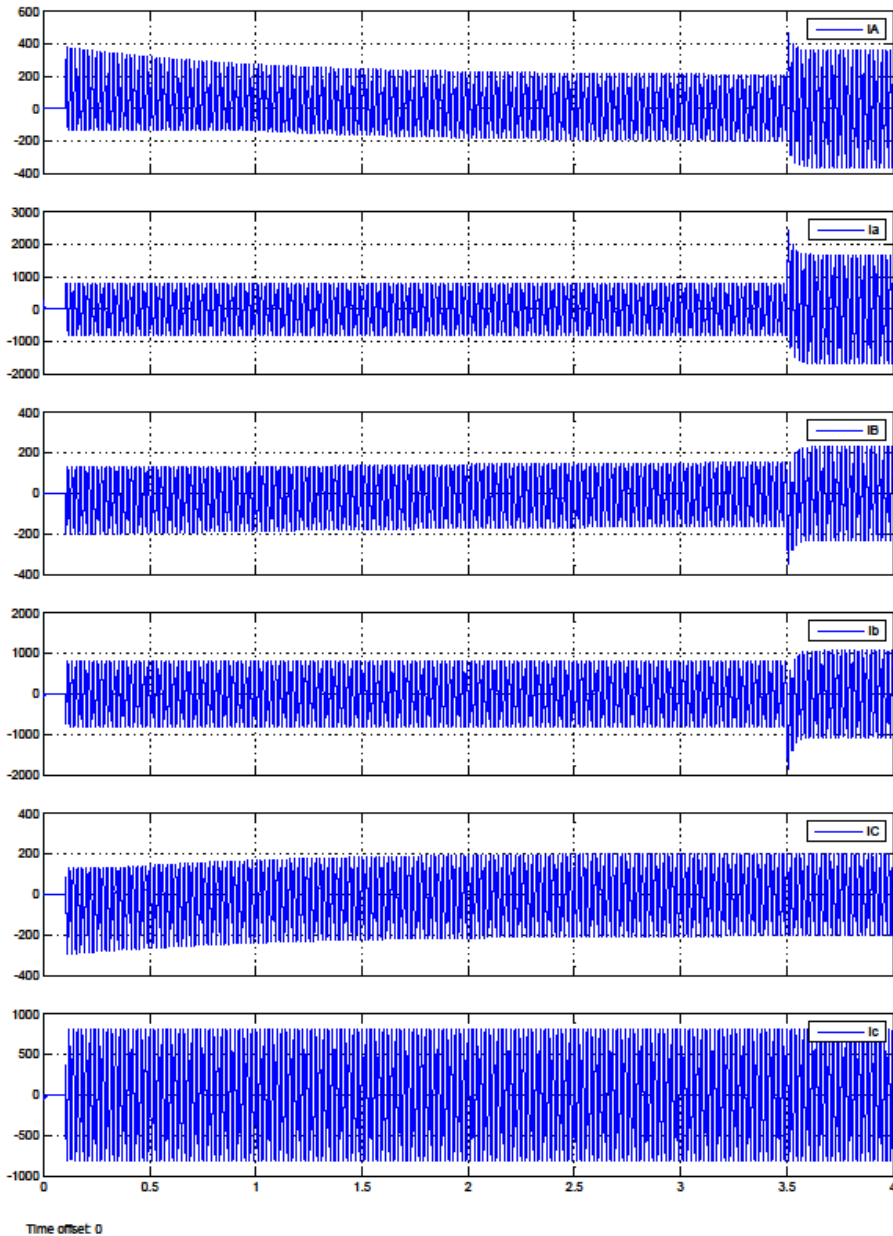


Fig. 5-75. Intensidades primarias y secundarias para falta externa bifásica del transformador 3.

La Fig. 4-76 muestra las intensidades diferenciales resultantes para este caso. Se observa el reducido valor de las mismas a pesar de los elevados valores de las intensidades de falta. Por tanto no se activan los disparadores de las unidades porcentuales.



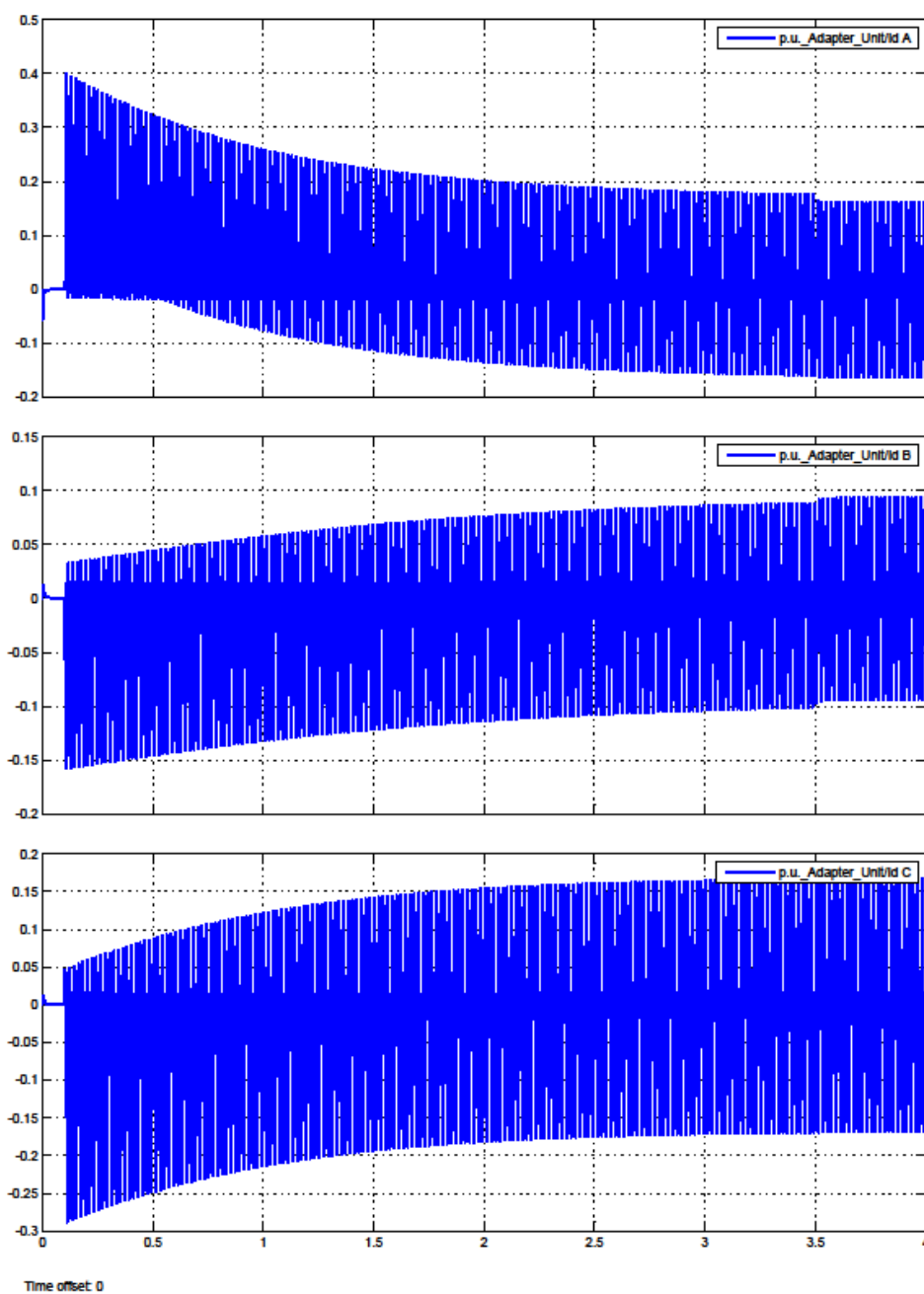


Fig. 5-76. Intensidades diferenciales para falta externa bifásica en el transformador 3.

La Fig. 4-77 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso donde se observa que no se activan los disparadores de las unidades porcentuales y por tanto tampoco se activan ni los disparadores de las unidades DWT ni el disparo del relé, situación que es la esperada para una falta externa.

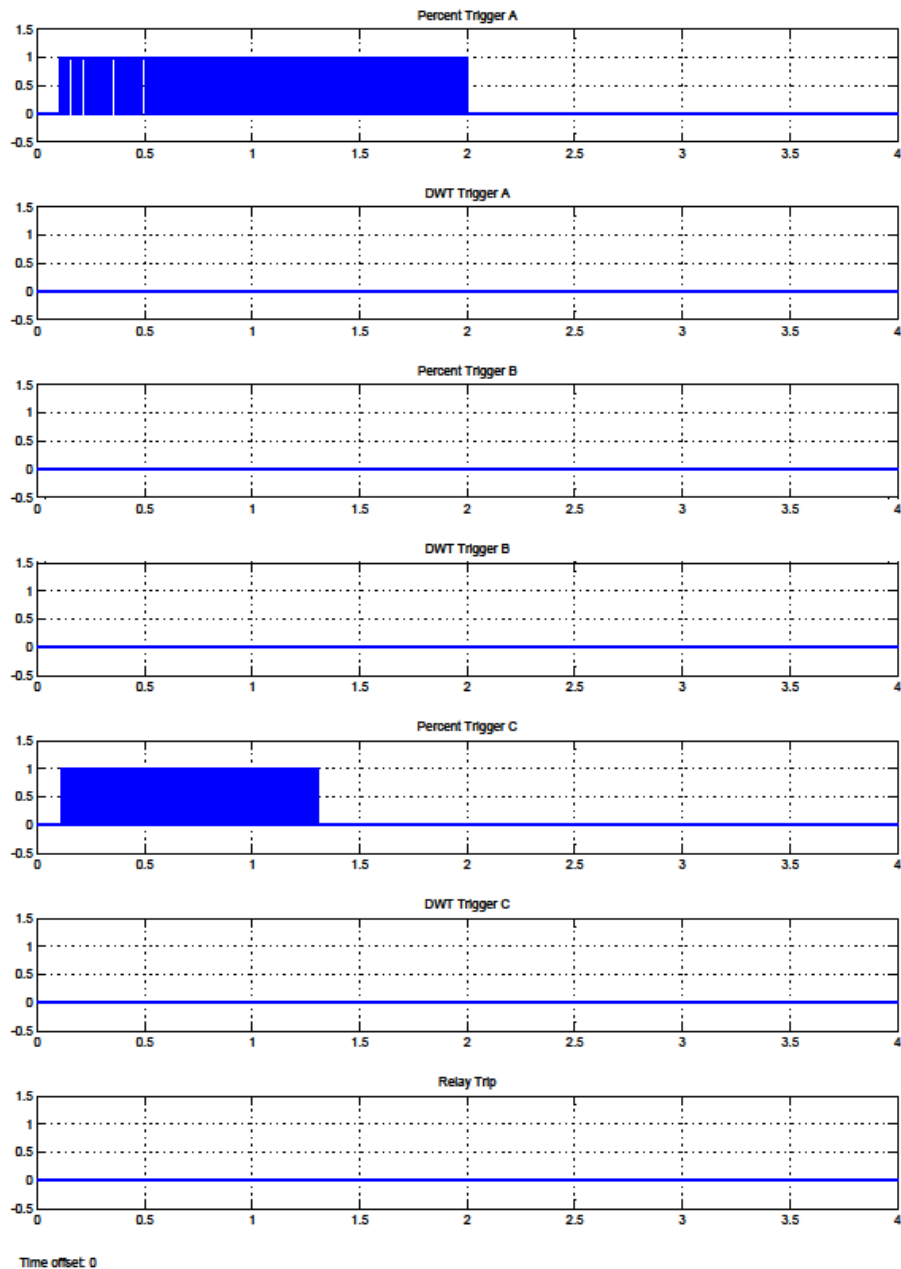


Fig. 5-77. Evolución de los disparadores para falta externa bifásica en el transformador 3.

### 5.1.8.3. Falta interna bifásica a tierra.

Para comprobar el comportamiento del relé diferencial ante faltas bifásicas a tierra se activa en el bloque de simulación de faltas internas una falta bifásica entre las fases A y B con contacto a tierra, estando el transformador en carga.

La Fig. 4-78 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador para este caso. Se observa el elevado valor que adquieren las intensidades primarias de las fases afectadas por la falta, y el reducido valor de las correspondientes intensidades secundarias.

Este hecho tiene como efecto un elevado valor de la intensidad diferencial resultante para las fases afectadas por la falta.

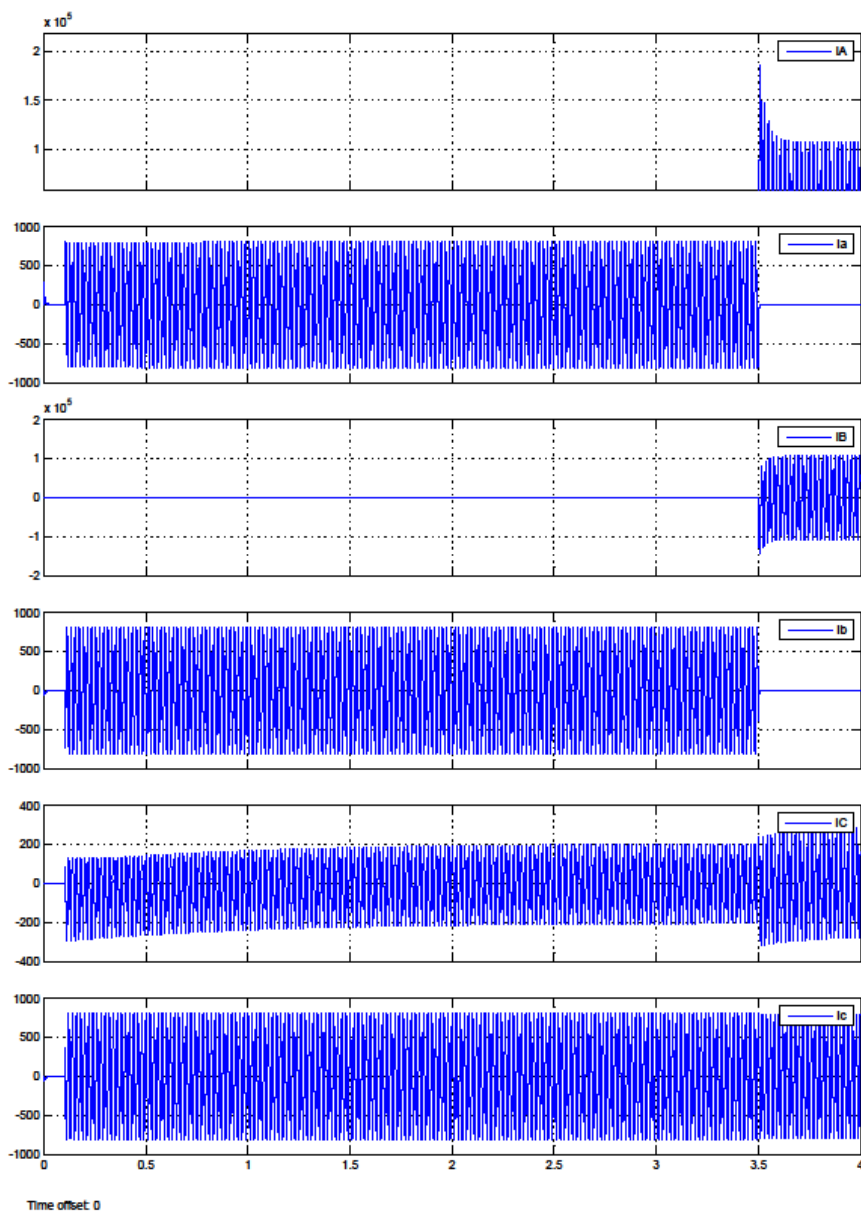


Fig. 5-78. Intensidades primarias y secundarias para falta bifásica a tierra del transformador 3.

La Fig. 4-79 muestra las intensidades diferenciales resultantes para este caso. Se observa el elevado valor de la intensidad diferencial en las fases afectadas por la falta y el reducido valor de la misma en la fase sana.

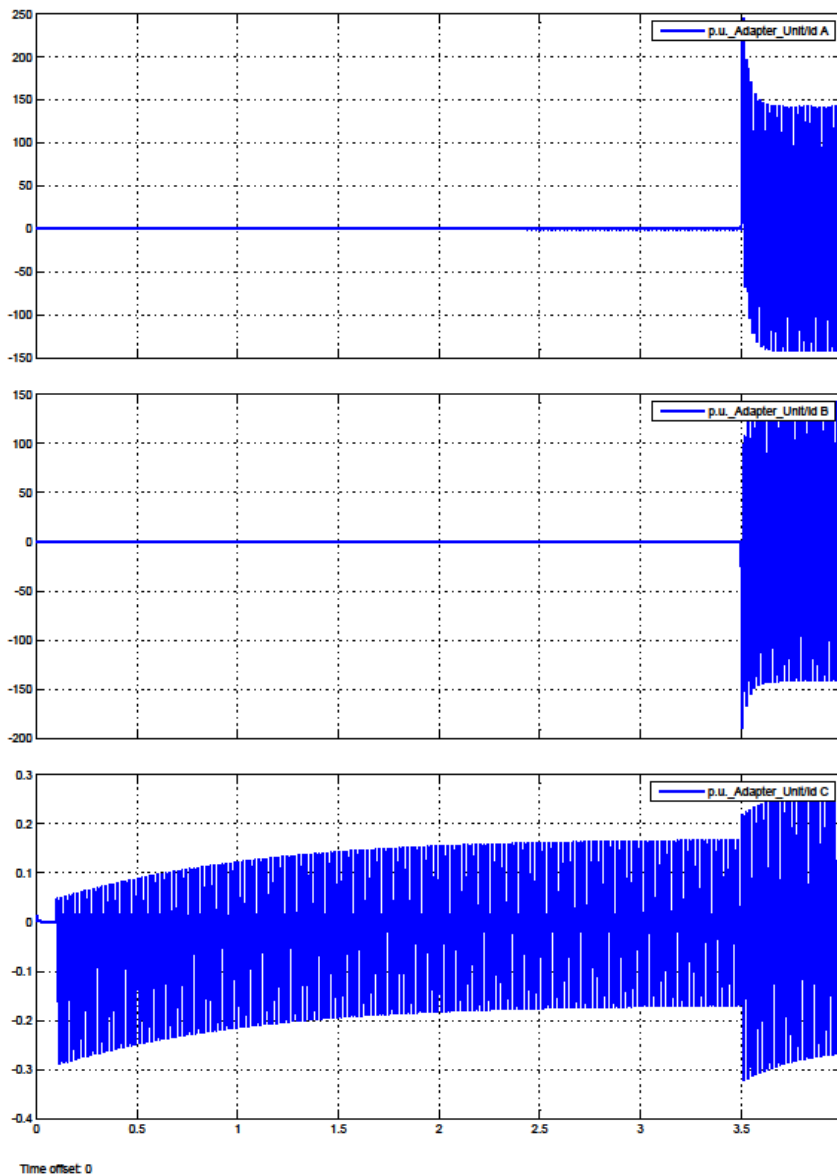


Fig. 5-79. Intensidades diferenciales para falta interna bifásica a tierra en el transformador 3.

La Fig. 4-80 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se puede comprobar cómo se activan los disparadores de las unidades porcentuales y a su vez los disparadores de las unidades DWT asociadas, pues se trata de una falta interna. Al activarse una cualquiera de los disparadores de las unidades DWT se activa el disparo del relé, que es lo que debe hacer puesto que se trata de una falta interna.

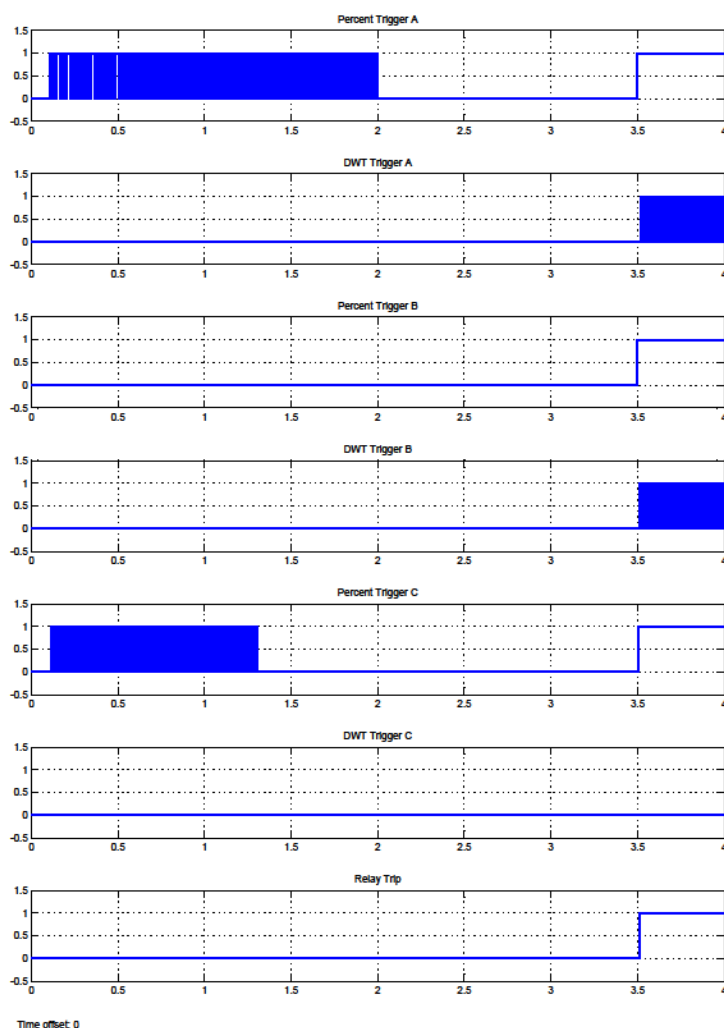


Fig. 5-80. Evolución de los disparadores para falta interna bifásica a tierra en el transformador 3.

La Fig. 4-81 muestra el detalle de los tiempos de actuación de los diferentes disparadores del relé. En este caso se observa que el tiempo de disparo del relé es de 10 ms desde el inicio de la falta. Se trata de un caso puntual de actuación ultrarrápida del relé diferencial pero no es el caso habitual.

Esta rápida actuación del relé es debida a que la evolución de las intensidades diferenciales, y por tanto la evolución de la señal de detalle de la DWT de aquella, es tal que en el primer intervalo de 10 ms que analiza la unidad DWT se tiene casi completa la señal de detalle correspondiente a falta interna, y por tanto el tiempos bajo umbral es alto activándose el disparador de esta unidad DWT al concluir el análisis de primer intervalo de 10 ms.

Es un caso puntual, no es la norma, pues según se ha visto en los anteriores apartados lo usual es que el primer intervalo de 10 ms a analizar por la unidad DWT no tenga completa la señal de detalle de la DWT de la intensidad diferencial, por lo que los tiempos bajo umbral serán altos como se vio en el apartado 7.1.

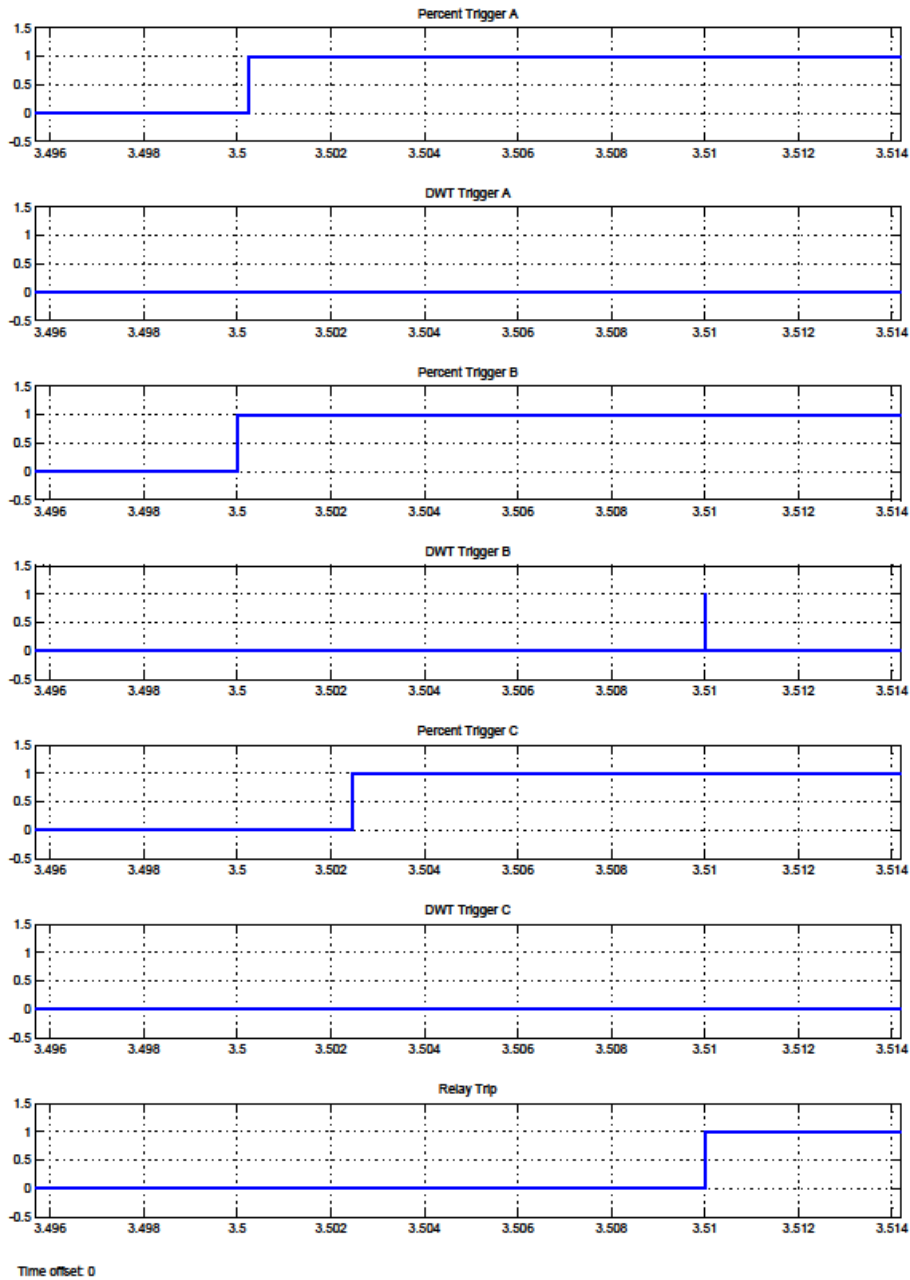


Fig. 5-81. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-74.

#### 5.1.8.4. Falta externa bifásica a tierra.

Para la simulación de falta externa bifásica a tierra en el transformador se desactiva el bloque de faltas internas y se activa el bloque de faltas externas para falta bifásica entre las fases A y B con contacto a tierra. Como en los casos anteriores también está en carga el transformador.

La Fig. 4-82 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador para este caso. Se observa una elevada intensidad de falta en las fases afectadas tanto en el primario como en el secundario. Puesto que porcentualmente estas intensidades son prácticamente iguales, la intensidad diferencial resultante es de un valor reducido.

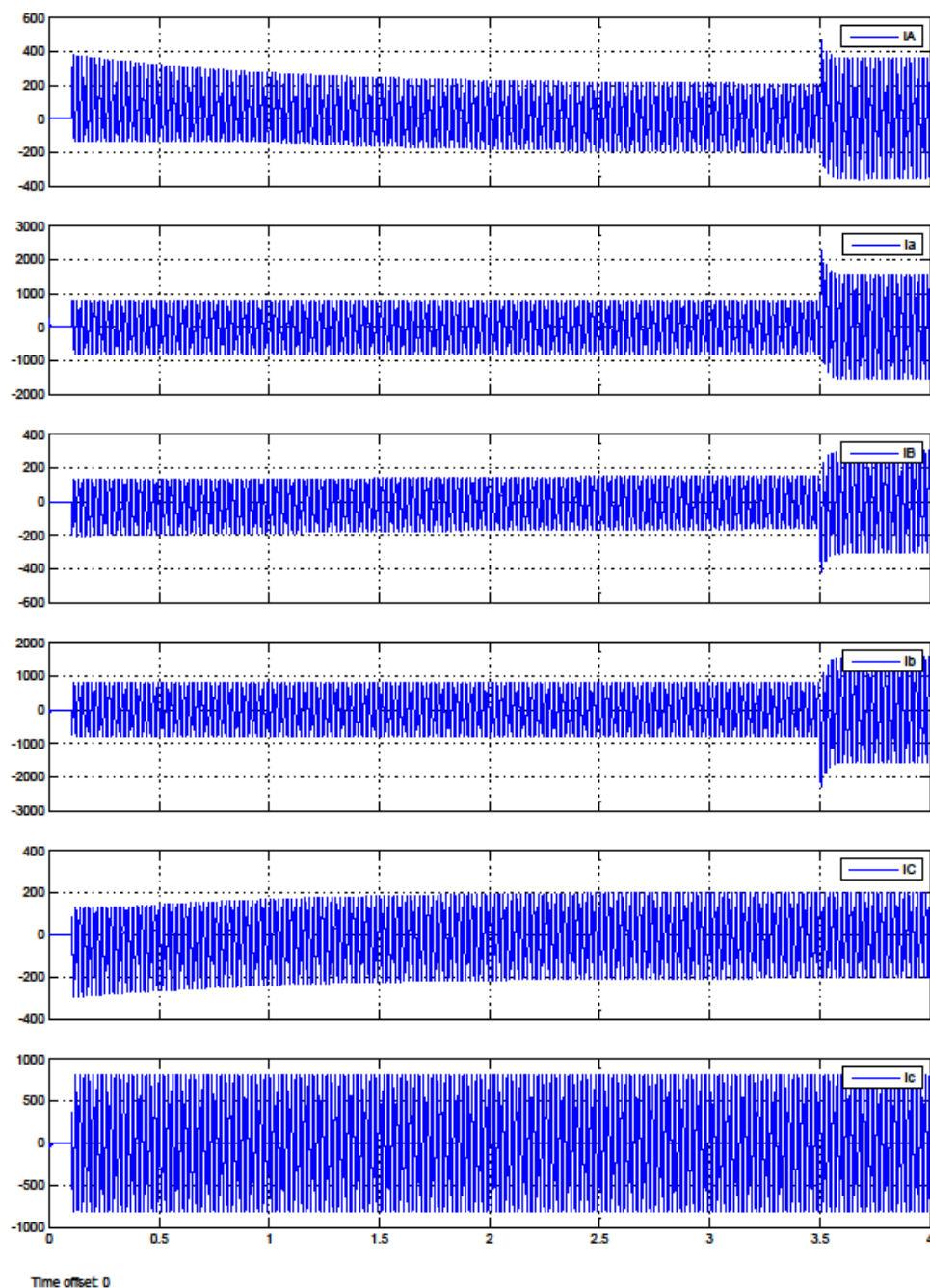


Fig. 5-82. Intensidades primarias y secundarias para falta externa bifásica a tierra del transformador 3.

La Fig. 4-83 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se observa el reducido valor de las mismas para las tres fases.

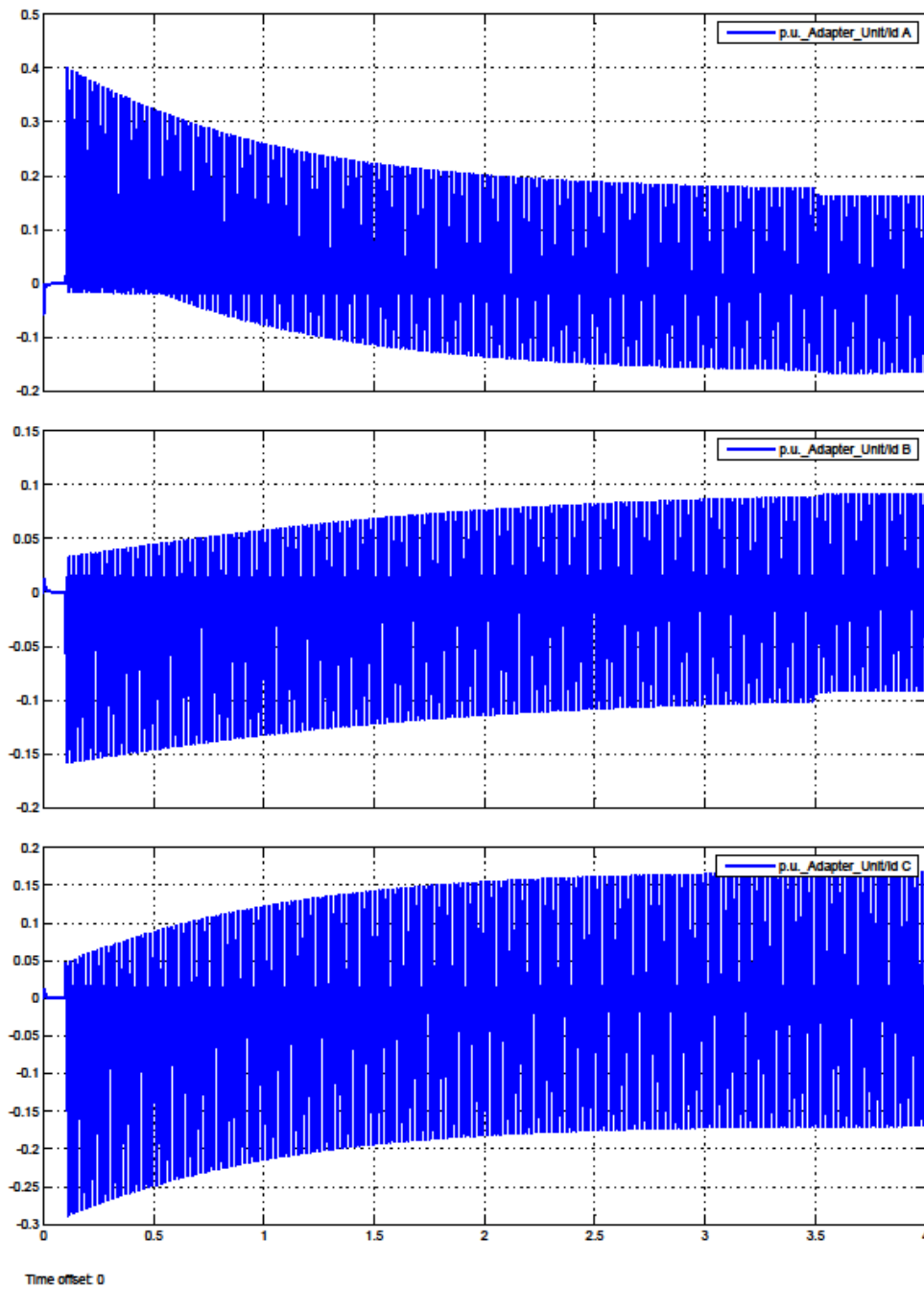


Fig. 5-83. Intensidades diferenciales para falta externa bifásica a tierra en el transformador 3.

La Fig. 4-84 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. Se observa que el reducido valor de las intensidades diferenciales no activa los disparadores de las unidades porcentuales y por tanto tampoco se activan los disparadores de las unidades



DWT ni el disparo del relé, siendo éste el comportamiento esperado del relé ante una falta externa

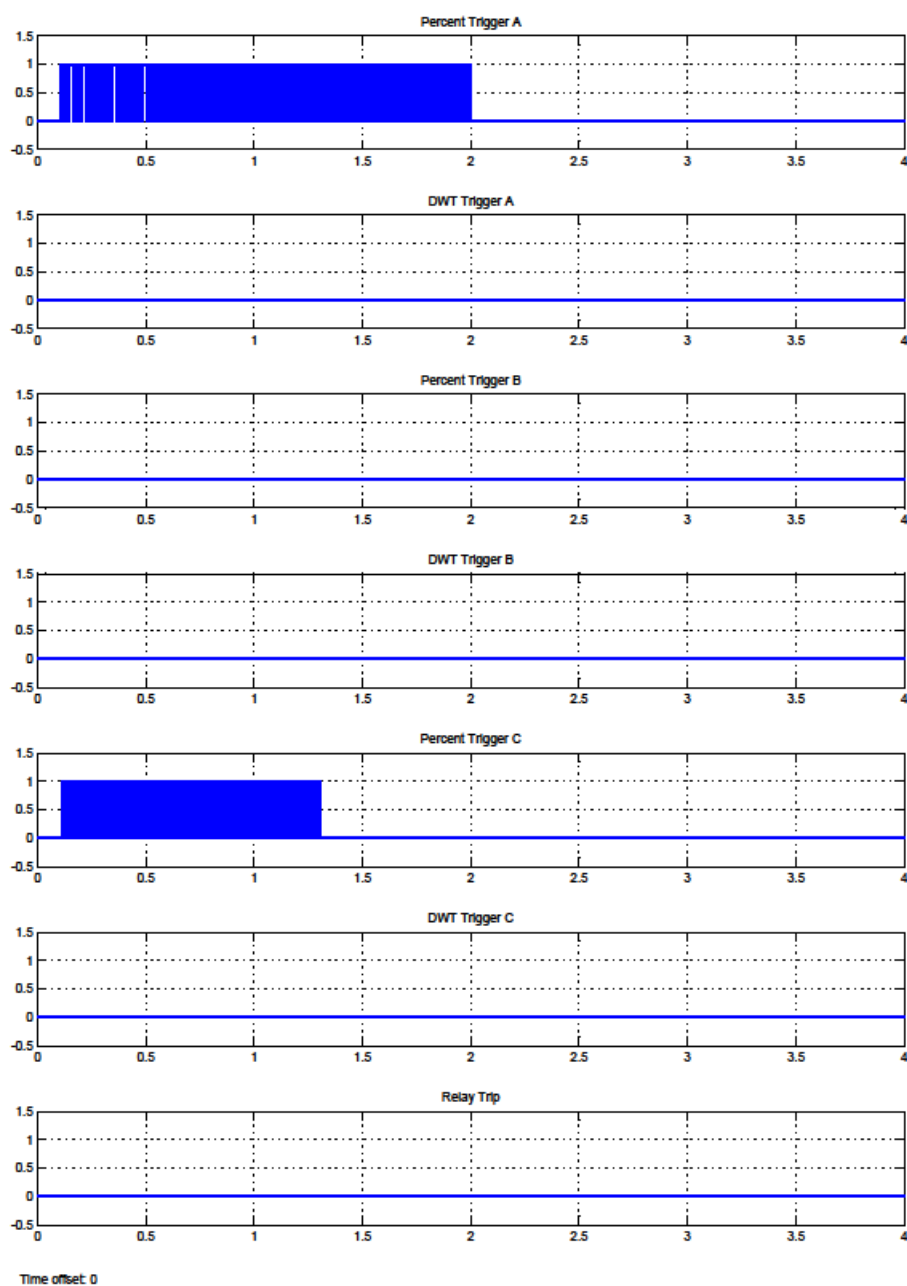


Fig. 5-84. Evolución de los disparadores para falta externa bifásica a tierra en el transformador 3.

#### 5.1.8.5. Falta interna trifásica.

Para la simulación de falta interna en el transformador se desactiva el bloque de faltas externas y se activa el bloque de faltas internas para falta trifásica. Como en los casos anteriores también está en carga el transformador.

La Fig. 4-85 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador para este caso. Se observa el elevado valor que adquieren las intensidades primarias de las tres fases así como el reducido valor de las intensidades secundarias. El efecto inmediato de este hecho es la presencia de una intensidad diferencial muy elevada en las tres fases.

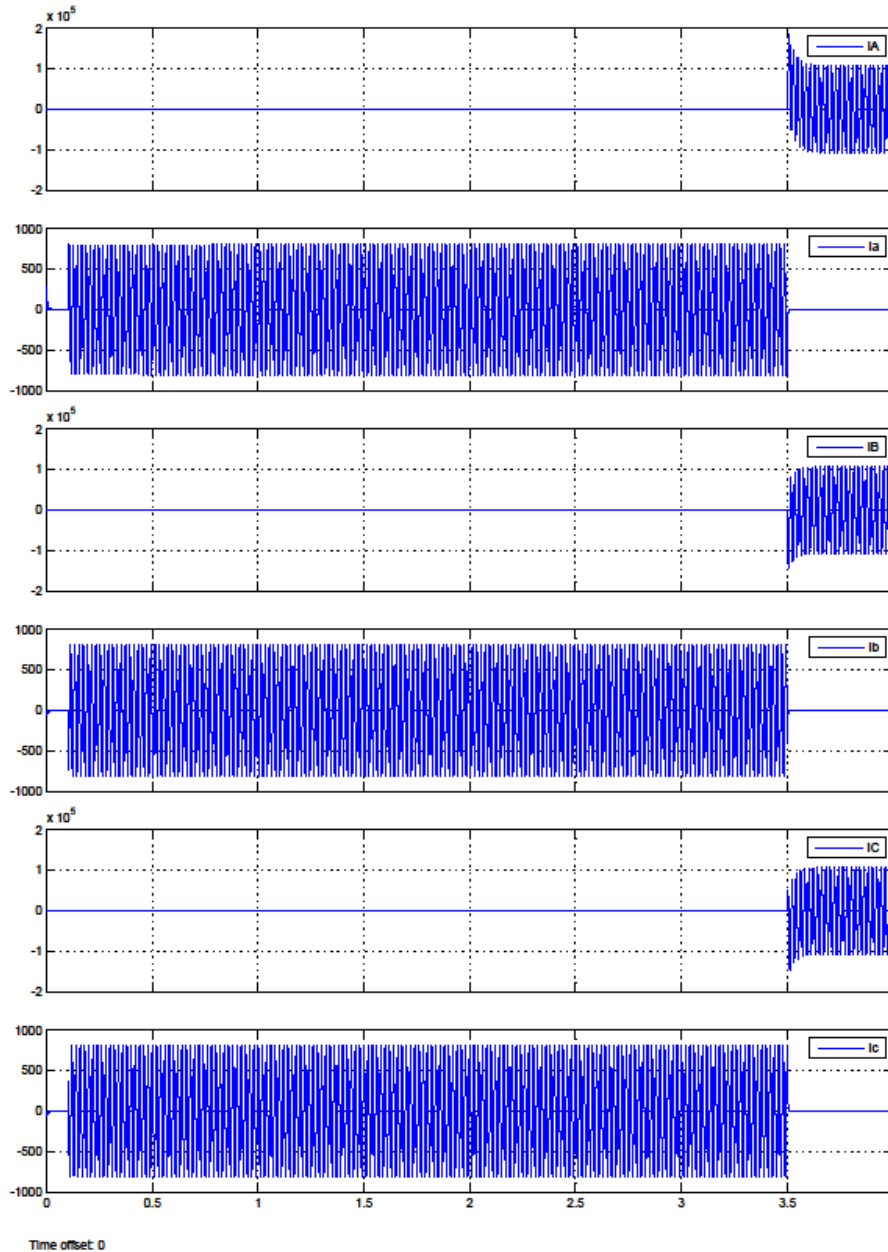


Fig. 5-85. Intensidades primarias y secundarias para falta interna trifásica en el transformador 3.

La Fig. 4-86 muestra las intensidades diferenciales en este caso. Se observa el elevado valor de las tres intensidades diferenciales.

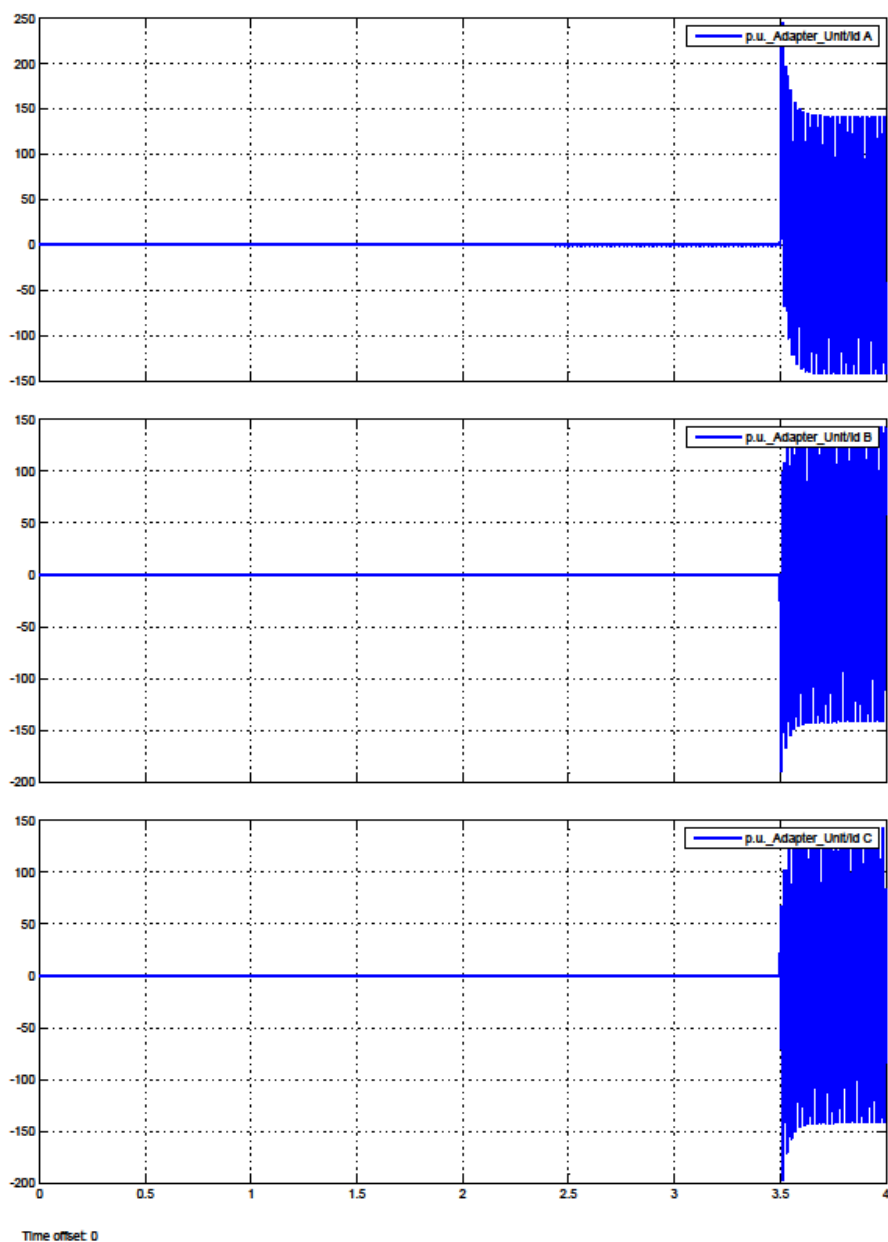


Fig. 5-86. Intensidades diferenciales para falta interna trifásica en el transformador 3.

La Fig. 4-87 muestra la evolución de los disparadores del relé en este caso. Se observa que el elevado valor de las intensidades diferenciales activa los disparadores de las unidades porcentuales y que al tratarse de una falta interna se activan los disparadores de las unidades DWT, lo que tiene como efecto inmediato el disparo del relé, actuación que es la correcta para una falta interna.

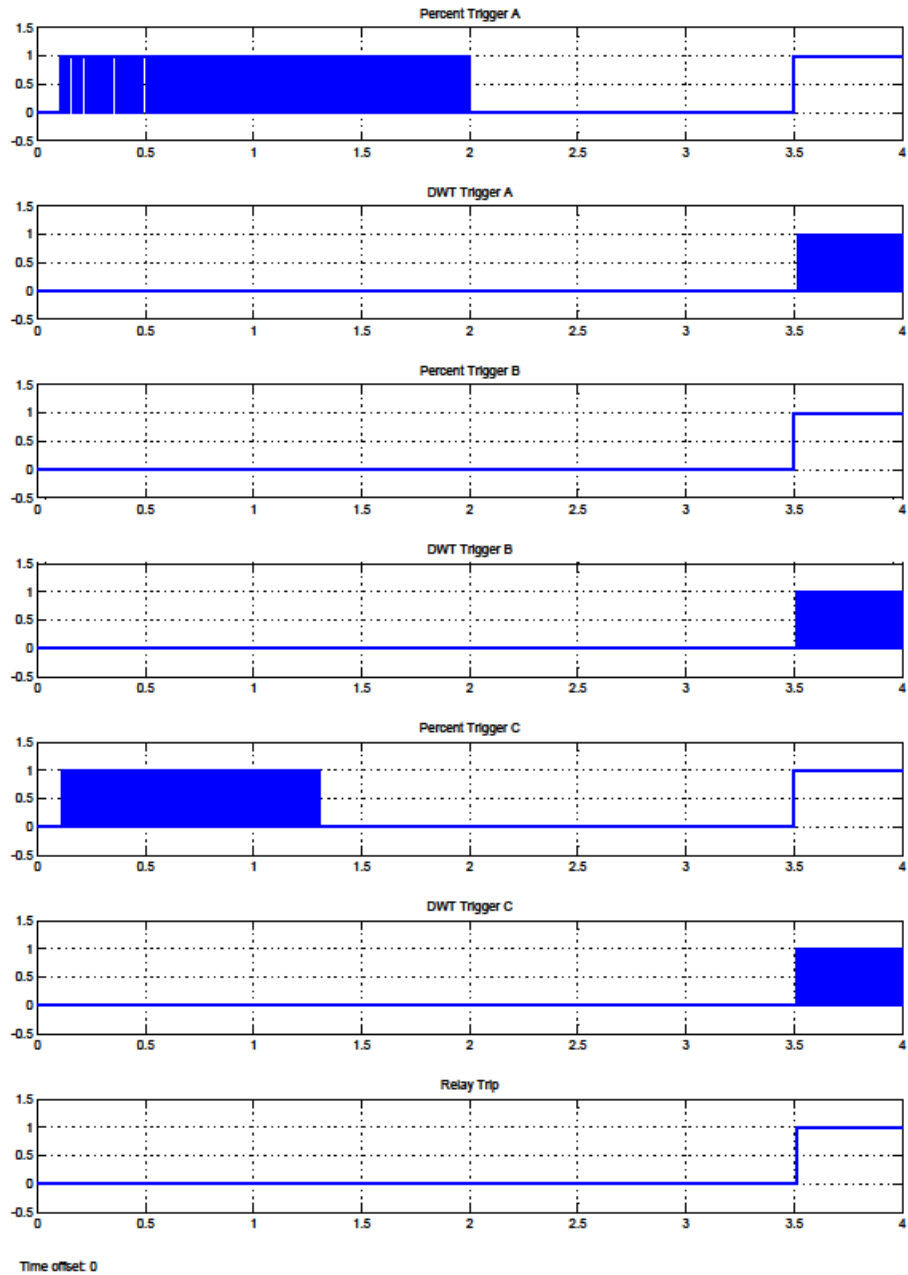


Fig. 5-87. Evolución de los disparadores para falta interna trifásica en el transformador 3.

La Fig. 4-88 muestra el detalle de los disparadores en el instante de producirse la falta, observándose que el tiempo de disparo de la protección es de 10 ms desde el inicio de la falta.

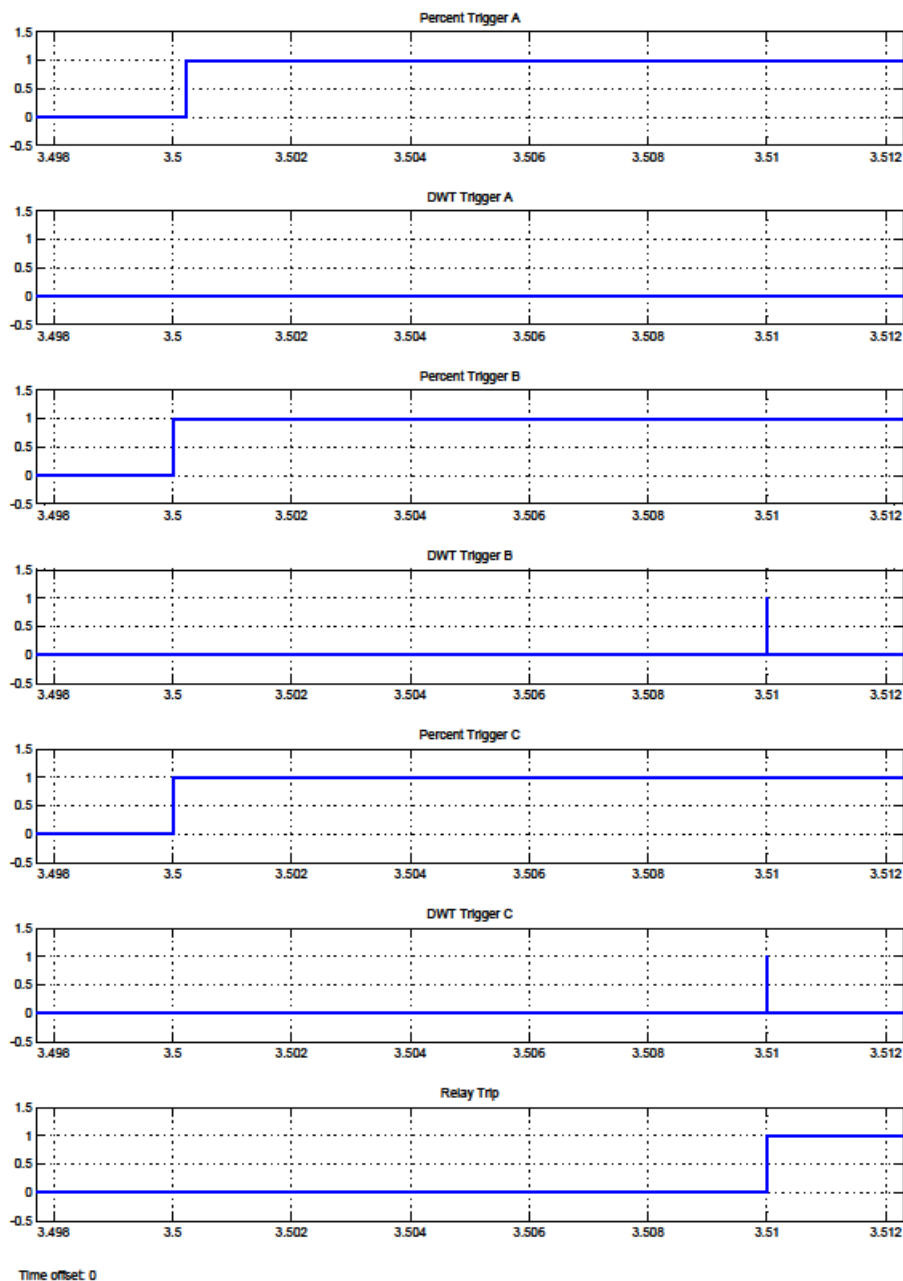


Fig. 5-88. Detalle de los disparadores de la Fig. 7-81.

#### 5.1.8.6. Falta externa trifásica.

Para la simulación de falta externa trifásica en el transformador se desactiva el bloque de faltas externas y se activa el bloque de faltas internas para falta trifásica. Como en los casos anteriores también está en carga el transformador.

La Fig. 4-89 muestra las intensidades primarias y secundarias del transformador para este caso. Se observa el elevado valor que adquieren las intensidades tanto primarias como

secundarias de las tres fases debido a la falta trifásica externa. Puesto que porcentualmente las intensidades primarias y secundarias de cada fase son prácticamente iguales, la intensidad diferencial resultante es de reducido valor.

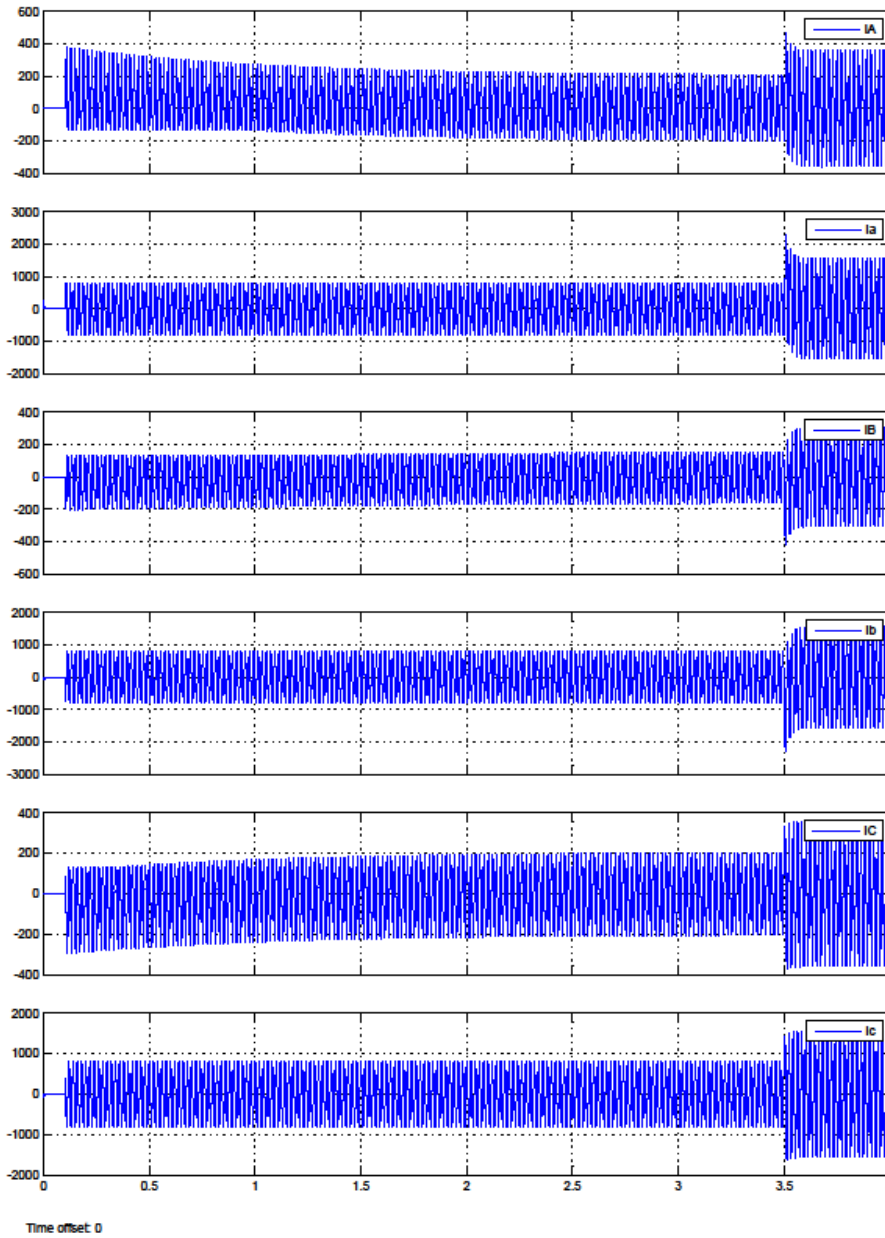


Fig. 5-89. Intensidades primarias y secundarias para falta externa trifásica en el transformador 3.

La Fig. 4-90 muestra las intensidades diferenciales para este caso. Se observa el reducido valor que tienen las mismas para las tres fases.

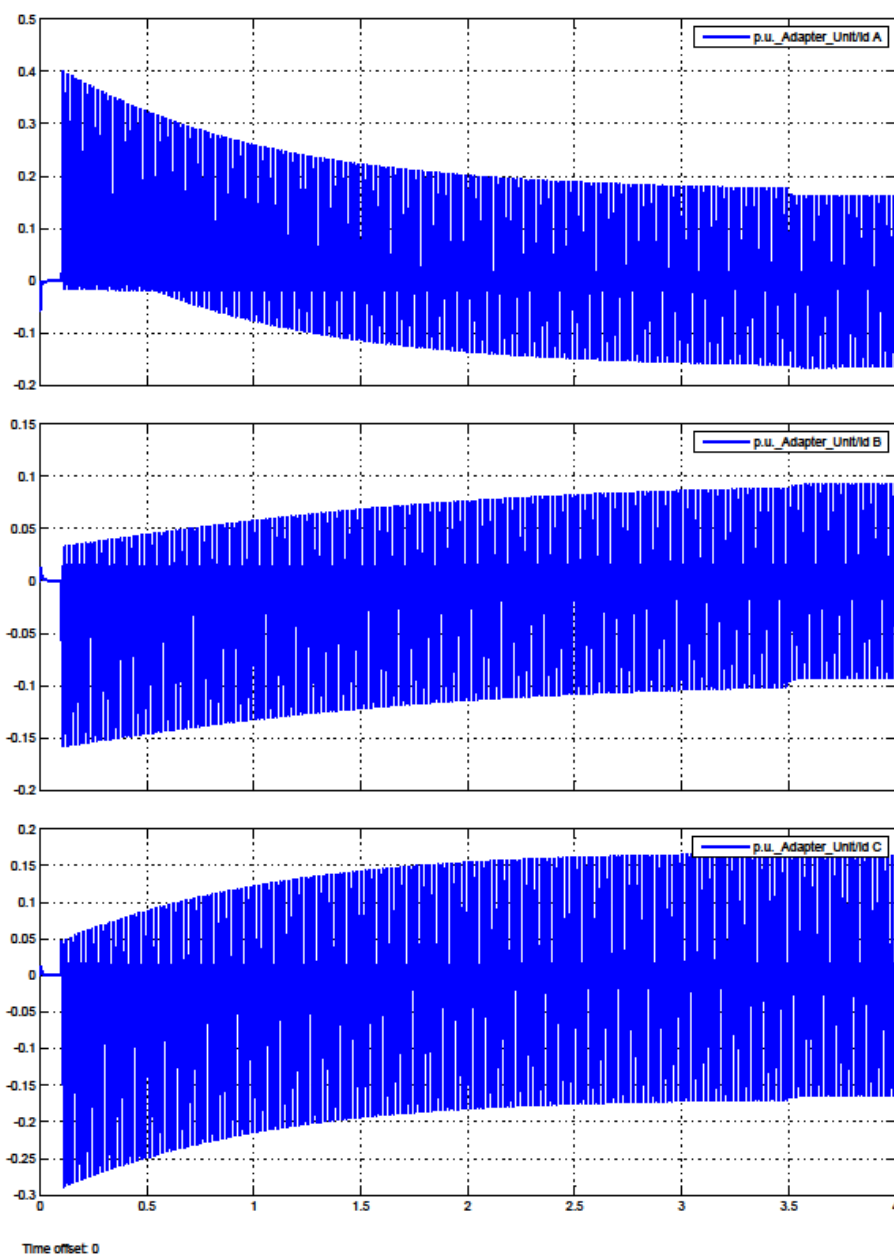


Fig. 5-90. Intensidades diferenciales para falta externa trifásica del transformador 3.

La Fig. 4-91 muestra la evolución de los disparadores del relé para este caso. El reducido valor de las intensidades diferenciales tiene como consecuencia que no se active ninguno de los disparadores de las unidades porcentuales, y por tanto tampoco se activan los disparadores de las unidades DWT asociadas ni el disparo del relé, lo cual es el comportamiento esperado del relé ante una falta externa.

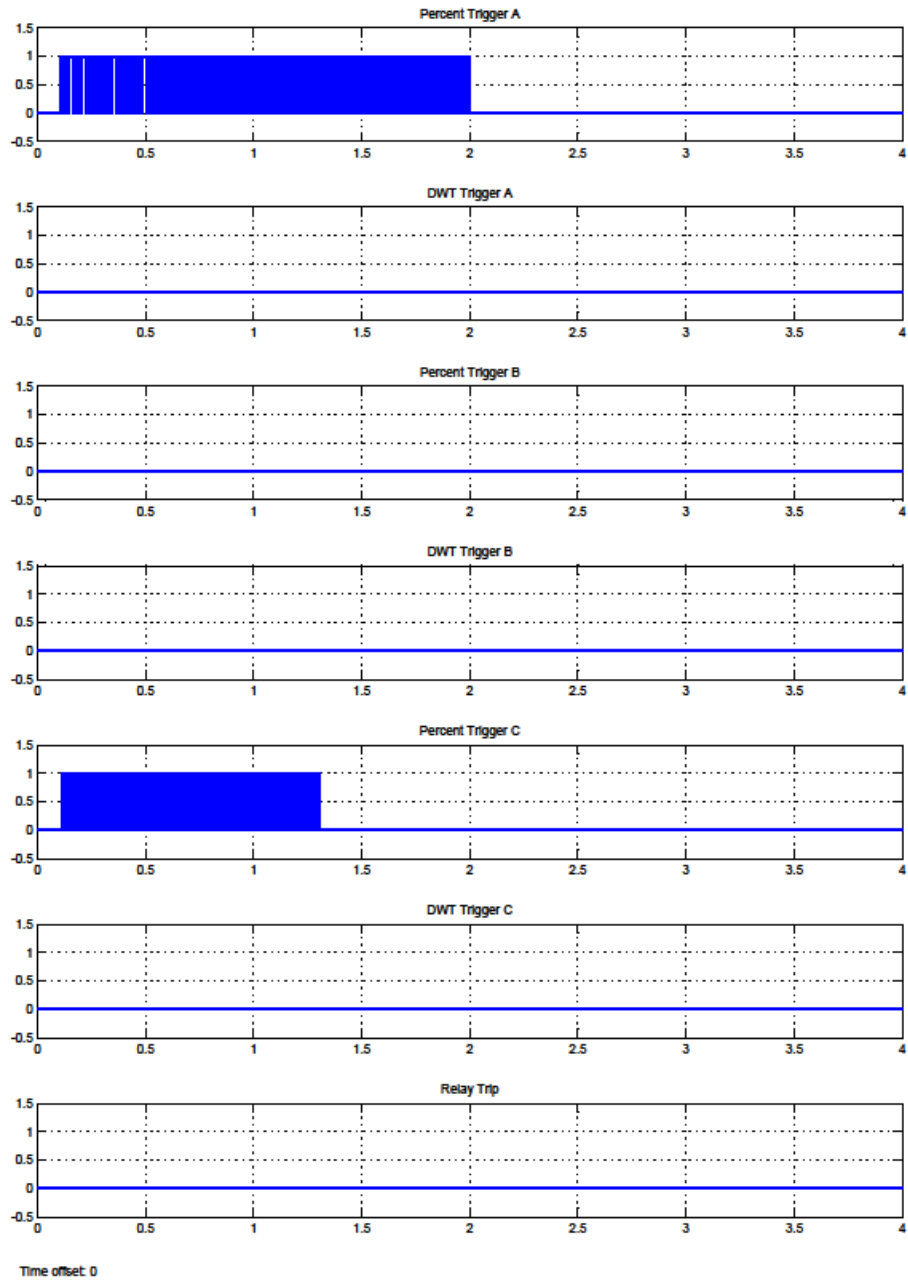


Fig. 5-91. Evolución de los disparadores para falta externa trifásica del transformador 3.



## **6. Conclusiones y futuras realizaciones.**

### **6.1. Conclusiones.**

Es esta tesis se ha desarrollado un modelo de relé diferencial digital para protección de transformadores de potencia que presenta un novedoso algoritmo de discriminación entre intensidades de conexión e intensidades de falta.

El modelo ha sido probado mediante simulaciones de diferentes situaciones de funcionamiento transitorias para diferentes tipos de transformadores comportándose en todos los casos de estudio de manera correcta.

El algoritmo de discriminación entre intensidades ha resultado ser eficaz y tiene como principal ventaja la sencillez de implementación en un relé de protección digital y la reducida carga computacional que precisa, resultando un tiempo de actuación del relé ante situaciones de funcionamiento del transformador muy bajo, generalmente de 20 ms.

Por tanto se pueden extraer las siguientes conclusiones de este trabajo:

- La implementación de un relé de protección diferencial para transformadores de potencia es factible sin precisar necesidades de computación elevadas que se alejen de los estándares actuales.
- La introducción de la transformada wavelet en el análisis de las intensidades diferenciales es un método que permite diferenciar intensidades de falta de intensidades de conexión sin necesidad de analizar el contenido en armónicos de dichas intensidades.
- La combinación de un sistema de análisis porcentual de las intensidades diferencial y circulante y un sistema de análisis de las intensidades diferenciales mediante transformada wavelet ha resultado ser muy eficaz para el correcto funcionamiento de una protección diferencial para transformadores de potencia de muy diversos tipos.

### **6.2. Futuras realizaciones.**

A partir del trabajo realizado en esta tesis han aparecido futuras líneas de trabajo que pueden ser desarrolladas, entre las que destacan:

- El análisis por intervalos de las señales procedentes del análisis wavelet puede ser mejorado para intentar reducir el tiempo de discriminación, y por tanto reducir sensiblemente el tiempo de actuación de la protección.
- Ampliar el análisis por transformada wavelet de las intensidades primarias y secundarias del transformador así como las intensidades circulantes resultantes podría permitir prescindir de los elementos porcentuales que en la actualidad incorporan los relés de protección diferencial para transformadores de potencia.
- El análisis mediante transformada wavelet de las señales de intensidad y tensión en un sistema de potencia podría permitir el desarrollo de sistemas de protección mucho más rápidos y fiables no sólo para transformadores de potencia, sino para otros tipos de elementos a proteger.

---

## 7. Bibliografía

---

- [1] Nikhil Kumar, Student Member, IEEE, Himanshu Gupta, Student Member, IEEE and S. P. Singh, Senior Member, IEEE, "Prototype Scheme for Differential Protection of Power Transformer using ANN".
- [2] P.L. Mao<sup>1</sup>, R.K. Aggarwal, "A wavelet transform based decision making logic method for discrimination between internal faults and inrush currents in power Transformers", *Electrical Power and Energy Systems* 22 (2000) 389–395.
- [3] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam, "Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform", *Electrical Power and Energy Systems* 27 (2005) 361–370.
- [4] Sharp, R. L. y Glassburn, W. E., "A transformer differential relay with second harmonic restraint". *AIEE Transactions*, vol. 77, part III, pp. 913-918, diciembre 1958.
- [5] H. Monsef, S. Lotfifard, "Internal fault current identification based on wavelet transform in power transformers", *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 1637–1645.
- [6] A. Rahmati and M. Sanaye-Pasand, "A fast WT-based algorithm to distinguish between transformer internal faults and inrush currents", *EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER* Euro. Trans. Electr. Power 2012; 22:471–490 Published online 18 March 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.576.
- [7] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, "Wavelet Toolbox for use with MATLAB",
- [8] Rahman, M. A., Jeyasurya, B., "A State of the Art Review of Transformer Protection Algorithms". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, nº 2, abril de 1988.
- [9] Sykes, J. A: y Morrison, I. F., "A Proposed Method of Harmonic Restraint Differential Protection of Transformers by Digital Computer". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, nº 3, mayo/junio 1972.
- [9] Dr. Julio Martínez Malo y Horacio Nelson Díaz, "Análisis de la teoría de ondículas orientada a las operaciones en ingeniería eléctrica", Madrid Julio 2002.

- [10] S. A. Saleh, Student Member, IEEE, and M. A. Rahman, Fellow, IEEE, “Modeling and Protection of a Three-Phase Power Transformer Using Wavelet Packet Transform”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005.
- [11] Larson, R. R., Flechsig, A. J. y Schweitzer, E. O., “The Design and Test of a Digital Relay for Transformer Protection”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, nº 3, mayo/junio 1979.
- [12] Degens, A. J., “Algorithm for a Digital Transformer Differential Protection Based on a Least-Squares Curve Fitting”. Proceedings IEE (Londres), vol. 128, parte C, nº 3 pp. 155-161, mayo de 1981.
- [13] Paulino Montane, “Protecciones en las instalaciones eléctricas, evolución y perspectivas”, Editorial MARCOMBO, 1993.
- [14] Prof. Alfred Holzt, Hans Teuchert y Francisco Planell, “La Escuela Del Técnico Electricista”, Tercera edición 1954, Editorial Labor, S.A. Barcelona – Madrid.
- [15] Víctor Marines Castillo, Gina Idárraga Ospina y Enrique Esteban Mombello, “Análisis de los modelos de transformadores para la simulación de la protección diferencial”, Ingenierías, Enero-Marzo 2010, Vol XIII, No. 46.
- [16] Rahman, M. A., Jeyasurya, B. y Gangopadhyay, A., “Digital Differential Protection of Power Transformers Based on Walsh Functions”. Transactions on CEA Engineering & Operating Division, vol 24, parte 3, document 85-SP-149. 1985.
- [17] T. Zheng, J. Gu, S. F., F. Guo, and V. Terzija,, “A New Algorithm to Avoid Maloperation of Transformer Differential Protection in Substations With an Inner Bridge Connection”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 3, JULY 2012.
- [18] Ali Hooshyar, Majid Sanaye-Pasand, Saeed Afsharnia, Mahdi Davarpanah, and Bashir Mahdi Ebrahimi, “Time-Domain Analysis of Differential Power Signal to Detect Magnetizing Inrush in Power Transformers”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 3, JULY 2012.
- [19] Stephane G. Mallat, “A theory for multiresolution signal decomposition: The Wavelet Representation”, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol II, No 7, July 1989.
- [20] Wiszniewski, A. y Kasztenny, B., “A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, nº. 2, pp.1786-1792, octubre 1995.
- [21] Zaman, M.R. y Rahman, M.A., “Experimental testing of the artificial neural network based protection of power transformers”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol.13, nº 2, pp.510-517, abril 1998.
- [22] IEEE Power Engineering Society. “IEEE Guide for Protecting Power Transformers” – IEEE Std C37.91. IEEE 2008

- 
- [23] Einval, C. H. y Linders, J. R., "A three-phase differential relay for transformer protection". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, nº 6, pp 1971-1980, noviembre 1975.
- [24] Elmore, Walter A., *Protective Relaying Theory and Applications*, Nueva York: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [25] Walter Schossig. "Introduction to the History of Differential Protection". Protection, Automation & Control World Magazine. Summer 2008; p. 71-76.
- [26] Blackburn, J. L., *Protective Relaying, Principles and Applications*, Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [27] Malik, O. P., Dask, P. K. y Hope, G. S., "Digital Protection of a Power Transformer". IEEE PES Winter Meeting, Nueva York, enero de 1976.
- [28] Rahman, M. A., Dash, P. K. y Downton, E. R., "Digital Protection of Power Transformer Based on Weighted Least Square Algorithm". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101 nº 1 pp. 4202-4209, noviembre de 1982.
- [29] Rahman, M. A. y Dash, P. K., "Fast Algorithm for Digital Protection of Power Transformers". IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 129, part C, nº 2, pp 79-85, marzo 1982.
- [30] Fakruddin, D. B., Parthasarathy, K., Jenkins, L. y Hogg, B. W., "Application of Haar Functions for Transmission Line and Transformer Differential Protection". Electrical Power y Energy Systems, vol. 6 nº 3, pp 169-180, julio 1984.
- [31] Jerasurya, B. y Rahman, M. A., "Application of Walsh Functions for Microprocessor-Based Transformer Protection". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol EMC-27, nº 4, pp 221-225, noviembre 1985.
- [32] Inagaki, K.; Higaki, M.; Matsui, Y.; Kurita, K.; Suzuki, M.; Yoshida, K.; Maeda, T, "Digital protection method for power transformers based on an equivalent circuit composed of inverse inductance". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, nº 4, pp. 1501-1510, octubre 1988.
- [33] Sidhu, T.S.; Sachdev, M.S., "Online identification of magnetizing inrush and internal faults in three-phase transformers". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, nº. 4, pp. 1885-1891, octubre 1992.
- [34] Youssef, O.A.S., "A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers". IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, nº1, pp.170-176, enero 2003.
- [35] Ma Jing, Wang Zengping, Xu Yan y Wu Jie, "A novel adaptive algorithm to identify inrush using mathematical morphology". IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp. 1020 - 1028, noviembre 2006.
-

- [36] Wang Zengping y Ma Jing, *“A New Adaptive Method to Identify Inrush Using Grille Fractal”*. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [37] Jazebi, S., Vahidi, B. y Hosseinian, S.H., *“A new stochastic method based on Hidden Markov Models to transformer differential protection”*. 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp- 179 – 184, 2008.
- [38] Aktaibi, A. y Azizur Rahman, M, *“Digital Differential Protection of Power Transformer Using Matlab”*. MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 1, chapter 10. Intech, septiembre 2012.
- [39] Graps, A, *“An Introduction to Wavelets”*. IEEE Computational Science & Engineering, summer 1995 pp. 50-61.
- [40] Kennedy, L. F. y Hayward, C. D., *“Harmonic-Current-Restrained Relays for Differential Protection”*. Electrical Engineering Transactions, vol. 57 pp. 262-271, mayo 1938.
- [41] Radunović, D. P., *“Wavelets. From Math to Practice”*. Springer-Verlag 2009.
- [42] *“Simulink: model-based and system-based design : modeling, simulation, implementation”*. The Mathworks, 2002.

## 8. Publicaciones derivadas de la tesis

---

Como consecuencia del trabajo realizado en esta tesis se ha realizado la siguiente aportación:

Sánchez Martos C. L., Jurado Melguizo F, Gómez González M., "*Percentage differential relay based on wavelet transform discrimination for power transformers protection*". *Electric Power Systems Research*. (presentado el 7-feb-2017; en revision a 7-jun-2017).

