



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE RELÉ DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL CON DISCRIMINACIÓN POR ARMÓNICOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA PARA SIMULINK

Alumno: Francisco Javier Ortega Quesada

Tutor: Prof. D. Carlos Luis Sánchez Martos
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Julio, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don Carlos Luis Sánchez Martos, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado:
Desarrollo y Validación de un modelo de relé de protección diferencial con
discriminación por armónicos para transformadores de potencia para Simulink,
que presenta Francisco Javier Ortega Quesada, autoriza su presentación para
defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Julio de 2015

El alumno:

Francisco Javier Ortega Quesada

Los tutores:

Carlos Luis Sánchez Martos

Índice

1. Introducción: Métodos de protección de transformadores de potencia.	3
1.1. Protección primaria contra sobretensiones.....	4
1.2. Protección de las instalaciones de refrigeración.....	4
1.3. Protección con relé Buchholz	5
1.4. Protección de sobrecargas.....	6
1.5. Protección del dispositivo de regulación.....	7
1.6. Protección diferencial	8
1.7. Protección diferencial de neutro	8
1.8. Protección de cuba	9
1.9. Protección de sobreintensidad	11
1.10. Protección de sobretensiones.....	13
1.11. Protección de sobreexcitación	13
2. Estudio teórico del funcionamiento de los relés diferenciales de protección de transformadores trifásicos de potencia.	14
2.1. Introducción a los sistemas de protección eléctrica.....	14
2.1.1. Definición	14
2.1.2. Características	14
2.1.3. Partes de una protección.....	16
2.2. Protección diferencial.....	17
2.3. Transformadores de intensidad.....	20
2.3.1. Correcta conexión de los transformadores de intensidad	21
2.3.2. Saturación de TI	21
2.4. Protección de porcentaje diferencial	22
2.5. Armónicos de corriente	25
2.5.1. Armónicos en transformadores.....	26
2.6. Corrientes de conexión	30
2.7. Sobreexcitación	31
2.8. Discriminación de corrientes por armónicos.....	32

3. Modelado matemático del relé.....	34
3.1. Introducción	34
3.2. Protección de porcentaje diferencial	36
3.3. Discriminación de corrientes por armónicos.....	38
3.4. Disparo del relé.....	41
4. Implementación y simulación del relé	44
4.1. Implementación del relé diferencial.....	44
4.2. Simulación	56
5. Análisis de los resultados de la simulación.....	91
Bibliografía	93

1. Introducción: Métodos de protección de transformadores de potencia.

Para definir y explicar la protección de transformadores de potencia, previamente debemos definir los tipos de transformadores que vamos a tratar en el presente trabajo. En él se describen las protecciones utilizadas para grandes transformadores, con una potencia nominal superior a 5 MVA. Para menor potencia, los métodos de protección más utilizados son los fusibles de protección contra cortocircuitos y un termómetro para detectar sobrecargas. Además del relé de gas o relé Buchholz que protege a la máquina de sobrecargas y fallos de aislamiento, y que se utiliza para grandes potencias, por lo que se verá más detalladamente más adelante.

Cualquier defecto o fallo que se da en un transformador puede producirse por:

- Causas externas: sobretensiones, sobrecargas, cortocircuitos en la red, variación de la frecuencia, armónicos de corriente o tensión, etc.
- Causas internas: defecto a masa, cortocircuito entre espiras o fases, defecto en el núcleo, fallo en cualquiera de los elementos del transformador, etc.

La naturaleza de estas perturbaciones puede ser:

- Fenómenos atmosféricos.
- Maniobras de acoplamiento de interruptores, seccionadores, contactores, etc.
- Fallos de aislamiento por desgaste y envejecimiento de los equipos.
- Inyección de armónicos por convertidores electrónicos.
- Cambios repentinos de la generación o de la demanda de potencia eléctrica.

Algunos daños que pueden ocasionar las perturbaciones son:

- Incendios.
- Explosiones.
- Electrocuciiones.

- Deformaciones en conductores y máquinas eléctricas.
- Destrucción de equipos eléctricos y electrónicos.
- Cortes prolongados de suministro eléctrico.

(Montané, 1993)

(Orille Fernández, 1993)

Las protecciones más usuales en grandes transformadores se definen a continuación:

1.1. Protección primaria contra sobretensiones

En los transformadores de gran potencia utilizados en el transporte de energía eléctrica, para protección contra sobretensiones se utilizan los dispositivos previstos en las instalaciones para la coordinación del aislamiento, pararrayos y descargadores.

Es necesario que cada línea conectada a una instalación esté equipada de pararrayos y si las conexiones interiores de la instalación son largas, los pararrayos deben estar conectados lo más cerca posible del transformador. Lo más usual, por razones económicas, es instalar pararrayos en el transformador y no en las líneas.

Se pueden producir, además, descargas en el borne neutro del transformador, si este trabaja a neutro aislado. Este fenómeno deriva en oscilaciones de tensión, por lo que se hace necesario instalar un pararrayos en el punto neutro.

(Montané, 1993)

1.2. Protección de las instalaciones de refrigeración

En los transformadores de gran potencia se precisa de refrigeración forzada, en caso de producirse un fallo en las instalaciones de refrigeración, la potencia del transformador se reduce de acuerdo con especificaciones facilitadas por el constructor y que aparecen en la placa de características.

Ante la falta mencionada anteriormente, se dispone de una alarma que avisa de una situación anómala y un automatismo (interruptor automático) que desconecte el transformador en un periodo de tiempo determinado.

(Montané, 1993)

1.3. Protección con relé Buchholz

Este relé se coloca en el tubo que une la cuba principal con el depósito de expansión, detectando cualquier fallo de aislamiento, rotura de conductores, contactos defectuosos, así como un posible calentamiento en el núcleo y sobrecargas en los bornes pasatapas del transformador. Detecta, además, las variaciones del nivel de aceite de la cuba, resultado de una fuga o calentamiento

El movimiento del vapor de aceite provocado por un calentamiento del transformador, genera el movimiento de dos flotadores: el primero de ellos es sensible a sobrecargas ligeras, y al descender de su posición original activa una alarma acústica; el segundo es sensible a sobrecargas más elevadas que provocan la formación de gas en la cuba principal, este gas empuja al flotador haciendo que se cierre el circuito de unos relés que controlan el disparo de unos disyuntores de entrada y salida del transformador.

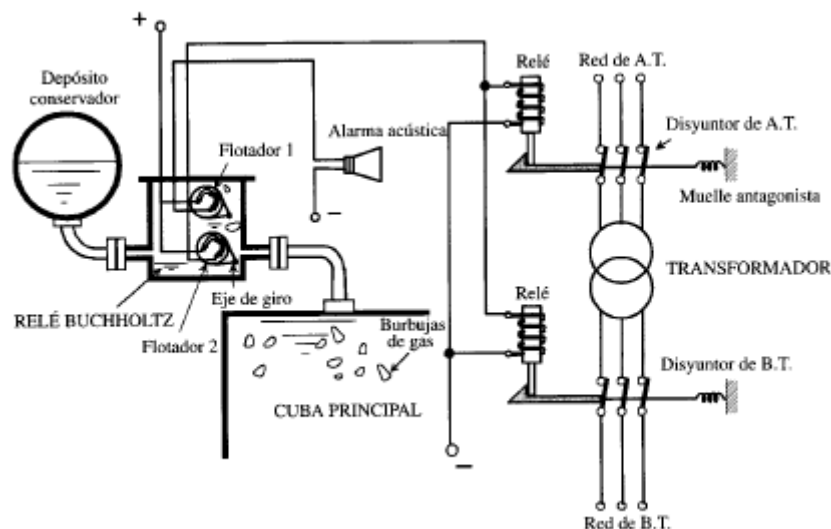


Ilustración 1.1

Este dispositivo es conocido como el relé selectivo por excelencia, ya que al no controlar ninguna magnitud eléctrica, solo el nivel de aceite, no interfiere con ningún otro elemento de protección.

Los defectos externos al transformador dan lugar a disparos intempestivos de este relé. Este problema es debido a que los sistemas auxiliares de refrigeración, ante un cortocircuito, se desaceleran y producen movimientos bruscos del aceite, lo que puede ser interpretado erróneamente por el relé Buchholz.

(Fraile Mora, 2003)

1.4. Protección de sobrecargas

Cualquier transformador debe ser capaz de soportar sobrecargas durante períodos cortos de tiempo. Es preciso controlar dichas sobrecargas con el fin de evitar el deterioro del aislamiento de los devanados.

La protección contra sobrecargas puede llevarse a cabo por medio de relés de sobreintensidad (esta protección se verá más detalladamente en el apartado 1.9.) a tiempo inverso, sin embargo, este tipo de relé no mide exactamente el calentamiento del transformador, sino la corriente que produce dicho calentamiento.

El dispositivo más utilizado como protección contra calentamientos excesivos producidos por sobrecargas es el relé de imagen térmica. En él se trata de emular el calentamiento que produce el paso de la corriente en el transformador, que sigue una ley exponencial entre unas temperaturas inicial y final:

$$T = T_f - (T_f - T_i) \cdot e^{-t/\tau}$$

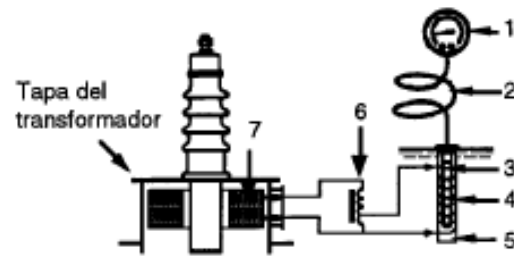
Donde:

τ = constante de tiempo térmica del transformador.

T_f = temperatura final

T_i = temperatura inicial

(Fórmula 1.1)



Relé de imagen térmica: 1 = Termómetro; 2 = Tubo capilar; 3 = Bulbo; 4 = Bobina calefactora; 5 = Recipiente; 6 = Autotransformador; 7 = Transformador de intensidad.

Ilustración 1.2

Se compone de una sonda termométrica colocada dentro de un tubo aislante, todo ello instalado en la cuba del transformador. El relé debe tener igual constante de tiempo térmica que el transformador, de esta forma el calentamiento que experimenta el relé es reflejo del calentamiento del transformador, por ello se denomina relé de imagen térmica. Una vez alcanza la temperatura ajustada previamente (valor indicado en las normas o recomendado por el fabricante) se produce la actuación del relé mediante su disparo o la activación de una alarma.

La constante de tiempo del relé es el tiempo en minutos que, partiendo del estado en frío del transformador y estando alimentado por la corriente nominal ajustada, se necesita para alcanzar el 63 % del calentamiento permanente. En relés electromagnéticos la protección térmica se obtiene a partir del calentamiento de un elemento bimetálico, producido por la corriente suministrada por los transformadores de intensidad.

(Suárez Creo, 2009)

(Orille Fernández, 1993)

1.5. Protección del dispositivo de regulación

Muchos transformadores de alta y media tensión disponen de regulación en carga. El dispositivo de regulación varía la relación de transformación mediante la modificación del número de espiras de uno de los arrollamientos, normalmente el de A.T.

Un cortocircuito en el dispositivo de regulación supone una falta interna en el transformador, por lo que puede ser detectada por las protecciones de la máquina. Sin embargo, el método de protección más usual ante este tipo de falta es el relé Buchholz dispuesto en la caja de regulación.

(Montané, 1993)

1.6. Protección diferencial

Esta protección se utiliza para detectar las faltas producidas tanto en el interior como en las conexiones externas del transformador. Se utilizan relés diferenciales que comparan las intensidades de los devanados del transformador, disparando cuando se detecta una falta.

Se tratará este tipo de protección posteriormente, de forma más extendida y desarrollada.

1.7. Protección diferencial de neutro

En ocasiones la protección diferencial es poco sensible para faltas monofásicas internas dado que la corriente de defecto disminuye a medida que la falta se acerca al neutro del transformador. Esta corriente es aún menor si se instala entre el neutro y tierra una impedancia limitadora. Es en estos casos cuando se utiliza la protección diferencial de neutro.

Esta protección se basa en la comparación de la corriente de neutro a uno y otro lado de la zona limitada por los transformadores de intensidad. Se necesitan 4 transformadores de intensidad de igual relación de transformación para llevar a cabo la protección.

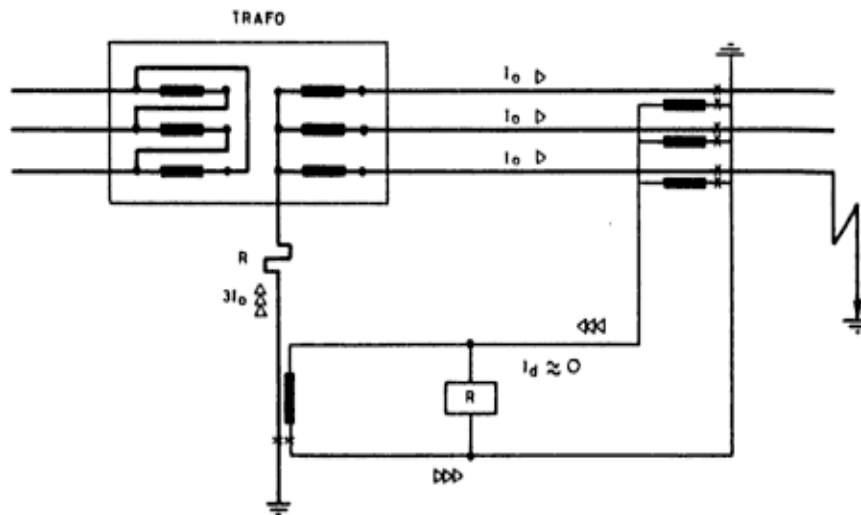


Ilustración 1.3

La corriente en el relé no es estrictamente nula en caso de no existir falta o de que esta sea externa. Para los T.I. de línea siempre existe, al menos, la suma de las corrientes de vacío, esta corriente sería nula si fueran equilibradas. Para el T.I. de neutro la corriente secundaria será nula, al menos a la frecuencia de red, en caso de no existir ningún fallo.

Gracias a esta disposición se pueden detectar faltas a tierra más débiles que las de la protección diferencial ordinaria. Por ello se debe ajustar la sensibilidad del relé para que no actúe con la suma de las corrientes de excitación de los T.I., con lo cual habrá siempre una parte del devanado próximo al neutro que quede sin protección.

(Suárez Creo, 2009)

(Montané, 1993)

1.8. Protección de cuba

Esta protección es conocida también como protección Howard y está concebida para detectar faltas a tierra internas (pérdida de aislamiento de una bobina respecto al núcleo) o externas (contorneo de un pasatapas) a través de la cuba del transformador y de su puesta a tierra.

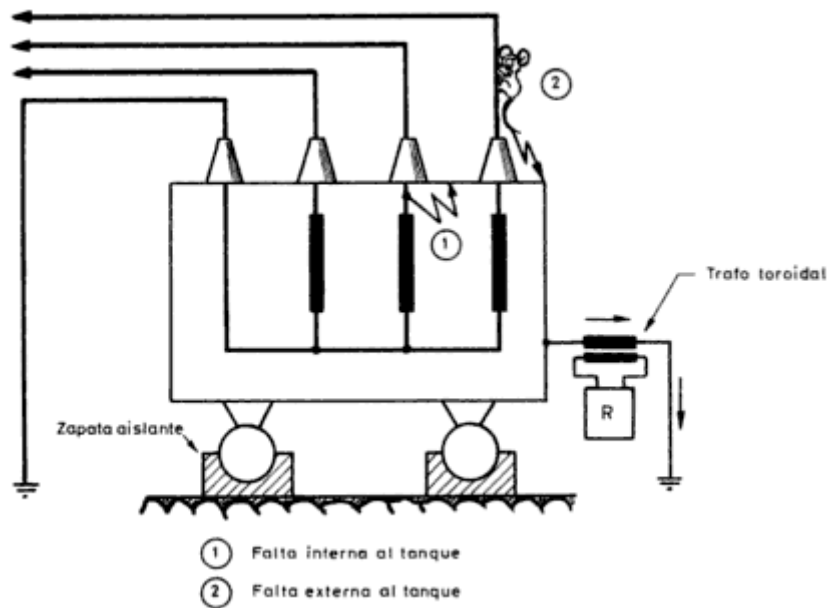


Ilustración 1.4

Consiste en disponer, en la unión a tierra de la cuba, de un relé instantáneo de sobreintensidad conectado al secundario de un transformador de intensidad toroidal. Para su correcto funcionamiento es necesario que la cuba esté aislada de tierra ya que de lo contrario la corriente de falta no pasaría enteramente por el T.I., cerrándose parcialmente hacia el neutro también a través del contacto con tierra de la estructura del transformador. Se necesita una resistencia de aislamiento con un valor mínimo de 25Ω entre el transformador y tierra. En caso de que el transformador disponga de ruedas, estas deberán estar aisladas de tierra mediante unas zapatas aislantes.

La actuación de esta protección no es señal de avería o fallo en la máquina, ya que cualquier contacto entre la cuba de la máquina y un elemento en tensión provocará la actuación de la protección. Animales tales como los roedores pueden provocar faltas de este tipo.

(Montané, 1993)

1.9. Protección de sobreintensidad

Para protección contra sobreintensidades generadas por sobrecargas o cortocircuitos se utilizan los relés de sobreintensidad temporizados. Existen tres tipos de relés de sobreintensidad según su característica de actuación tiempo – corriente:

- Característica normal inversa
- Característica muy inversa
- Característica extremadamente inversa

Este tipo de relé se rige según la fórmula de tiempo de intervención o disparo del mismo:

$$t = k \cdot \beta / ((I/I_A)^\alpha - 1)$$

Donde:

k = multiplicador de tiempos

I_A = valor de ajuste del relé

I = es la corriente vista en el relé

α, β = constantes para cada una de las características

(Fórmula 1.2)

Cuando el cociente I/I_A es superior a la unidad, el tiempo de disparo es infinito.

En la siguiente gráfica se muestran las características nombradas anteriormente, por lo general un mismo relé dispone de una familia de curvas de intervención de la misma característica que son paralelas entre sí y que se seleccionan por medio del valor de k .

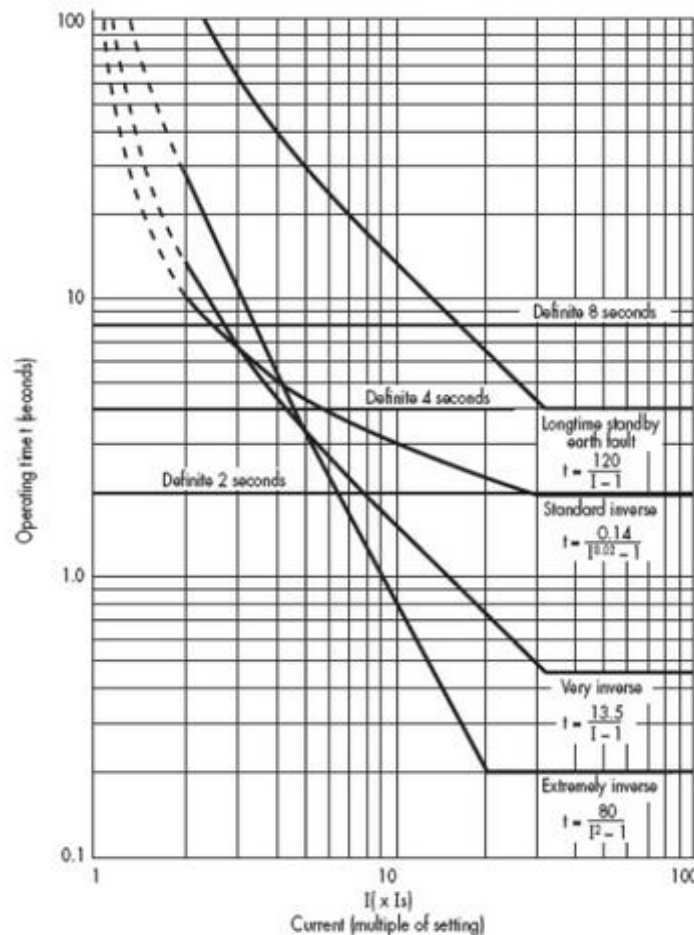


Ilustración 1.5

Este tipo de protección se instala siempre en el devanado del transformador que recibe la alimentación, ya sea de la red, de una barra o cualquier otra fuente. Se hace así para que su actuación sea tan rápida como sea posible ante faltas internas, mientras que para faltas externas se debe mantener la temporización suficiente para que el fallo sea eliminado por otras protecciones.

Para evitar disparos intempestivos ante faltas externas, este elemento se ajusta por encima de la máxima intensidad de cortocircuito I_{cc} .

(Suárez Creo, 2009)

1.10. Protección de sobretensiones

Se emplea en aquellos transformadores instalados en redes poco malladas, en las que existe posibilidad de sobretensión.

Se suele utilizar un relé con dos ajustes. Con el ajuste menor, el relé se dispara en un tiempo que varía entre 5 y 20 segundos. Si se supera el ajuste mayor, el disparo del relé se produce de manera instantánea.

(Montané, 1993)

1.11. Protección de sobreexcitación

Los transformadores están diseñados para funcionar permanentemente a un nivel máximo de excitación (flujo). Este nivel no debe superar un 110 % del flujo máximo para el que ha sido diseñado el transformador. El aumento del flujo máximo genera un aumento de la tensión, esto provoca un aumento de pérdidas en el núcleo de la máquina y un incremento importante de la corriente de excitación.

Sin embargo, el problema de mayor envergadura es el incremento del flujo de dispersión, el cual se deriva por caminos ferromagnéticos, como la cuba del transformador u otras partes metálicas como los pernos que mantienen unidas las chapas del núcleo. Estas partes se calientan debido a corrientes de Foucault, cuando el calentamiento es excesivo se produce la pérdida de aislamiento entre los pernos y la chapa magnética. Este fenómeno da origen a unas mayores pérdidas magnéticas y, en definitiva, al deterioro del núcleo.

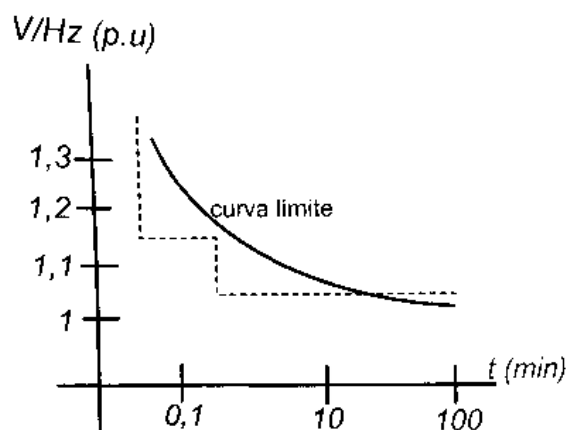


Ilustración 1.6

La capacidad para soportar una sobreexcitación se especifica por el constructor del transformador mediante una curva V/Hz – *tiempo*. La protección mide el cociente V/Hz , magnitud proporcional al flujo y que actúa en dos niveles con temporizaciones distintas.

(Iriondo Barrenetxea, 1997)

(Suárez Creo, 2009)

2. Estudio teórico del funcionamiento de los relés diferenciales de protección de transformadores trifásicos de potencia.

2.1. Introducción a los sistemas de protección eléctrica

2.1.1. Definición

Un sistema de protección eléctrica se puede definir como un conjunto de elementos y dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos encargados de realizar las operaciones de protección de una instalación. Su misión es vigilar y mantener de una forma eficiente y segura una zona determinada de una instalación eléctrica, como puede ser una subestación, una central o una línea eléctrica, en la que se incluye el equipo asociado a dicha zona de la instalación, como puede ser maquinaria eléctrica (transformadores, motores, generadores,...) y todo tipo de cargas.

El sistema de protección debe operar ante toda clase de perturbación que tenga lugar en un instante determinado y que ocasione un comportamiento anormal de la instalación. Esta situación no deseada produce el deterioro o incluso la destrucción de los equipos de la instalación eléctrica.

2.1.2. Características

El campo de las protecciones ha ido evolucionando a través de las nuevas tecnologías disponibles para adaptarse a los sistemas eléctricos. Es por ello, por lo que los requisitos y especificaciones de los sistemas de protección son cada vez más exigentes.

Toda protección debe cumplir una serie de requisitos fundamentales que se definen a continuación:

1. Selectividad. Se define como la capacidad que tiene una protección para reconocer y diferenciar cuando un defecto se ha producido dentro del sistema a proteger, estando, por lo tanto, en su zona de actuación, es entonces cuando debe actuar.
2. Sensibilidad. Característica que debe tener una protección para detectar una perturbación en todo momento y bajo cualquier condición, incluso en condiciones de defecto mínimo.
3. Rapidez. Es la característica que debe tener la respuesta de la protección desde que ocurre el defecto hasta que opera. Este factor tiene una gran importancia, ya que se puede conseguir la disminución de los daños ocasionados en los equipos por la falta.
4. Fiabilidad. Se trata de la probabilidad que existe de que el sistema actúe correctamente. Este término engloba otras dos características:
 - Seguridad. Se define como la probabilidad de que la protección no actúe cuando no tiene que hacerlo.
 - Obediencia. Es el término contrario al de seguridad, es la cualidad de una protección por la cual debe actuar cuando se le requiere.
5. Flexibilidad. Facilidad para adaptarse a modificaciones o ampliaciones futuras de la instalación.
6. Robustez. Se trata de la capacidad de una protección para soportar condiciones adversas durante un periodo de tiempo prolongado.
7. Precio. Es el factor fundamental para la viabilidad de un sistema de protección, hoy en día es el primer factor a tener en cuenta para llevar a cabo la protección de una instalación.

(Orille Fernández, 1993)

2.1.3. Partes de una protección

Las partes de las que se compone cualquier elemento de protección se definen, a grandes rasgos, a continuación:

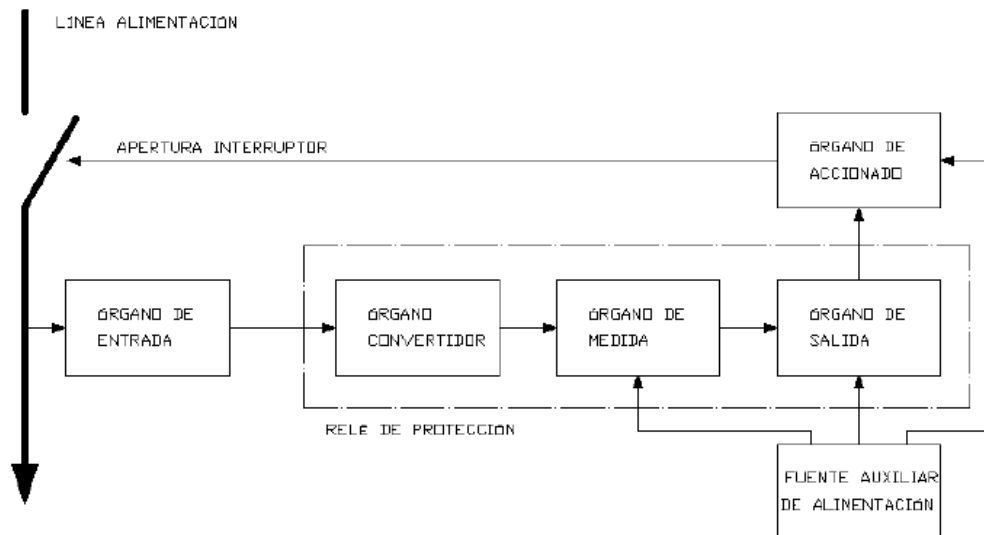


Ilustración 2.1

- ✓ Un **órgano de entrada** que detecta las señales eléctricas procedentes de una falta (corrientes y tensiones) y las transforma en valores adecuados para ser comparadas por el relé de protección. Por lo general, estos dispositivos son transformadores de corriente y tensión.
- ✓ El **órgano convertidor** que se encarga de acondicionar las señales previamente transformadas por el órgano de entrada para su tratamiento posterior. En ocasiones este elemento no forma parte del elemento de protección.
- ✓ El **órgano de medida** que es la parte más importante del dispositivo de protección, este elemento se encarga de decidir si las señales entrantes son señales procedentes de una situación anormal de funcionamiento (perturbación) y tomar la decisión de operación del sistema de protección. Esta decisión se realiza a través de algoritmos de cálculo por medio de elementos electromecánicos (relés electromecánicos), dispositivos electrónicos estáticos (relés electrónicos convencionales) o microprocesadores (relés electrónicos digitales).

- ✓ **Órgano de salida**, este bloque realiza la amplificación de la señal de operación de la protección procedente del órgano de medida y engloba los elementos necesarios para aumentar el número de señales de salida. Los órganos de salida clásicos son los contactores de mando y, actualmente, los elementos lógicos con sus correspondientes dispositivos de amplificación.

2.2. Protección diferencial

Este tipo de protección se basa en la primera Ley de Kirchhoff, o ley de los nudos, donde se define que la suma vectorial de las intensidades que pasan por un nudo es igual a cero.

El relé diferencial es un dispositivo electromecánico o electrónico que compara las corrientes existentes en ambos extremos de un circuito. En condiciones normales de operación no debe existir corriente alguna dentro del relé diferencial, la diferencia de corrientes será cero. Al producirse una falta dentro de la zona de protección, deja de existir un equilibrio entre las corrientes del elemento o circuito protegido, el relé cierra sus contactos y envía una señal de disparo a los interruptores, que desconectan la parte del circuito donde se produce la falta.

. El relé recibe las corrientes a comparar de los transformadores de intensidad que previamente han modificado su valor.

Estos dispositivos son uno de los sistemas de protección más utilizados tanto para transformadores, como para motores y generadores que trabajan en grandes centrales o subestaciones eléctricas.

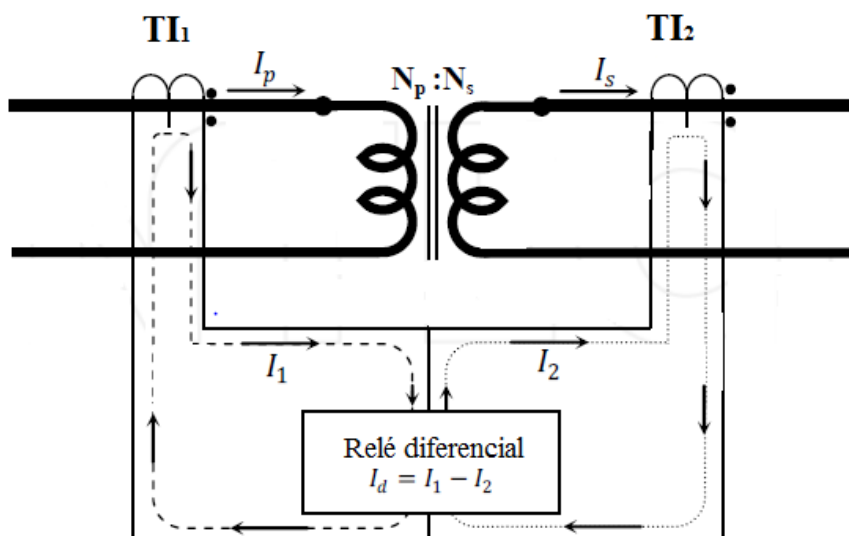


Ilustración 2.2

Tan importante es que el relé opere al detectar una perturbación en su zona de protección, como que no opere ante una perturbación externa a esta zona. Si la protección dispara al producirse una falta que no debería afectarle, abrirá los interruptores asociados a ella y desconectará su zona. Esto puede suponer una interrupción del suministro innecesaria, lo que genera un grave problema. Por lo tanto, una de las características fundamentales en toda protección, la fiabilidad, tiene especial importancia en la protección diferencial.

(Montané, 1993)

La nomenclatura utilizada en los esquemas eléctricos unifilares para la protección diferencial es 87, siendo la de la protección diferencial para transformadores 87T, según la norma ANSI.

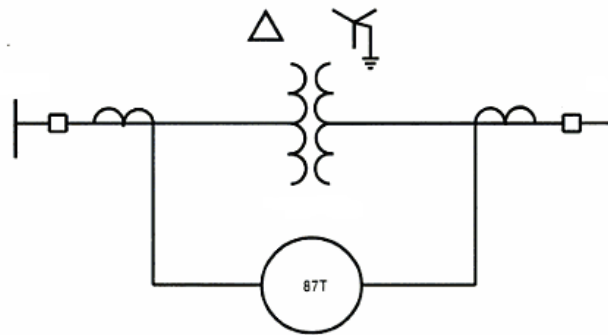


Ilustración 2.3

Existen dos tipos de protección diferencial:

- ❖ Protección diferencial longitudinal. Es el sistema más común, en él un relé mide la diferencia de corriente entre los extremos del elemento a proteger. En condiciones normales, donde no existe falta alguna, las corrientes serán idénticas y su diferencia será cero. El relé debe situarse en el punto medio del circuito principal que contiene el elemento protegido, para obtener una medición lo más correcta posible.

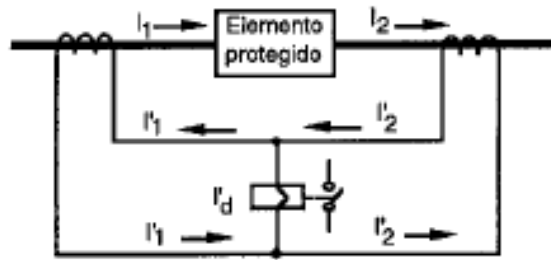


Ilustración 2.4

- ❖ Protección diferencial transversal. Este sistema no realiza la misma operación que una protección diferencial longitudinal, ya que no compara las corrientes de entrada y salida de un elemento. Su función es la de detectar un desequilibrio en las corrientes de dos circuitos que se conectan en paralelo.

Puede realizar la misma función que una protección longitudinal, sin embargo, presenta algunos inconvenientes. El más importante es que los interruptores de ambos circuitos deben disparar de forma simultánea, ya que no discrimina en cuál de los dos se ha producido la falta. Esta es la razón por la que no se suele utilizar en la protección de transformadores, pero si en la de generadores.

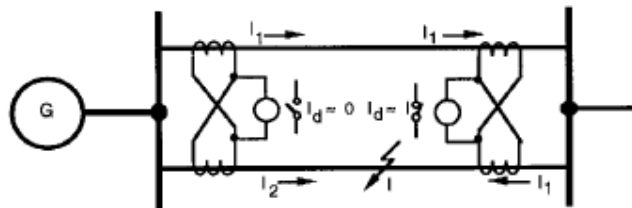


Ilustración 2.5

(Orille Fernández, 1993)

2.3. Transformadores de intensidad

Los transformadores de intensidad (TI) juegan un papel importante en este sistema de protección, son los órganos de entrada y se utilizan para reducir el valor de las corrientes del transformador, de manera que sus corrientes secundarias tengan un valor muy parecido y así poder compararlas con mayor facilidad. De esta forma los valores de intensidad se adecuan a las escalas de los instrumentos o aparatos que van a alimentar, normalmente el valor de intensidad que se desea es de 5 A, aunque existen casos en los que la corriente puede ser de 1 A.

Estos transformadores se conectan en serie con la línea por donde circula la corriente que se desea medir. Se puede considerar que trabajan en cortocircuito, ya que su impedancia tiene un valor muy bajo.

Hay que diferenciar entre transformadores de corriente destinados a alimentar aparatos de medida o de protección:

- TI para aparatos de medida. Están destinados a medir corrientes normales de funcionamiento, lo que no quiere decir que ante valores de intensidad anormales, den respuestas incorrectas.
- TI para aparatos de protección. Se destinan a aquellas situaciones en las que se pueden producir intensidades anormales provocadas por una falta o perturbación.
- TI mixtos. Combinan las características de los anteriores, por lo que se pueden utilizar para cualquier aplicación.

Es muy importante no dejar nunca un transformador de intensidad con su secundario en circuito abierto, debido a que la tensión en bornes tendría un valor elevado, lo que supone un peligro para las personas que manipulen el transformador. Por lo tanto, para cambiar la carga o aparato al que alimentan, se debe cortocircuitar el secundario o interrumpir el servicio de la línea

En cuanto a su construcción, se realiza montando los bobinados sobre una sola columna, primario y secundario juntos. Las chapas se cortan de una sola pieza sin juntas magnéticas con el objetivo de reducir la corriente de excitación, que puede generar errores en las mediciones.

Estos transformadores se definen según su potencia asignada en VA, este valor indica la carga máxima que se puede conectar sin que el error de medida sea muy elevado. Los errores que tienen los TI son:

- Error de relación. Define la desviación en porcentaje entre la corriente secundaria real y la ideal.
- Error de fase. Es la diferencia de fase entre los vectores de las corrientes primaria y secundaria, medida en minutos.

(Fraile Mora, 2003)

2.3.1. Correcta conexión de los transformadores de intensidad

La conexión triángulo – estrella en el transformador de potencia puede producir un desfase entre sus corrientes primaria y secundaria. Este problema se puede solucionar mediante la conexión correcta de los TI, para ello habrá que conectar en estrella el TI conectado en el lado de potencia con conexión en triángulo y viceversa, es decir, conexión en triángulo del TI para el devanado de potencia en estrella.

2.3.2. Saturación de TI

Uno de los factores que pueden afectar el correcto funcionamiento de la protección diferencial es la saturación en los transformadores de corriente. Se produce bien por la magnitud de las corrientes generadas en un cortocircuito o por la componente asimétrica en la onda de corriente. Esta saturación puede generar falsas corrientes diferenciales en el relé, lo que daría lugar al disparo incorrecto del mismo.

Una solución a este problema es la utilización de relés ultrarrápidos que decidan su actuación en pocos milisegundos después de haberse producido la falta, y así operar antes de que se produzca la saturación en los transformadores de intensidad conectados a él.

Otro problema derivado de la saturación de los TI es la aparición de armónicos de corriente. Estos armónicos distorsionan la forma de onda de intensidad y pueden llegar a confundir al relé.

Este tema se tratará más adelante en el apartado 2.5.

2.4. Protección de porcentaje diferencial

Los transformadores de intensidad se seleccionan de tal forma que concuerden con el transformador de potencia en cuanto a niveles de corriente. Se debe tener en cuenta, también, que los secundarios de los TI deben ser iguales. El problema surge cuando se quieren encontrar dos TI con distintas relaciones de transformación, pero iguales devanados secundarios, ya que en el mercado los transformadores están normalizados. Normalmente, el primario del TI tiene una sola espira y el secundario un número de espiras determinado por la relación de transformación, la cual es seleccionada en función del transformador de potencia.

Otro problema muy común en este sistema de protección es la existencia de transformadores de potencia con cambio de tomas, que pueden variar la relación de transformación para la que han sido seleccionados los transformadores de corriente. Esto puede provocar un aumento en la diferencia de corriente del relé ($I_d = I_1 - I_2$).

Este problema se soluciona con los relés diferenciales de tipo porcentual, en los que la pendiente o porcentaje de frenado de la característica del relé se puede ajustar en varios escalones. Las demás características del TI deben ser idénticas.

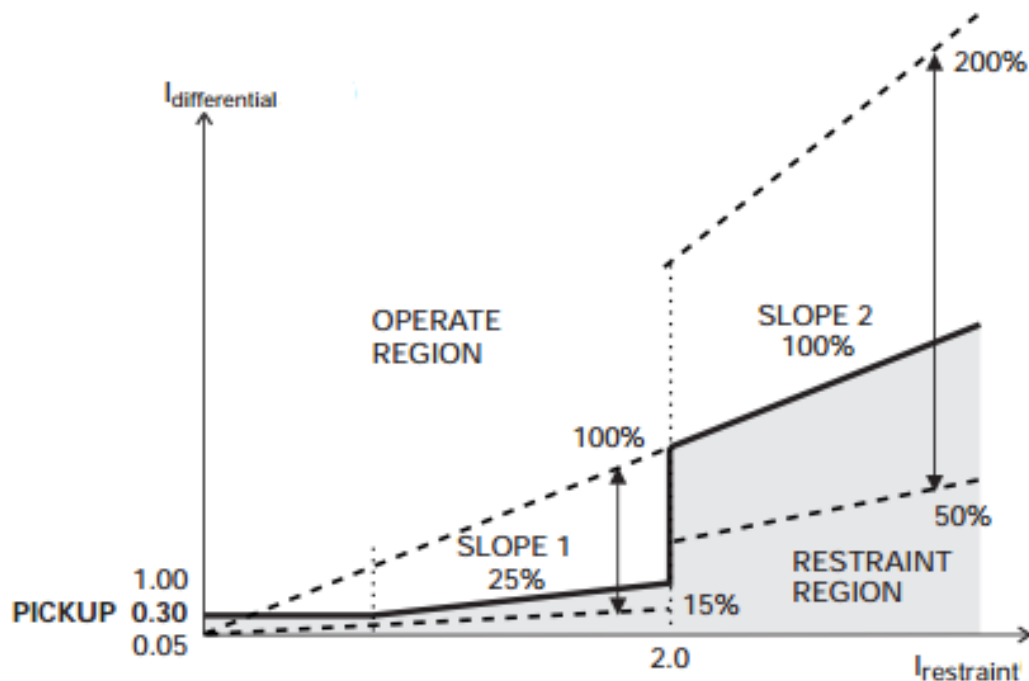


Ilustración 2.6

En la gráfica anterior se representa la característica de protección con porcentaje diferencial mediante dos corrientes, la de operación o diferencial, y la de restricción. El relé se dispara siempre que la corriente de operación sea mayor que un porcentaje de la corriente de restricción, lo que se representa con la ecuación:

$$I_{DIF} > SLP \cdot I_{RES} + I_{min}$$

Donde:

$$I_{DIF} = |I_1 - I_2|$$

$$I_{RES} = |I_1| + |I_2|$$

Siendo:

I_{min} = mínima corriente diferencial que debe existir en el relé (esta corriente es conocida como pick-up)

SLP = pendiente programada en el relé

(Fórmula 2.1)

Normalmente se representa la pendiente con un porcentaje que puede ser más o menos restrictivo. Si tiene un valor alto (80% por ejemplo) será menos restrictivo, tal y como se representa en la gráfica anterior, el área de disparo será menor y, por tanto, el relé tendrá menos probabilidad de disparar.

Los valores anteriores pueden ser modificados en los relés actuales existentes en el mercado, pudiendo ajustarse a las necesidades que el cliente desee. Las pendientes más usuales en relés diferenciales están entre un 20% y un 60%.

(Trashorras Montecelos, 2015)

(Katsikis, 2012)

Los modernos relés incorporan la probabilidad de fijar varias pendientes, como se comprueba en la ilustración 2.6, lo que hace que la protección tenga una exactitud casi perfecta. Existen, también, modelos que permiten comparar las corrientes de transformadores de tres devanados con exactitud.

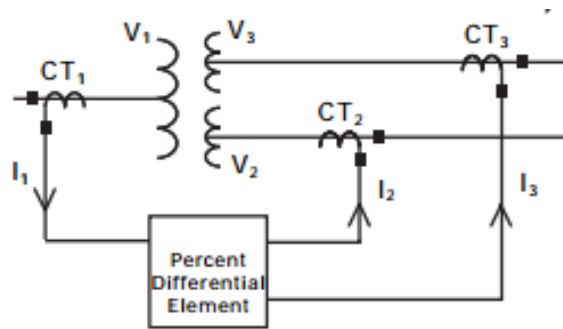


Ilustración 2.7

En este caso concreto se tendría que:

$$I_{DIF} = |I_1 - I_2 - I_3|$$

$$I_{RES} = |I_1| + |I_2| + |I_3|$$

(Fórmula 2.2)

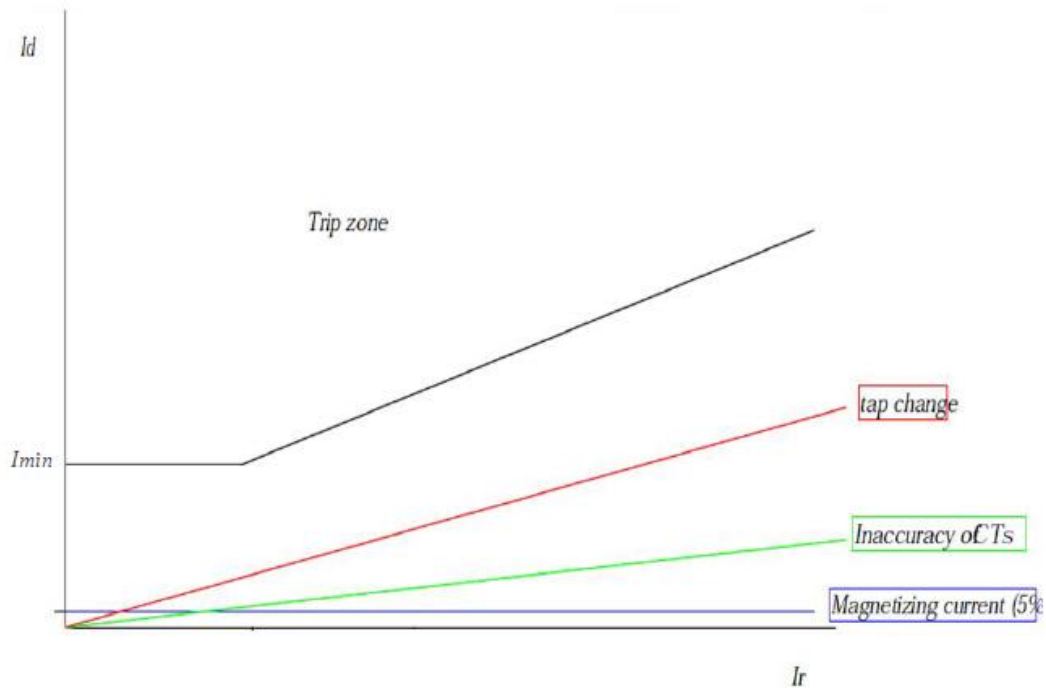


Ilustración 2.8

La línea azul representa el error causado por la corriente de magnetización, la verde el causado por la inexactitud de los transformadores de corriente, y la roja el error debido al posible cambio de tomas del transformador.

Tal y como se puede observar en la figura la característica porcentual soluciona el problema de inexactitud en los TI y de aquellos con cambios de tomas que puedan provocar falsos disparos de la protección. La pendiente de la protección está por encima de las representadas en color, reduciendo así el área de disparo (Trip zone). Esto hace que el relé dispare solo cuando exista una falta real en la zona protegida.

2.5. Armónicos de corriente

Los armónicos son distorsiones de las ondas senoidales de corriente y tensión de los sistemas eléctricos. Aparecen debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos y al uso de equipos que realizan conmutaciones en su operación normal.

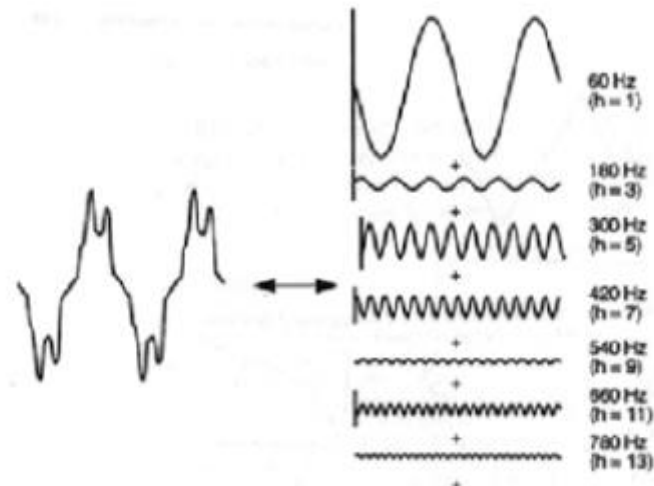


Ilustración 2.9

Este tipo de distorsión en la onda genera problemas como el aumento de pérdidas de potencia activa, errores de medición, disparo incorrecto de protecciones, deterioro de los aislamientos y, en general, provocan la disminución de la vida útil de los equipos que los sufren.

Se pueden adoptar diversas soluciones para este problema, tales como el diseño y utilización de filtros (activos, pasivos, condensadores,...) o la reducción de pérdidas manteniendo el nivel de armónicos por debajo de los límites permitidos.

La principal fuente de armónicos es la electrónica de potencia, aunque otra fuente importante de distorsión armónica son algunas máquinas eléctricas como las máquinas rotativas o los transformadores. En nuestro caso, trataremos con especial atención los armónicos generados por transformadores.

(Arrillaga y Eguíluz, 1994)

2.5.1. Armónicos en transformadores

En condiciones normales de funcionamiento, los transformadores apenas generan armónicos. Esta distorsión se produce durante los transitorios y cuando se generan sobretensiones significativas, lo que crea la deformación de onda en las corrientes magnetizantes.

Si consideramos el efecto de la histéresis en el núcleo transformador, se comprueba como la onda no sinusoidal de corriente magnetizante no es simétrica con respecto a su punto máximo. Esta distorsión está provocada por el tercer armónico de corriente que, con el fin de mantener una tensión de suministro aproximadamente senoidal, se dejará circular por medio de una conexión triángulo.

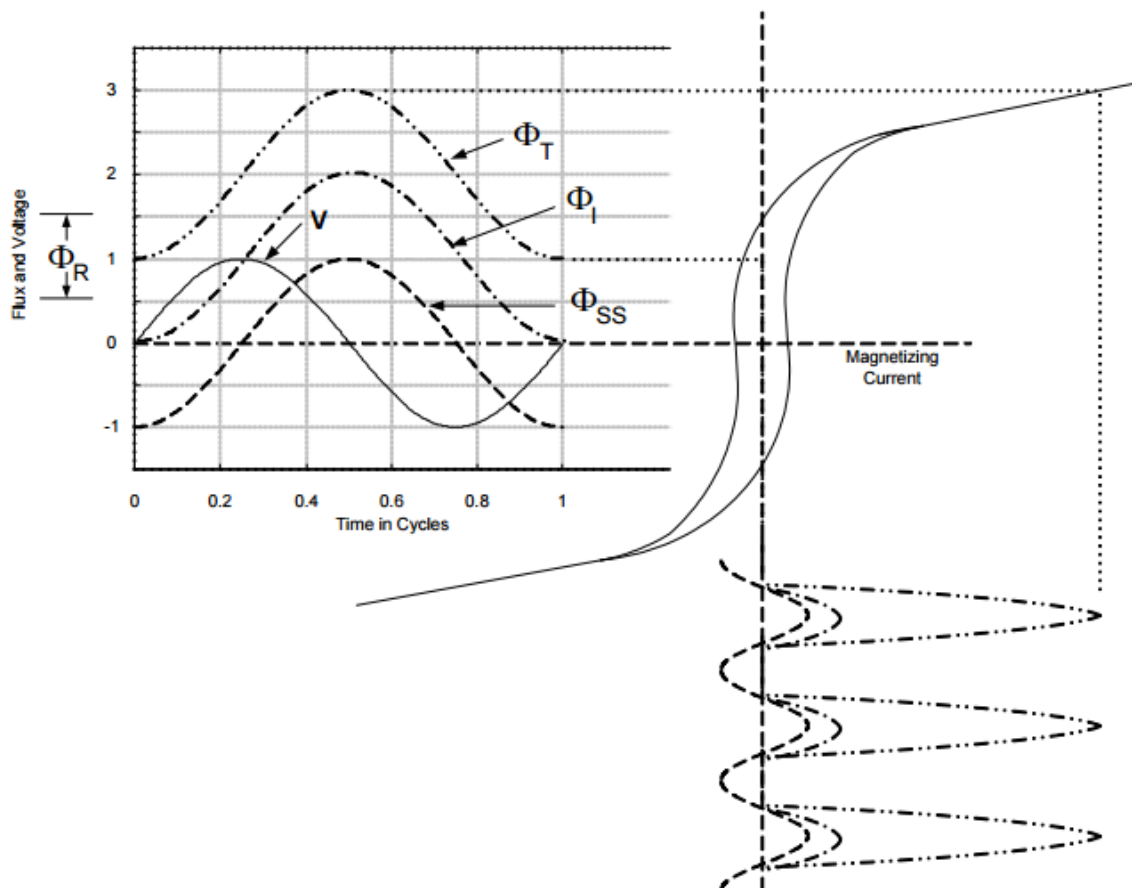


Ilustración 2.10

Los armónicos en la corriente magnetizante pueden producirse por diversas circunstancias como la saturación de un transformador por sobretensión o por corriente continua, o deberse a la corriente de conexión, como se verá a continuación:

1. Saturación por sobretensión.

Tal y como se ha explicado en el apartado 2.3.3., la saturación de un transformador, especialmente en uno de medida, puede suponer un grave problema en la protección diferencial. Esta saturación provoca, además, la aparición de armónicos.

Los transformadores se construyen aprovechando al máximo las propiedades magnéticas del núcleo. Cuando es sometido a una sobretensión, el núcleo aumenta su inducción provocando la saturación del transformador.

En este caso, la corriente de magnetización contiene armónicos impares que, obviando el tercer armónico absorbido en la conexión triángulo, serán de orden 5, 7, 9, 11, 13, etc.

2. Saturación por corriente continua.

Al conectar un transformador a una carga no lineal, la corriente de excitación contendrá armónicos impares. Si la carga produce una componente de corriente continua, la característica de magnetización y, por consiguiente, la corriente magnetizante pierden la simetría, lo que hace que la corriente de excitación contenga armónicos pares e impares.

Esta componente continua aparece, por ejemplo, cuando un transformador alimenta un rectificador de media onda.

La magnitud de los armónicos de orden bajo en la corriente de excitación aumenta de forma lineal con el contenido de corriente continua en el secundario del transformador.

3. Corriente de conexión.

Se trata de una corriente transitoria que puede generar la operación indebida de los sistemas de protección. Esta corriente tiene especial importancia en el presente trabajo, ya que será la corriente de conexión, o más concretamente, los armónicos presentes en ella, lo que diferenciará una corriente de falta de una que no lo es.

Al desconectar un transformador queda en el núcleo una inducción residual que incrementa su valor al volver a conectar la máquina, debido a esto, el núcleo del transformador precisa de valores excesivos de excitación. Este fenómeno da lugar a corrientes magnetizantes muy altas con un alto contenido de armónicos.

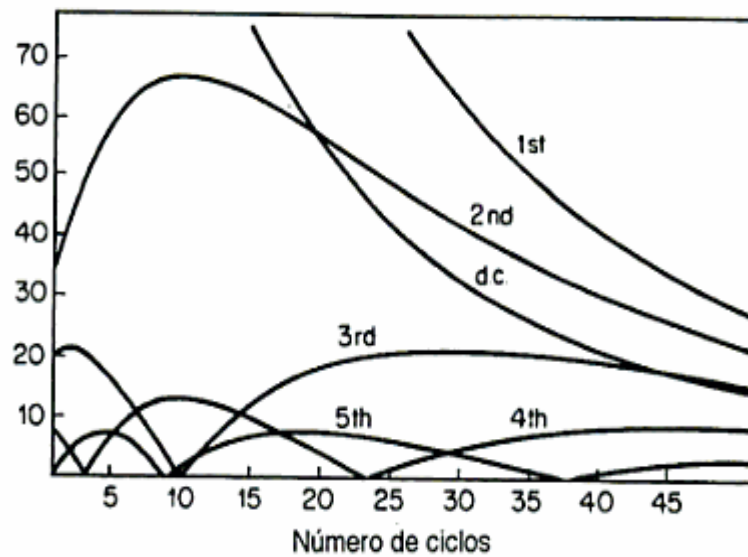


Ilustración 2.11

Como se observa en la ilustración 2.11, el contenido armónico varía con el tiempo y a medida que van pasando los primeros ciclos, se va reduciendo. Contiene todas las componentes armónicas, siendo los armónicos que más presencia tienen en la corriente de conexión el 2º y 3º, aunque es el 2º el más relevante, por lo que es el que se utiliza para discriminar las corrientes de conexión. Su valor es función del grado de saturación del transformador, estando su valor mínimo en torno al 20-30% de la corriente de conexión.

El problema que genera esta corriente es que alcanza valores próximos a la corriente de cortocircuito, estos picos de corriente no están presentes en la corriente nominal. Son esos picos que alcanza la corriente lo que confunde a la protección provocando un disparo incorrecto.

(Arrillaga y Eguíluz, 1994)

2.6. Corrientes de conexión

A la hora de alimentar el transformador que se va a proteger, se debe tener en cuenta la corriente de conexión o corriente de excitación. Esta corriente aparece solo en el primario del transformador, al alcanzar valores elevados muy superiores a la corriente secundaria, puede llegar a confundirse con una corriente de falta, como ya se ha definido anteriormente.

Existen dos soluciones a la hora de evitar este tipo de problema en la protección diferencial.

- La primera solución, que no se lleva a cabo por presentar importantes inconvenientes, consiste en provocar un retardo en el tiempo de operación del relé, en el momento en el que se pone en tensión el transformador a proteger. Una vez pasado ese tiempo de retardo, la corriente tendrá valores más bajos que no supongan un riesgo para el sistema. El inconveniente que presenta esta posible solución, es que en el tiempo de retardo del relé se puede producir una falta que no sería detectada por la protección y que pondría en peligro el sistema.
- La segunda solución, que es la que realmente se lleva a cabo, es la utilización de relés que puedan distinguir entre la corriente de falta y la de conexión. La diferencia entre ambas está en la presencia de armónicos de 2º orden en la corriente de conexión, estos armónicos no aparecen en la corriente producida por una falta interna o lo hacen de una forma distinta, como se verá en próximos apartados.
Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, la saturación del TI provoca la aparición del 2º armónico. Por lo que la protección no puede distinguir entre un 2º armónico debido a la saturación de uno de los TI o debido a una corriente de conexión. Al producirse, por ejemplo un cortocircuito debido a la saturación del TI, con una corriente que contiene segundos armónicos, la protección no actuará porque puede confundir esta corriente con la de conexión. Esto supone un gran inconveniente.
La solución está en la utilización de relés con frenado por armónicos, con este frenado, si la magnitud del segundo armónico excede un porcentaje de la componente fundamental de la corriente, el relé no se dispara ya que se tratará de una corriente de conexión o energización. El porcentaje viene definido por el fabricante.

(Harlow, 2007)

2.7. Sobreexcitación

El flujo magnético que aparece dentro del núcleo del transformador es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la frecuencia. Algunas condiciones, tales como sobretensiones o subfrecuencias, producen niveles de flujo magnético que pueden llegar a saturar el núcleo transformador. Estas situaciones pueden darse en cualquier sistema de potencia, por lo tanto, puede ser frecuente la aparición de sobreexcitaciones. Este fenómeno genera problemas como calentamientos, ruidos, vibraciones o incrementos en la corriente de excitación en el transformador.

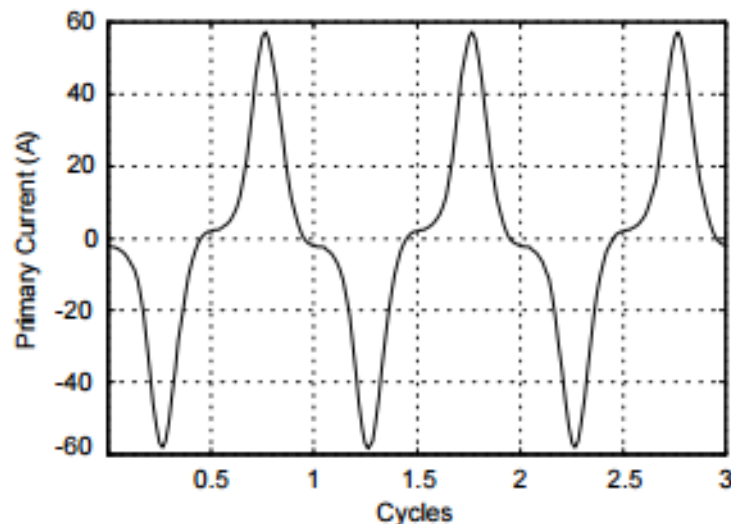


Ilustración 2.12

En la protección diferencial es complicado controlar la cantidad de sobreexcitación que el transformador puede tolerar. Una solución que se suele adoptar es la de incorporar una protección, además de la diferencial, que trabaje con la relación V/Hz (tensión/frecuencia) para evitar sobreexcitaciones. Esta protección ya se ha comentado en el apartado 1.11.

Se debe tener en cuenta que con la saturación del núcleo transformador aparecen armónicos de orden impar en la corriente de excitación, los armónicos predominantes son el tercero y quinto, y en menor medida el séptimo armónico. El tercer armónico es el más adecuado para analizar ya que puede alcanzar un valor de pico del 50% de la componente fundamental de corriente, sin embargo, es filtrado por la conexión triángulo de los TI. Por esta razón, es con el quinto armónico con el que se trabaja para discriminar una corriente de conexión por sobreexcitación de una corriente de falta.

(Harlow, 2007)

2.8. Discriminación de corrientes por armónicos

Con el objetivo de mejorar la protección diferencial, se realizaron numerosos estudios en los que se descubrieron que el contenido armónico de la corriente diferencial podía ayudar a diferenciar una corriente de falta de una corriente de conexión.

Las primeras publicaciones que trataban este tema datan de los años 30. En un principio se utilizaba la restricción por armónicos para la protección de barras en sistemas de potencia.

El método conocido como de bloqueo o discriminación por armónicos, comenzó a utilizarse en transformadores ya en los años 40, al observarse el alto contenido de segundo armónico en la corriente de energización. Primeramente se analizaba el segundo armónico y su presencia en la corriente para diferenciar la corriente de conexión y evitar la actuación de la protección. Más tarde, se empezaron a analizar las corrientes de conexión debidas a una sobreexcitación. Al descubrir la presencia de quintos armónicos en esta corriente, se comenzó a utilizar este fenómeno como restricción en la actuación de la protección.

Posteriormente, este método se mejoró para bloquear el funcionamiento del relé cuando el contenido armónico fuese mayor que un porcentaje determinado de la componente fundamental de la corriente. Siempre y cuando la condición anterior se cumpla, el relé no debe disparar ya que la corriente será de conexión.

Otro método utilizado es el de la comparación de la forma de onda, la intensidad que se da en el momento de la conexión cuando existe una sobreexcitación tiene una forma de onda característica.

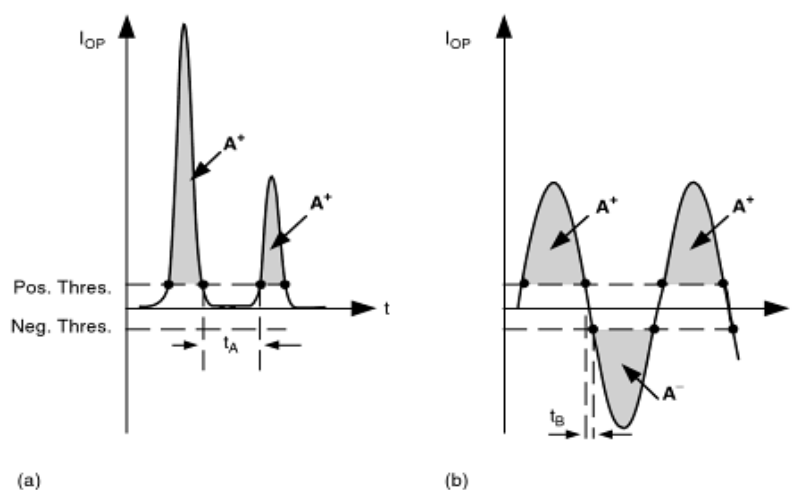


Ilustración 2.13

La ilustración 2.13.a es la de una corriente de conexión y la 2.13.b de una corriente de falta interna. El método consiste en comparar los tiempos entre umbrales de onda, como se observa en la ilustración. Este tiempo es menor en una onda de corriente de falta interna ($t_B < t_A$), lo que puede ayudar a distinguir esta corriente de una corriente de conexión y hacer que el relé dispare correctamente. Sin embargo, esta técnica falla al diferenciar una condición de sobreexcitación en el transformador.

Actualmente, para hacer más exacto el sistema de protección con restricción por armónicos se utiliza un intervalo de porcentajes. El segundo armónico debe ser mayor que un porcentaje de la componente fundamental y menor que otro, es decir, debe situarse entre dos porcentajes que lo limitan. De esta manera, cuando el 2º armónico no está dentro del intervalo definido, la corriente puede ser de cortocircuito. Ocurre de la misma forma con el armónico quinto, debe situarse dentro de un intervalo para que el relé reconozca una corriente de sobreexcitación y no opere.

En este trabajo se utilizará este método de protección para completar la protección diferencial porcentual, se conseguirá así evitar disparos intempestivos del relé y hacer que el transformador esté completamente protegido y cumpla, además, las condiciones asociadas a toda protección.

(Harlow, 2007)

(Katsikis, 2012)

3. Modelado matemático del relé

3.1. Introducción

El propósito del presente trabajo es el diseño de un relé diferencial para protección de un transformador de potencia, utilizando la herramienta de simulación Matlab/Simulink.

Simulink es una de las herramientas disponibles dentro del software matemático Matlab. Se basa en un entorno de diagramas de bloque para la simulación y diseño de sistemas, incorpora una biblioteca de bloques personalizables que facilitan la simulación.

El modelo que se va a implementar se divide en dos bloques principales:

- El primer bloque engloba la protección mediante característica porcentual a través de dos etapas de protección, una en la que se define la corriente mínima diferencial que pasa por el relé de protección y otra en la que se implementará la pendiente diferencial.
- El segundo bloque tiene como función el cálculo de armónicos y la comparación de estos con la componente fundamental de la corriente que atraviesa el primario del transformador, con ello se pretende discriminar la corriente de conexión o excitación, que puede producir la actuación indebida de la protección.

Ambas fases de la protección tienen como objetivo final la detección de una falta producida dentro del sistema a proteger y evitar el disparo intempestivo del relé a causa de faltas producidas fuera del sistema, corrientes de excitación o incrementos en la carga conectada.

Para ello se ha llevado a cabo un esquema de protección que se presenta en la siguiente página mediante un diagrama del algoritmo utilizado. La simulación mediante Matlab/Simulink se inicia con la entrada de las variables de corriente a medir en el relé, se medirán las intensidades de cada una de las fases del primario y secundario del transformador de potencia. Estas corrientes se utilizan para la detección de faltas mediante dos fases.

(Katsikis, 2012)

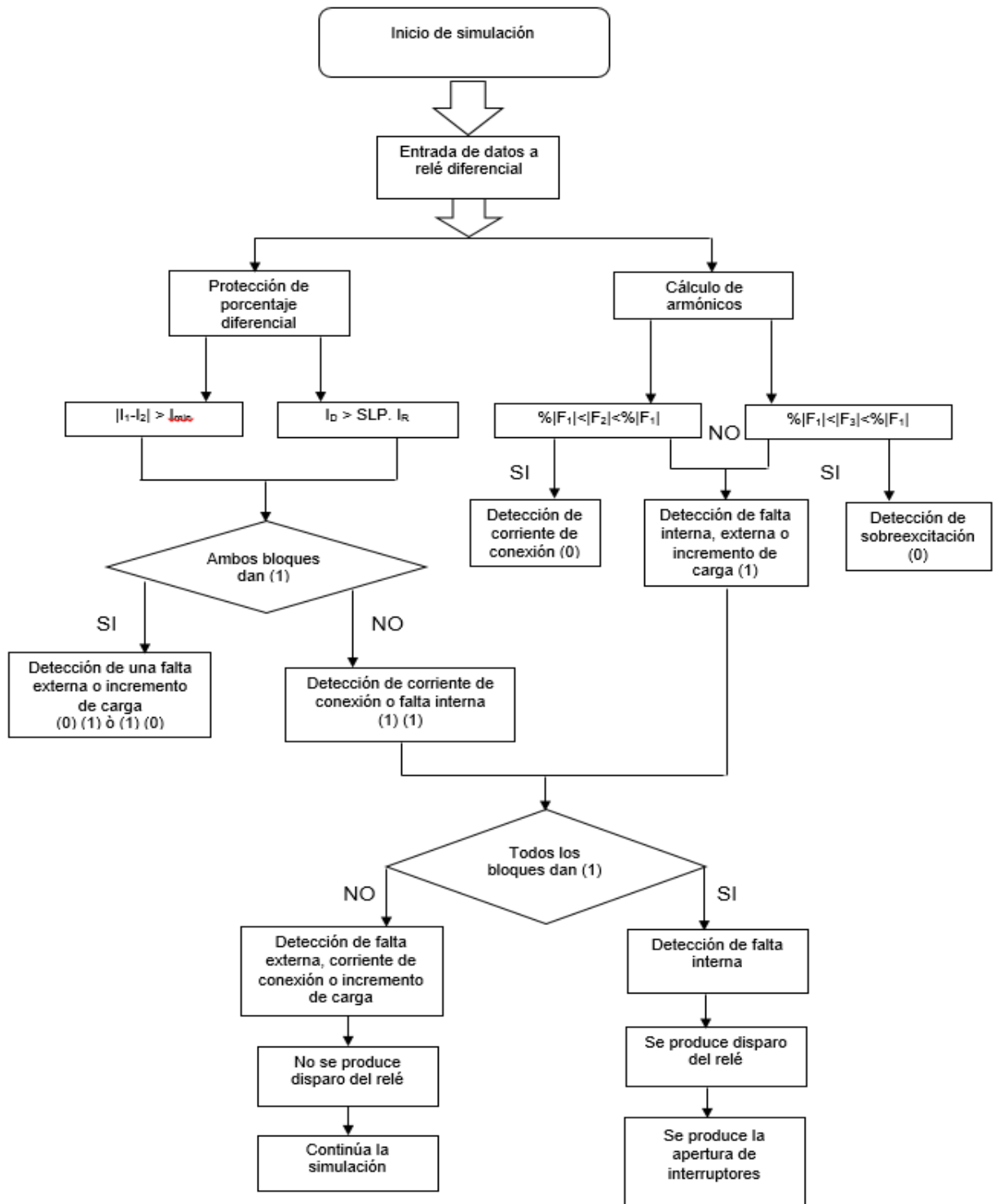


Ilustración 3.1

3.2. Protección de porcentaje diferencial

En la parte izquierda del esquema se representa la protección por porcentaje diferencial, que se realizará en dos etapas.

En la primera etapa se define la corriente mínima que puede atravesar el relé sin que éste dispare, es la llamada intensidad mínima diferencial o pick-up (I_{min}).

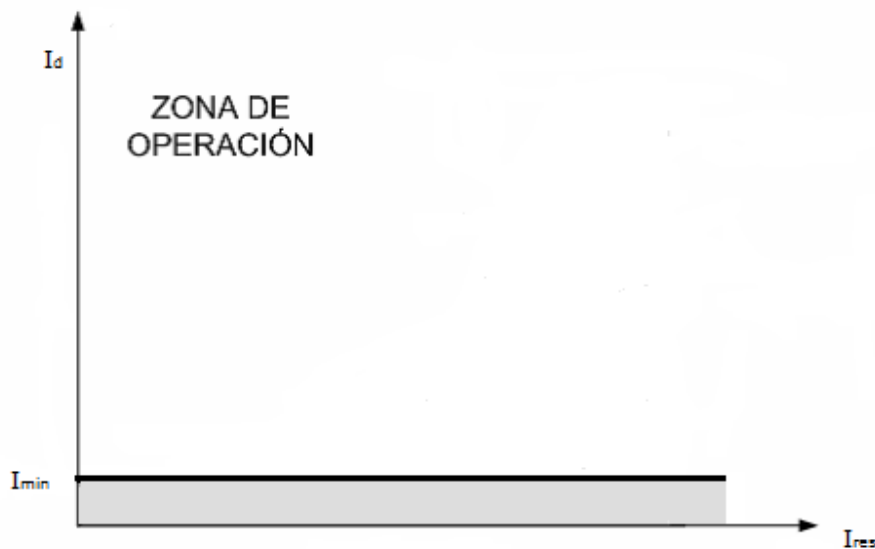


Ilustración 3.2

Primeramente, la corriente secundaria será modificada con el fin de conseguir que su magnitud sea del mismo orden que la corriente primaria. El relé a implementar medirá ambas corrientes y las restará. Esta diferencia de corrientes, en valor absoluto, no puede superar un valor prefijado en el relé que será nuestra I_{min} . Este parámetro puede ser modificado con total libertad en el modelo, como se verá más adelante. Se fija así la corriente mínima diferencial.

En la segunda etapa se calculará la característica de inclinación de la protección. Inicialmente se calcula la corriente de restricción (I_{res}), sumando los valores absolutos de las intensidades primaria y secundaria del transformador. A continuación, se multiplicará esta corriente por un valor que indica la pendiente o porcentaje que se quiera programar en el relé (SLP), este será otro valor modificable en la simulación con Simulink. La condición para que la protección dispare es que la corriente diferencial sea superior a la anterior, lo que se define con la ecuación:

$$I_{DIF} > SLP \cdot I_{RES}$$

(Fórmula 3.1)

Lo expuesto anteriormente queda representado en la siguiente gráfica:

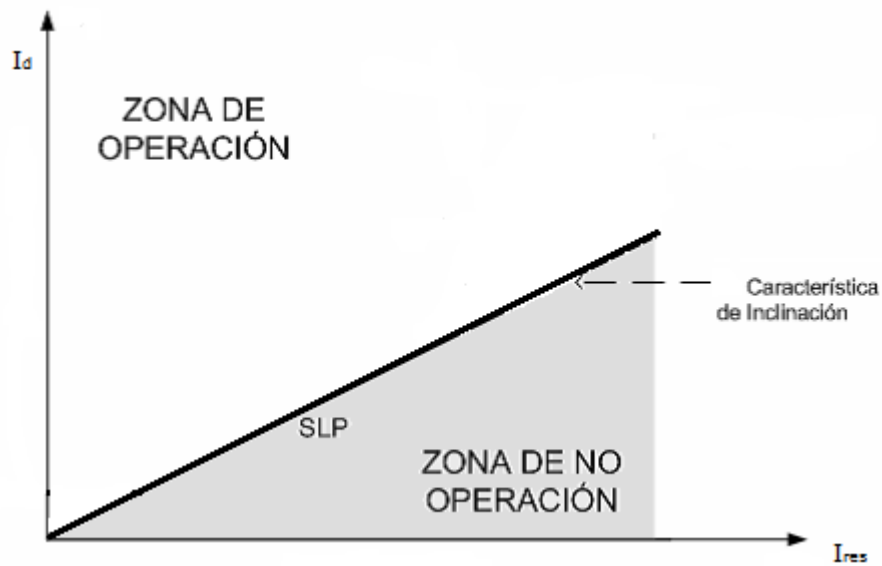


Ilustración 3.3

El bloque en conjunto define la característica que se representa en la siguiente imagen, donde se definen las dos etapas de la protección porcentual:

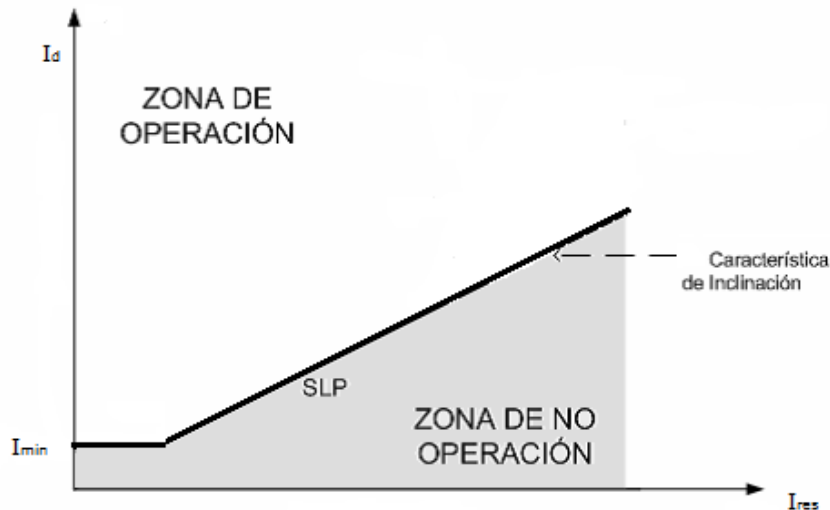


Ilustración 3.4

La zona donde la protección no actuaría se representa en sombreado. Si la intensidad diferencial entre el primario y el secundario del transformador protegido está por encima de la corriente mínima y de la característica de inclinación, estará en la zona de operación y se tratará de una corriente de falta.

Se define de esta forma la protección diferencial mediante característica porcentual, así queda protegido el sistema ante posibles faltas. Lo que no se consigue con esta protección es evitar los disparos intempestivos del relé ante corrientes de excitación en el arranque, para ello se implementará otra etapa de protección mediante armónicos.

3.3. Discriminación de corrientes por armónicos

El objetivo de este segundo bloque, representado en la parte derecha del diagrama de la figura, es discriminar las corrientes de falta de las de excitación o conexión.

Uno de los principales inconvenientes de la protección diferencial es la corriente de excitación, en el momento de la conexión aparece un pico de corriente diferencial que se disipa rápidamente, pero que puede generar un disparo intempestivo de la protección. Los relés modernos son capaces de discriminar y diferenciar una corriente de excitación, de una corriente de cortocircuito, este es propósito del modelo que se ha desarrollado con Simulink y que se va a presentar a continuación.

La corriente de conexión se caracteriza por contener una componente de armónicos de segundo orden, debido a la saturación que se produce en el hierro del transformador. Existen, también en el arranque, armónicos de tercer orden pero de menor magnitud por lo que no son de la misma utilidad que el segundo armónico. La amplitud de este 2º armónico se sitúa aproximadamente entre el 30% y el 80% de la componente fundamental de la corriente en el momento de la conexión o arranque, después el armónico se va disipando a medida que el sistema empieza a funcionar normalmente.

Al producirse una sobreexcitación en el transformador, en la corriente de conexión aparecen armónicos impares. Los armónicos predominantes son el tercero y el quinto. En los relés diferenciales utilizados en la industria es frecuente la utilización del 5º armónico para discriminar corrientes. En este trabajo, como se verá más adelante, no se han utilizado transformadores de intensidad para comparar corrientes. Estos TI tenían la ventaja de filtrar el tercer armónico mediante su conexión triángulo, por esta razón se utiliza el armónico quinto.

(Harlow, 2007)

Al no existir filtrado de tercer armónico, en nuestro caso, se utilizará este armónico en situaciones de sobreexcitación para discriminar corrientes de conexión.

El análisis de armónicos en la intensidad primaria del transformador se realizará mediante Fourier. Su función es la de calcular las componentes de frecuencia múltiples de la fundamental en cualquier onda periódica.

La Transformada Rápida de Fourier (conocida como Fast Fourier Transform o FFT) se puede utilizar para representar lo expresado anteriormente. Cada señal periódica $f(t)$ puede ser descompuesta a través de su seno y coseno, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f(t) = (a_0/2) + \sum C_k \cdot \cos(k\omega t) + S_k \cdot \sin(k\omega t)$$

Donde:

a_0 = componente de corriente continua de la señal

C_k, S_k = son los coeficientes de coseno y seno respectivamente, presentes en la señal.

(Fórmula 3.2)

Estos últimos coeficientes pueden ser desarrollados de la siguiente manera:

$$C_k = (2/N) \cdot \sum x(n) \cdot \cos(2k\omega t/N)$$

(Fórmula 3.3)

$$S_k = (2/N) \cdot \sum x(n) \cdot \sin(2k\omega t/N)$$

(Fórmula 3.4)

Las componentes armónicas de Fourier se pueden expresar como:

$$F_k = \sqrt{(S_k^2 + C_k^2)}$$

Donde:

F_k = componente armónica (cuyo orden es $k = 1, 2, 3, \dots, N$)

(Fórmula 3.5)

A través de la FFT se podrán representar en Simulink los armónicos presentes en nuestra corriente de conexión, más concretamente, se podrá comparar la componente de 2º armónico con la componente fundamental y sus submúltiplos. Siempre y cuando la magnitud de segundo armónico esté por encima del 30% y por debajo del 80% de la componente fundamental, querrá decir que la corriente es de excitación.

En el caso de una sobreexcitación, el tercer armónico tiene un valor aproximado del 30-40% de la componente fundamental de corriente. Por ello, se definirá un intervalo con un límite inferior del 5% y un límite superior del 50% de la componente fundamental.

En el modelo desarrollado se utilizarán bloques de Fourier, con ellos se analizará la corriente primaria del transformador a proteger y sus componentes fundamental y de segundo armónico para comprobar si se cumple la condición expuesta anteriormente. Si el segundo armónico está dentro de los márgenes previamente definidos, el relé no disparará ya que se trata de una corriente de arranque. Si no se cumple la condición, querrá decir que se ha producido una falta, en esta situación es la protección porcentual la que dilucidará si se trata de una falta externa o interna.

En este modelo los armónicos ya nombrados se compararán con unos porcentajes de la componente fundamental de la corriente, estos porcentajes pueden ser definidos previamente en el sistema del relé y hacerlos más o menos restrictivos. Normalmente, se utilizan dos porcentajes de la componente fundamental dentro de los cuales debe situarse el 2º armónico, y otros dos entre los que debe estar el 3º, pero existen también relés que utilizan solo un porcentaje inferior por encima del cual se debe situar el armónico. El relé modelado puede ser programado para ambas posibilidades.

(Katsikis, 2012)

3.4. Disparo del relé

En la parte final del esquema de la figura se representa la situación en la que la protección puede o no disparar.

Si la protección porcentual determina que la corriente diferencial está por encima de la corriente mínima y de la rampa prefijada estaremos ante una situación de falta interna o corriente de arranque. El relé solo dispara si se trata de una falta interna, por lo tanto es el bloque de discriminación por armónicos el que decide si existe corriente de arranque o no. Si el segundo y tercer armónico no están dentro de los límites fijados previamente, no estaremos ante una corriente de arranque o sobreexcitación, lo que significa que estamos ante una falta producida dentro del sistema protegido. Es entonces, cuando el relé dará la orden de disparo y apertura de los interruptores automáticos, con lo que el sistema del transformador de potencia queda desconectado del resto del circuito.

Para cumplir cualquiera de las condiciones mencionadas se utilizarán operadores lógicos o compuertas lógicas. Si la condición es verdadera, el bloque comparador envía una señal de 1, si es falsa será 0.

Las compuertas lógicas utilizadas en la implementación para la protección del transformador son:

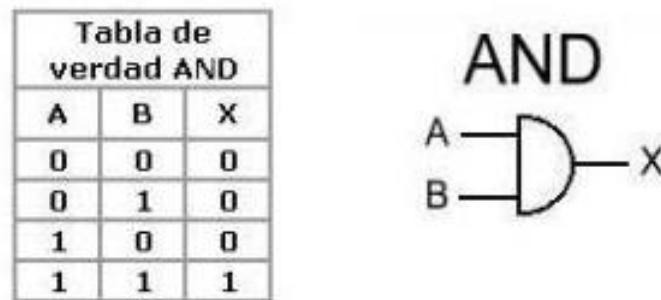


Ilustración 3.5

La compuerta AND produce una señal de 1, exclusivamente cuando ambas condiciones de entrada son 1. Si alguna de ellas o ambas son 0, la salida de la compuerta será 0 también.

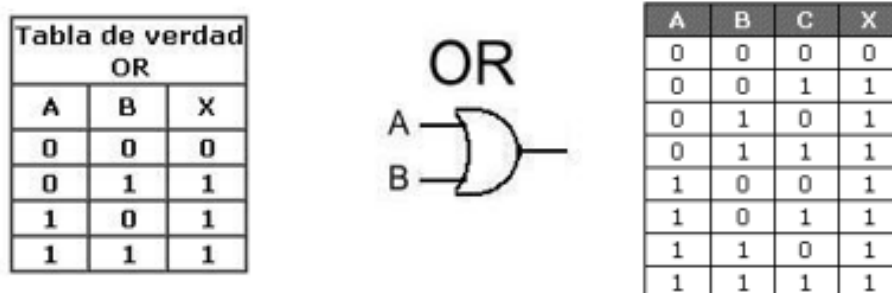


Ilustración 3.6

La compuerta OR produce una señal verdadera (1) cuando una o ambas entradas son ciertas.

La protección porcentual lleva asociada una compuerta AND para que solo de señal de disparo cuando se cumplan ambas condiciones, que la corriente diferencial este por encima de la mínima y que sea mayor que la de restricción por la pendiente elegida. Se define así la zona de disparo del relé y se asegura que solo dispare cuando exista realmente una perturbación.

El discriminador de corriente por armónicos tiene dos condiciones relacionadas con los armónicos segundo y tercero, cuando éstos no se encuentren dentro del intervalo programado, es decir, estén por debajo o por encima de dicho intervalo, dará una señal verdadera. Al contener una compuerta OR, cualquiera de las condiciones anteriores producirá una señal 1.

El análisis de ambos armónicos, segundo y tercero, se hará por separado. Ambos análisis se aunarán en una compuerta AND, que solo dará una señal verdadera si los dos armónicos están fuera del intervalo, es decir, no existe una corriente de conexión ni situación de sobreexcitación.

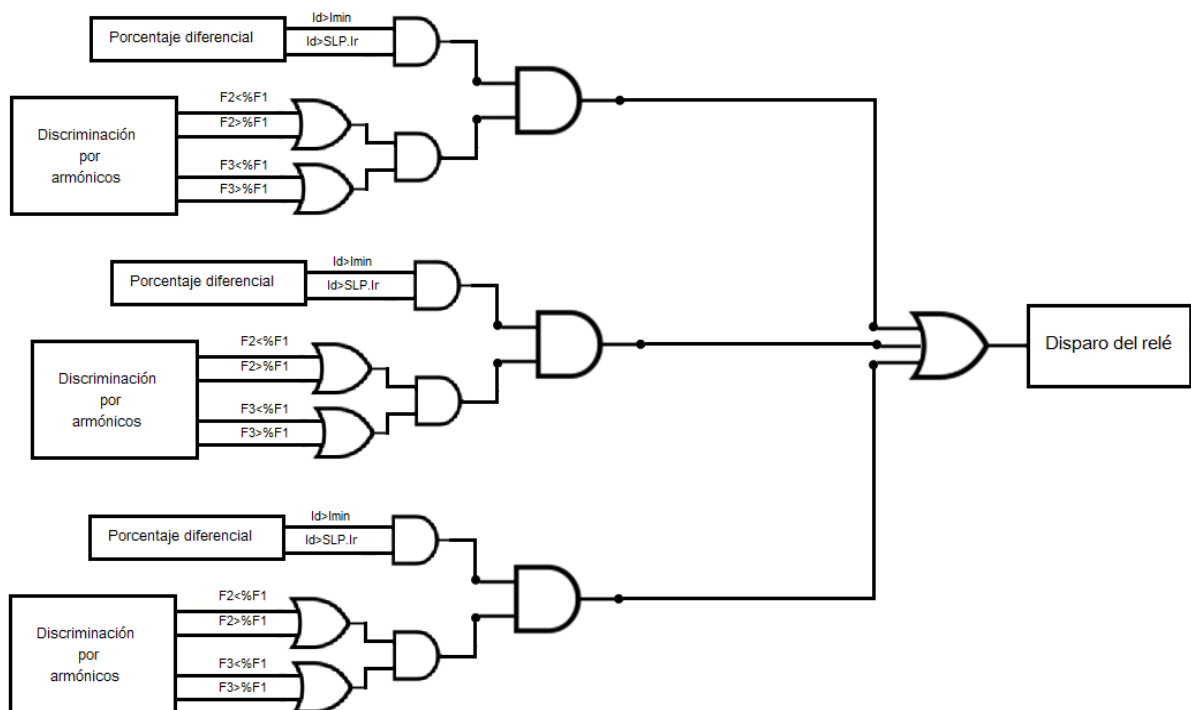


Ilustración 3.7

La forma de discriminar una corriente de falta de otra cualquiera (de conexión, sobrecarga o falta externa) será mediante otra compuerta AND en cada una de las fases. Así se evitan disparos intempestivos y se asegura que la protección actúe ante una falta interna.

Por último, el relé desconectará la zona protegida cuando el fallo se produzca en cualquiera de las fases. Se consigue una protección exacta con una compuerta OR de 3 entradas para detectar cortocircuitos fase-tierra, bifásicos o trifásicos.

4. Implementación y simulación del relé

4.1. Implementación del relé diferencial

La implementación del modelo de relé diferencial con discriminación por armónicos para un transformador trifásico se ha realizado con la ayuda del software Matlab/Simulink. La realización del relé y todo el circuito se ha llevado a cabo con la ayuda de la librería disponible en Simulink. Para la simulación se ha escogido un transformador trifásico de potencia, conectado a una fuente trifásica y que, a su vez, alimenta una carga resistiva trifásica. El modelo general se muestra en la siguiente imagen:

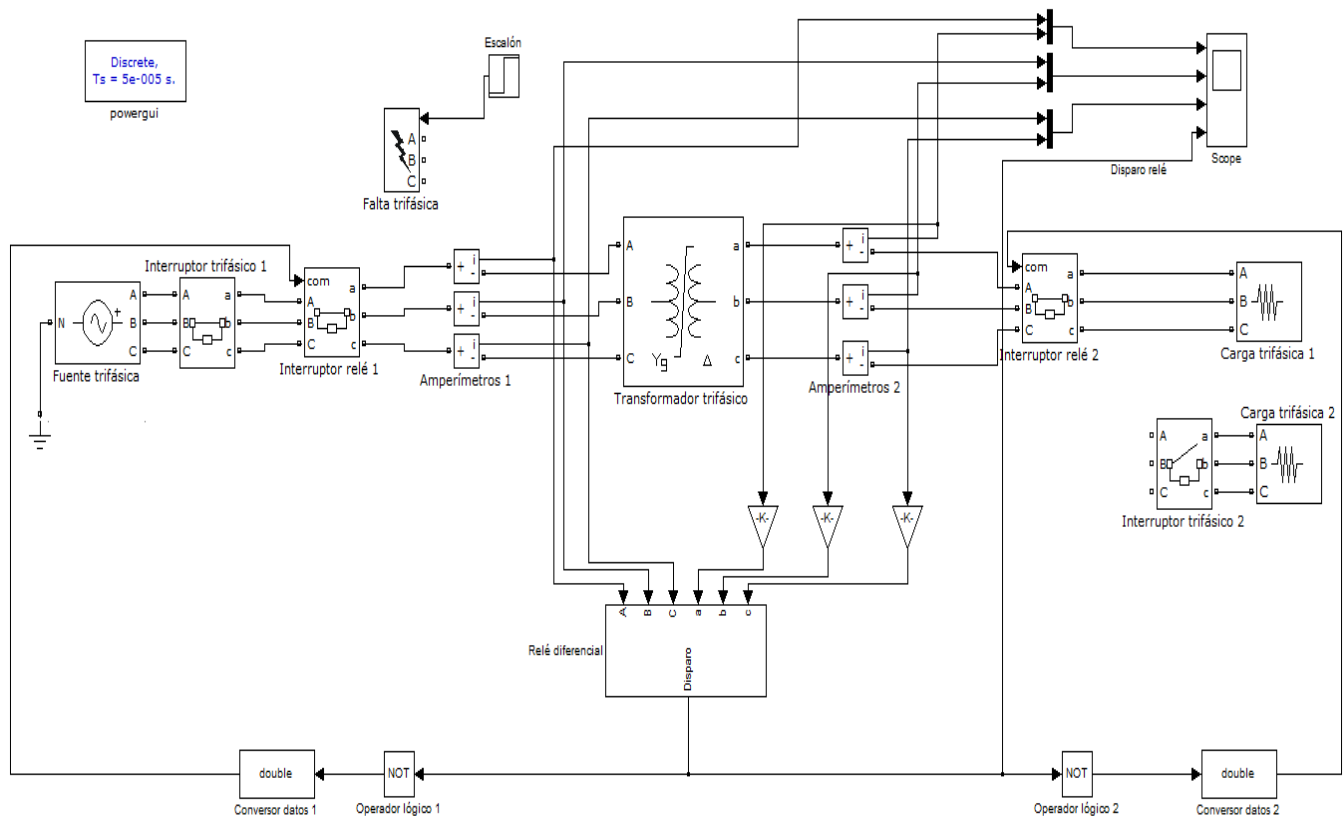


Ilustración 4.1

La fuente de tensión que se ha utilizado en la simulación será programable y alimentará al transformador con una tensión en valor eficaz de 735 kV. Este bloque ofrece varias posibilidades, una de ellas es la de variar la amplitud o ángulo de la tensión, o la frecuencia. Este parámetro se puede utilizar para simular una sobretensión en un momento determinado de la simulación.

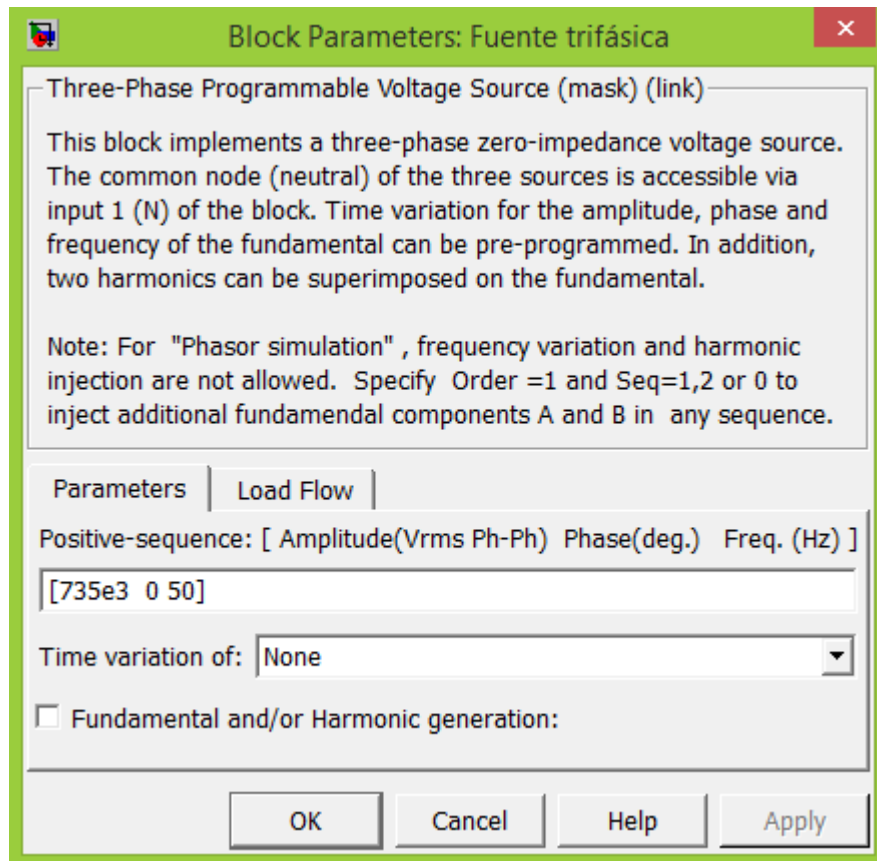


Ilustración 4.2

Se utilizarán dos cargas resistivas, la principal será la que alimente al transformador en todos los ensayos que se realizarán, mientras que la secundaria solo se conectará para la simulación de una sobrecarga.

La carga principal será resistiva conectada en triángulo y con una tensión eficaz de línea de 315 kV.

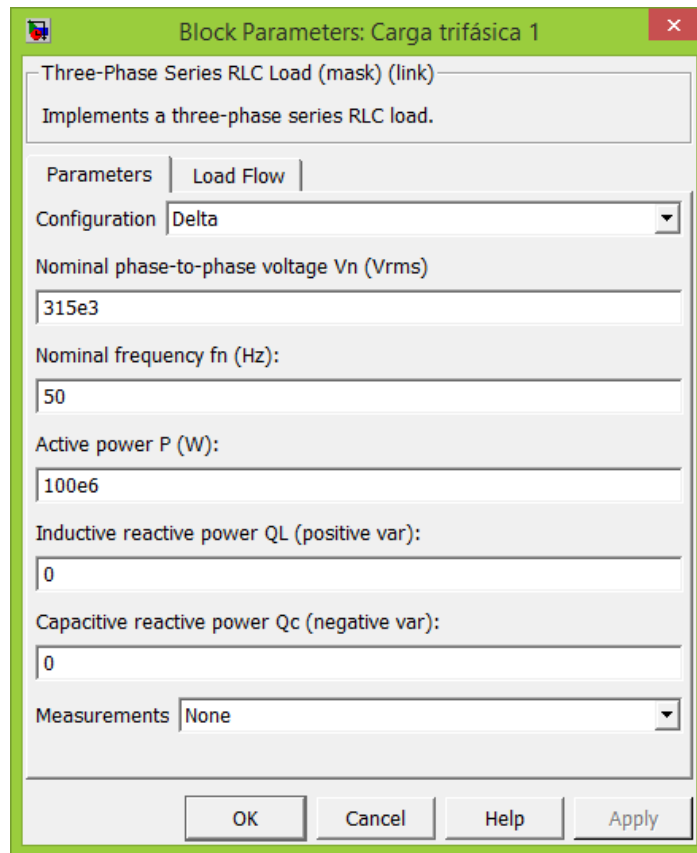


Ilustración 4.3

La carga auxiliar se conectará en un momento determinado a la principal en paralelo. La tensión de línea eficaz en ésta será de 100 kV, tendrá la misma conexión que la principal. Esta carga se implementa para simular en un momento determinado una sobrecarga y comprobar así el correcto funcionamiento de la protección.

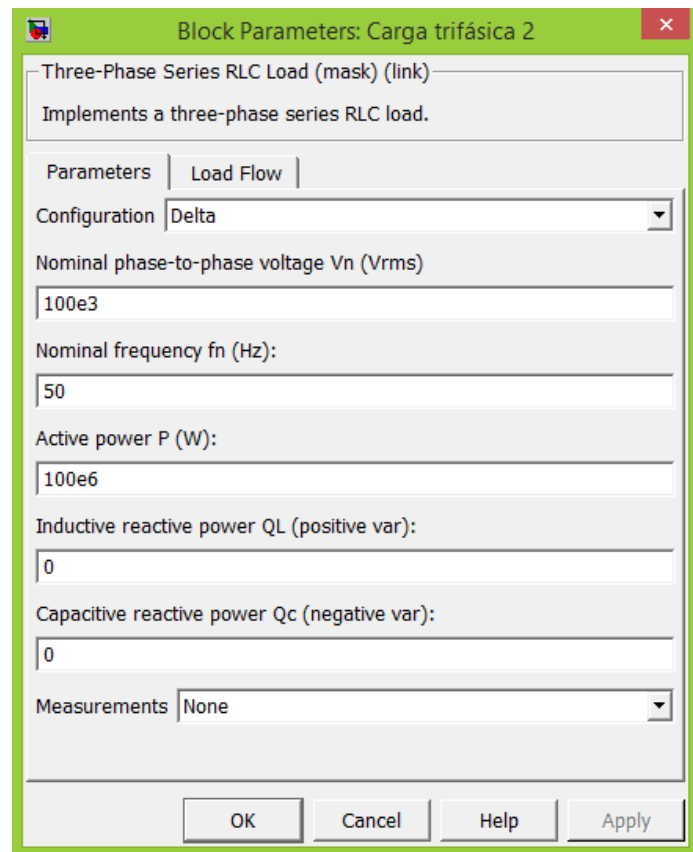


Ilustración 4.4

El transformador trifásico de potencia a proteger será de dos devanados con núcleo saturable y tendrá las siguientes características: 250 MVA; 50 Hz; 735/315 kV; conexión Y/ Δ .

La configuración y los parámetros utilizados en el modelado se muestran a continuación:

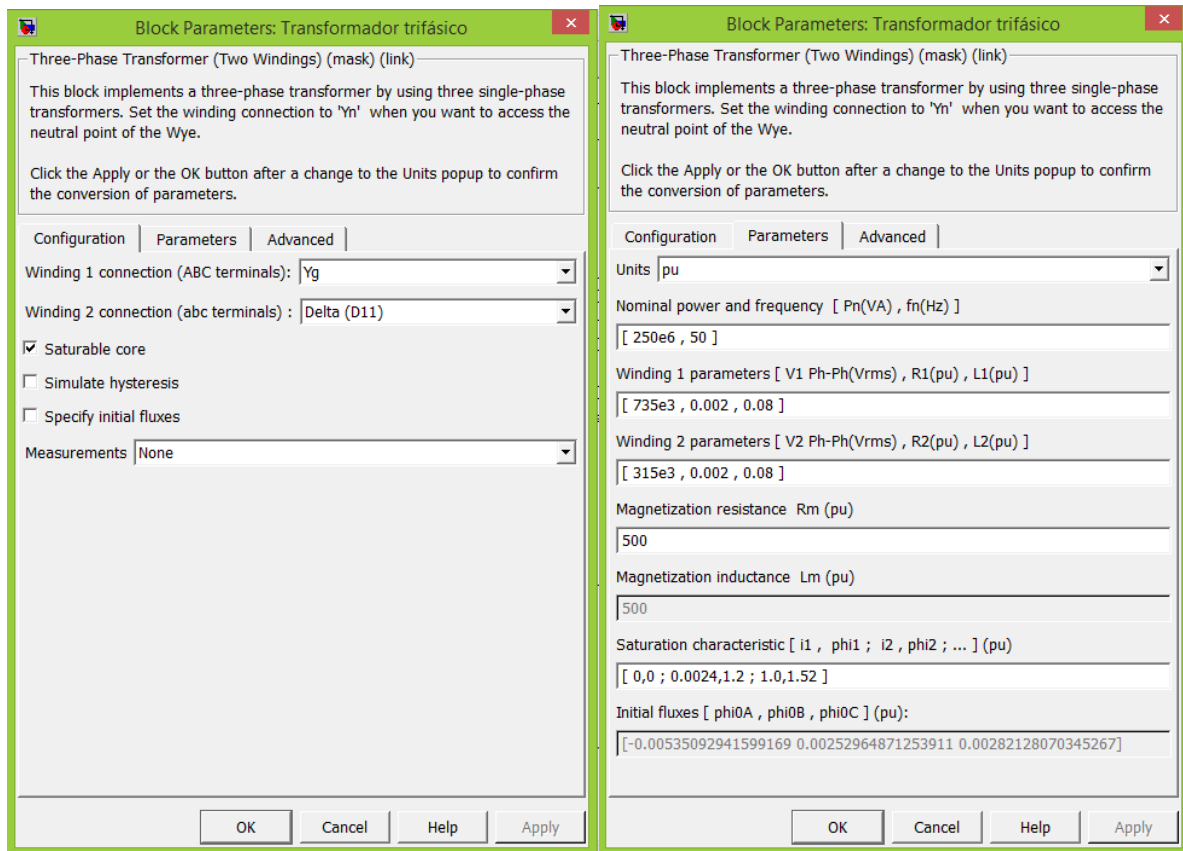


Ilustración 4.5

Con los parámetros de potencia nominal y tensión en ambos devanados se calculan las intensidades nominales primaria y secundaria, que serán las que se muestran a continuación:

$$I_{1L} = I_{1F} = S_N / (3 \cdot V_{1F}) = 250 \cdot 10^6 / (3 \cdot 735 \cdot 10^3) = 113,4 \text{ A}$$

Donde:

I_{1L} = intensidad primaria de línea

I_{1F} = intensidad primaria de fase

S_N = potencia aparente nominal

V_{1F} = tensión primaria de fase

(Fórmula 4.1)

$$I_{2L} = S_N / (\sqrt{3} \cdot V_{2F}) = 250 \cdot 10^6 / (\sqrt{3} \cdot 315 \cdot 10^3) = 458,2 \text{ A}$$

$$I_{2F} = I_{2L} / \sqrt{3} = 458,2 / \sqrt{3} = 264,55 \text{ A}$$

Donde:

I_{2L} = intensidad secundaria de línea

I_{2F} = intensidad secundaria de fase

S_N = potencia aparente nominal

V_{2F} = tensión secundaria de fase

(Fórmula 4.2)

Para que las intensidades en ambos devanados tengan un valor muy parecido, en el presente trabajo, se han utilizado una serie de ganancias o multiplicadores que realizan la función de transformadores de intensidad. Estas ganancias multiplican la corriente en el secundario del transformador para igualarla con la corriente primaria.

Se calcula previamente la relación de transformación de intensidad:

$$m_I = I_{1F} / I_{2F} = 113,4 / 264,55 = 0,428652$$

(Fórmula 4.3)

Esta relación será la utilizada en la simulación:

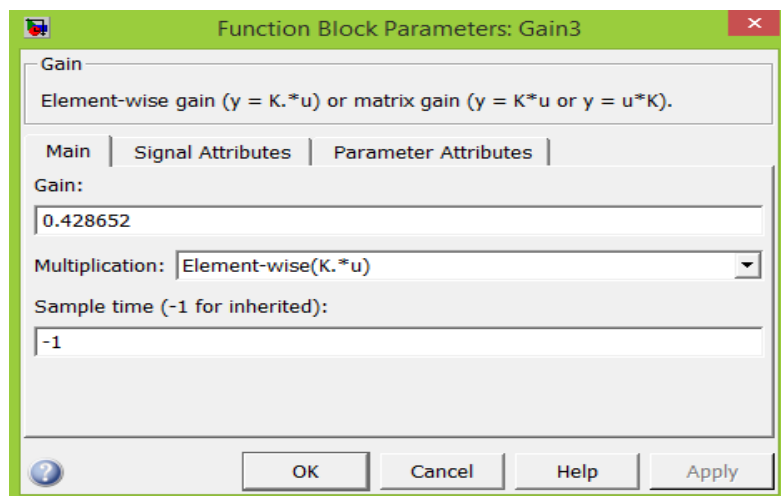


Ilustración 4.6

Las distintas situaciones de falta o perturbación del relé se harán con la ayuda de interruptores automáticos.

Se utilizarán dos interruptores que ayudarán a la simulación de situaciones de conexión y sobrecarga. En un principio deberán permanecer abiertos hasta que la simulación llegue al tiempo prefijado en el interruptor. Es entonces cuando el interruptor se cerrará. El tiempo de apertura o cierre del relé se fija en el apartado “tiempo de transición”.

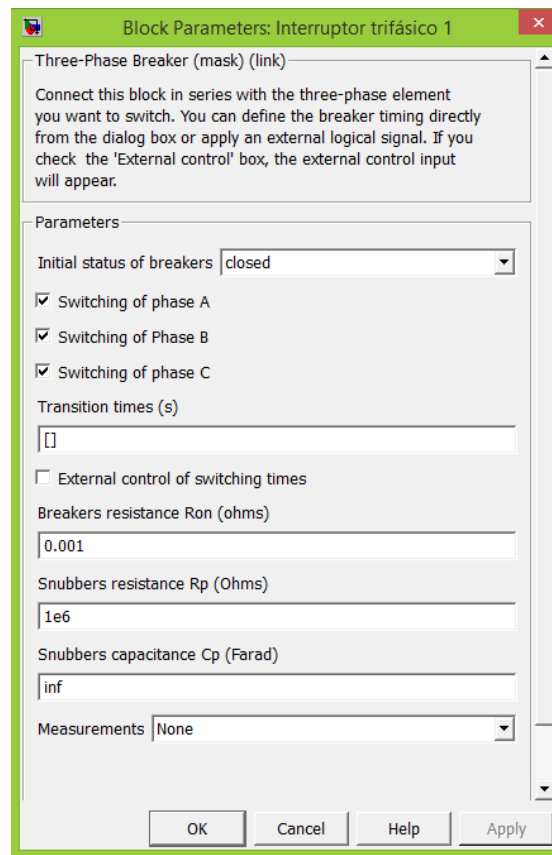


Ilustración 4.7

Se implementarán otros dos interruptores automáticos que formarán parte de la protección, ya que estarán asociados al relé diferencial. Permanecerán cerrados en todo momento, y abrirán sus contactos al recibir la orden de disparo del relé.

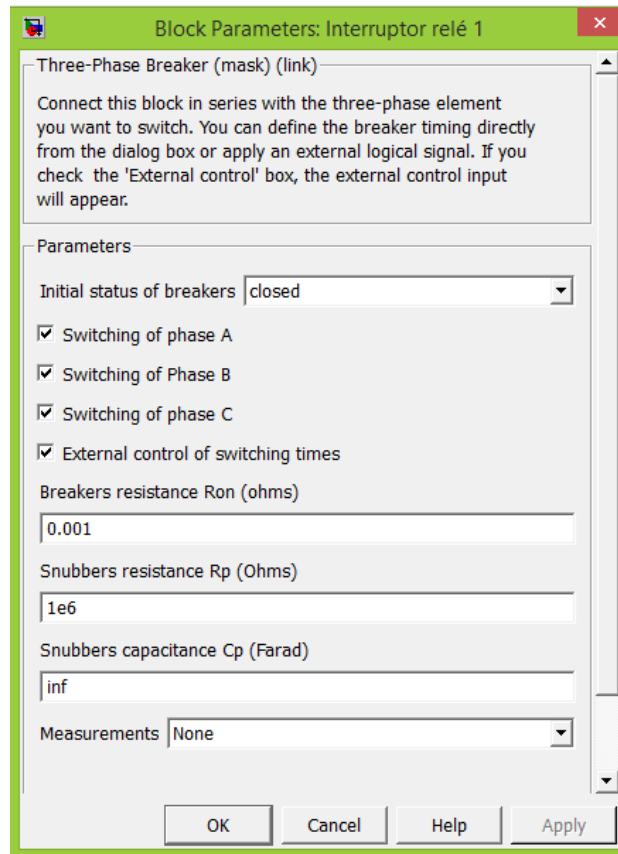


Ilustración 4.8

El relé se ha implementado en un subsistema dentro del cual se realizan las operaciones para detectar una situación anómala mediante la comparación de las intensidades en los devanados del transformador.

Existen 4 parámetros que pueden ajustarse de forma previa para la simulación. Estas variables son: la intensidad mínima de disparo, la pendiente de la protección porcentual y los porcentajes que definen el intervalo dentro del cual debe situarse el segundo armónico.

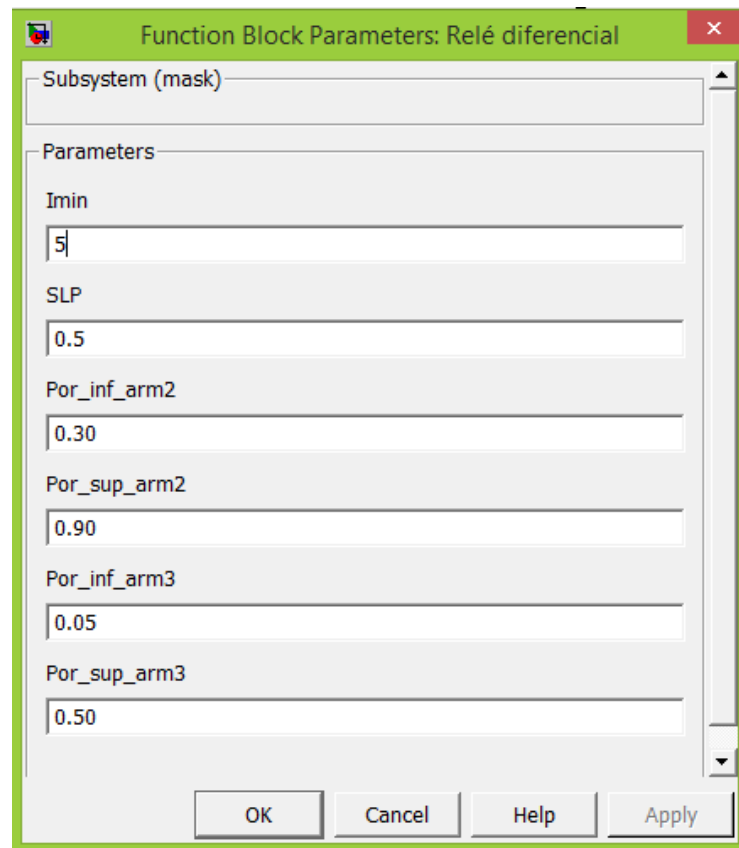


Ilustración 4.9

La intensidad en cada una de las fases entra al relé para ser comparada. Los bloques comparadores serán los encargados de enviar la señal de disparo en caso de falta. Estarán conectados a una compuerta OR que ofrecerá una señal verdadera siempre y cuando exista un fallo en cualquiera de las fases o en varias fases conjuntas.

El bloque “Flip-Flop” tiene la función de mantener el disparo del relé, es decir, hacer que la señal que recibe (1 ò 0) se mantenga hasta el final de la simulación.

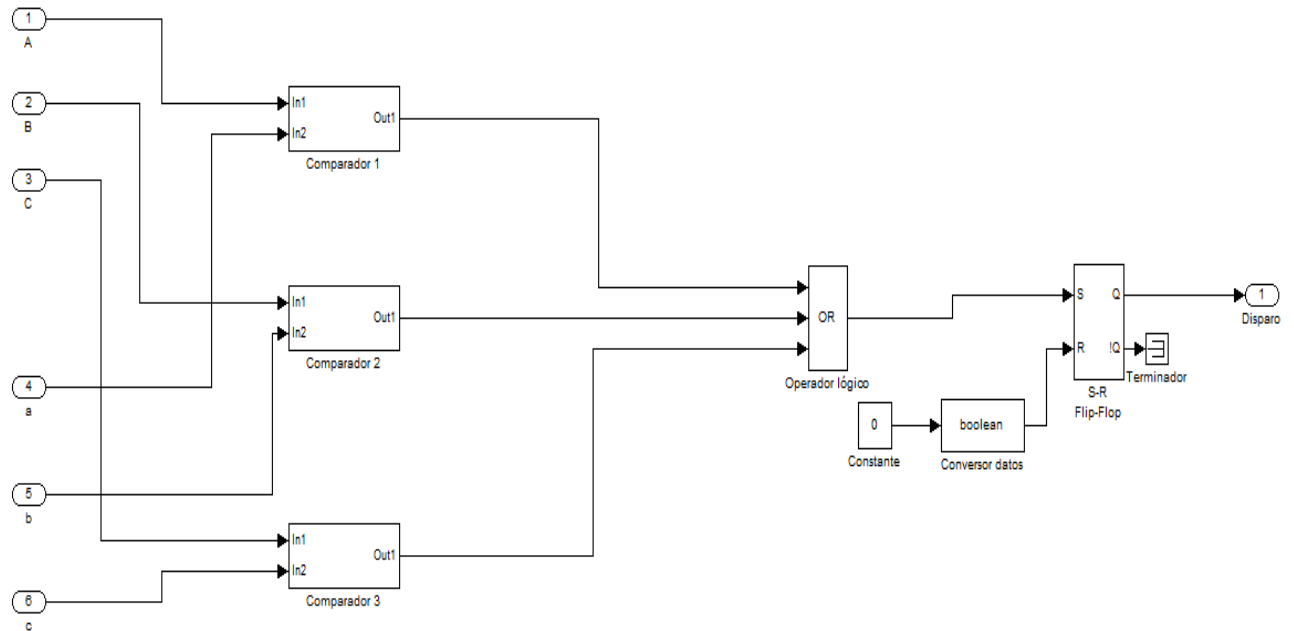


Ilustración 4.10

Dentro de cada comparador existen dos bloques, uno para la comparación de intensidades y otro para la comparación por armónicos. Si ambos bloques dan una señal verdadera querrá decir que existe una falta en la fase, si solamente uno de los bloques da una señal de salida 1 se interpretará como que no existe falta alguna.

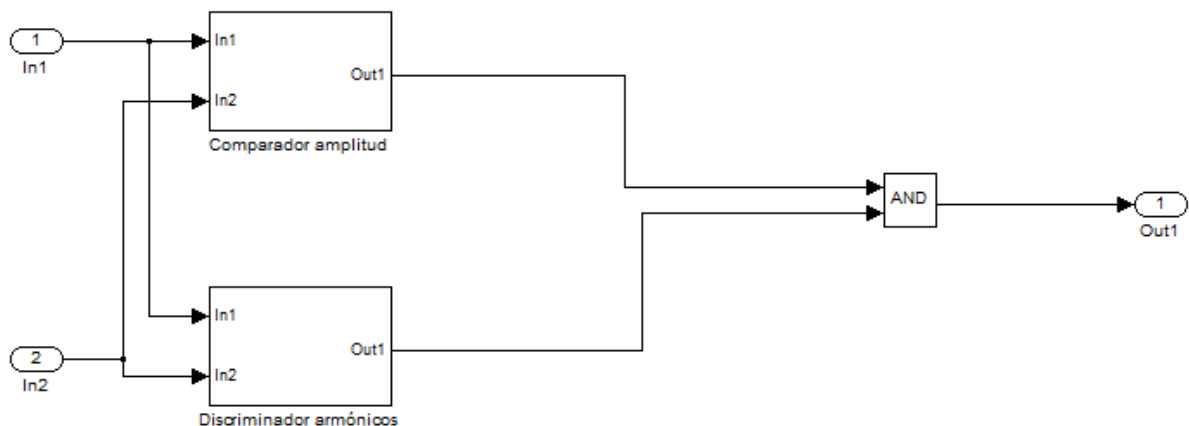


Ilustración 4.11

El comparador de amplitud trabaja con los valores eficaces de las intensidades en los arrollamientos del transformador.

La intensidad diferencial se calcula mediante la diferencia de I_1 e I_2 en valor absoluto. Esta intensidad debe ser mayor que la corriente mínima o umbral para que la protección actúe.

El otro parámetro calculado es la intensidad de restricción, que será la suma de los valores absolutos de I_1 e I_2 . Después se multiplica por un valor porcentual que define la pendiente (SLP) del relé. Existirá una situación de fallo cuando la multiplicación anterior ($I_{res} \cdot SLP$) sea superior a la intensidad diferencial.

Las dos condiciones anteriores deben ser verdaderas para que exista una falta en el circuito protegido. Se define así la protección diferencial porcentual y la zona de disparo del relé.

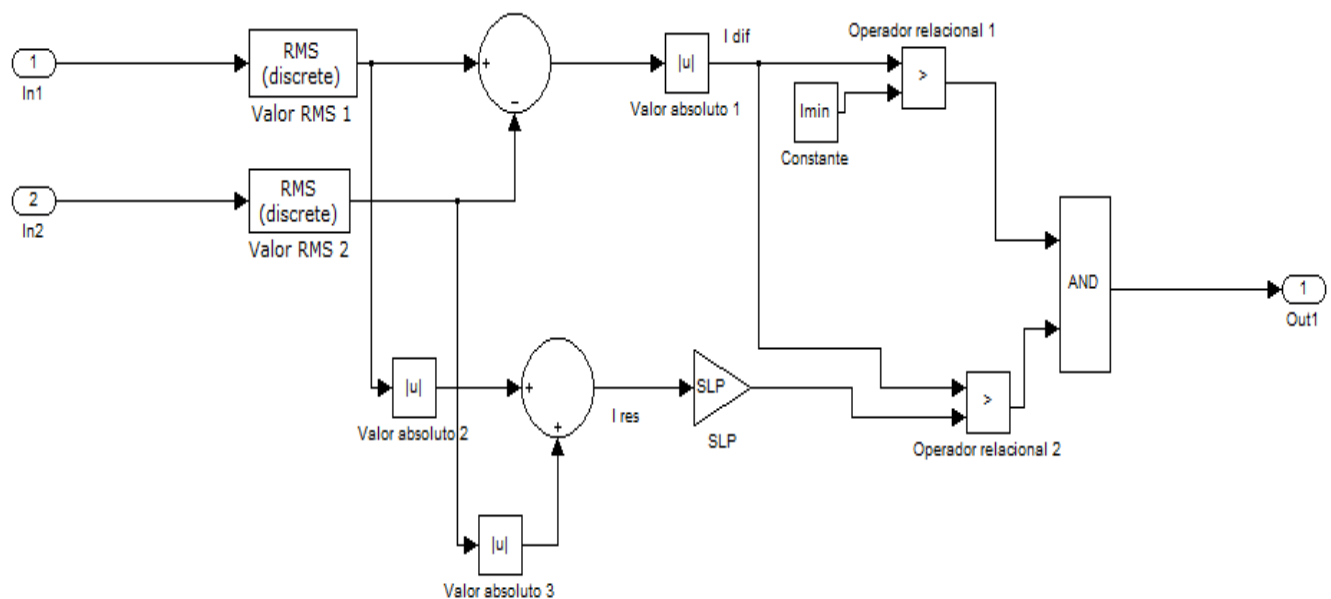


Ilustración 4.12

El otro bloque que contiene cada comparador es el discriminador por armónicos. Este bloque trabaja solo con la corriente primaria del transformador, debido a que es esta intensidad la que puede contener armónicos de 2º y 3º orden, generados por la corriente de conexión. La intensidad secundaria no se analiza.

Para la corriente primaria, mediante bloques de análisis de Fourier, se estudian las componentes fundamental y de segundo armónico. La componente fundamental se multiplica por los porcentajes fijados anteriormente y se compara gráficamente con el armónico 2. Si este armónico está por encima o por debajo del intervalo de porcentajes, el bloque de armónicos ofrece una señal de salida 1, lo que significa que existe un cortocircuito dentro de la zona protegida. Se procede de igual manera para el tercer armónico.

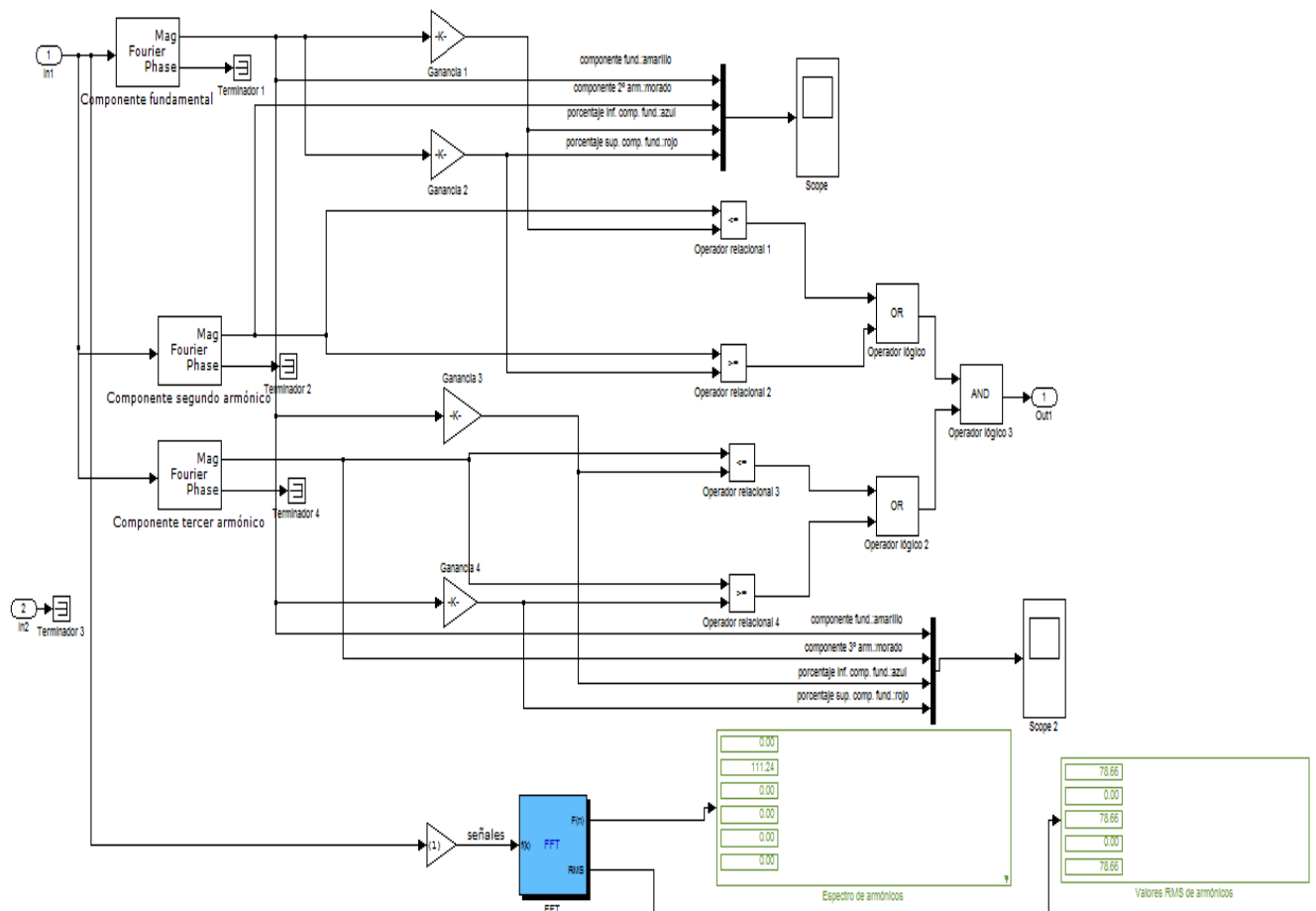


Ilustración 4.13

En la parte de abajo de la imagen anterior se observa un bloque de color azul cuya función es la de analizar una onda de entrada y ofrecer dos salidas. Una de ellas genera un espectro de armónicos y la amplitud de cada uno de ellos, la otra salida ofrece los valores eficaces de cada uno de los armónicos contenidos en la corriente analizada.

4.2. Simulación

El correcto funcionamiento del relé se comprobará con cinco casos diferentes que se pueden dar durante el funcionamiento de cualquier sistema de potencia. Estos casos se analizarán primero por separado y luego combinando alguno de ellos.

Se va a analizar el comportamiento del relé en las siguientes situaciones:

- Corriente de conexión.
- Sobreexcitación
- Sobrecarga.
- Falta interna.
- Falta externa.
- Desconexión accidental.

Se comprobará también si el relé distingue una situación de falta interna de una que no lo es, mediante la combinación de alguno de los casos anteriores:

- Corriente de conexión y sobreexcitación.
- Corriente de conexión y sobrecarga.
- Corriente de conexión y falta interna.
- Corriente de conexión y falta externa.
- Falta externa y falta interna.

Para la comprobación de lo mencionado anteriormente se estudiará la onda de corriente y el posible disparo del relé en los osciloscopios dispuestos en el modelo, además del comportamiento del 2º armónico y 3º analizados en los osciloscopios o “scopes” del bloque de discriminación por armónicos.

En la simulación se han fijado los siguientes parámetros de protección:

- $I_{min} = 5 \text{ A}$
- $SLP = 50 \%$
- Segundo armónico
 - Porcentaje inferior de componente fundamental = 30 %
 - Porcentaje superior de componente fundamental = 90 %
- Tercer armónico
 - Porcentaje inferior de componente fundamental = 5 %
 - Porcentaje superior de componente fundamental = 50 %

Las faltas que se simularán en este trabajo serán cortocircuitos. Se implementarán con el bloque de falta trifásica en el que se puede seleccionar la fase o fases afectadas por el cortocircuito y si se desea que la falta sea a tierra.

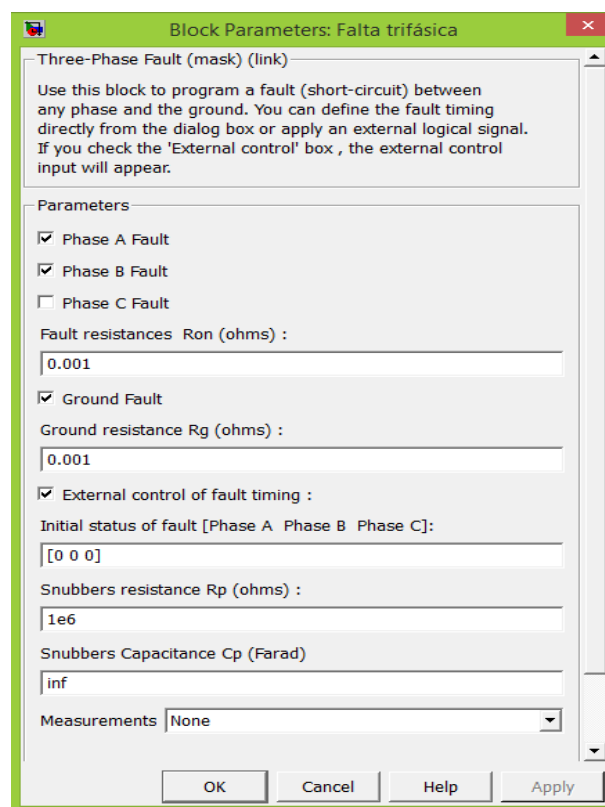


Ilustración 4.14

El control del tiempo en el que se produce el cortocircuito será externo y se implementará con una señal escalón con los siguientes parámetros:

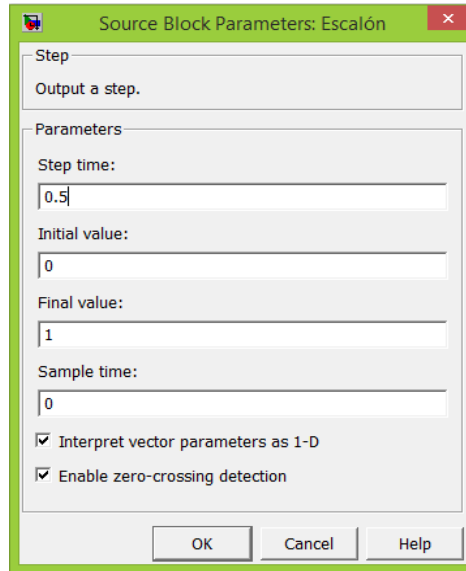


Ilustración 4.15

1. Corriente de conexión. Todos los interruptores automáticos permanecerán cerrados, excepto el interruptor 1 que quedará abierto. La simulación se programa para 1 segundo y el interruptor 1 se cerrará en 0,3 segundos.

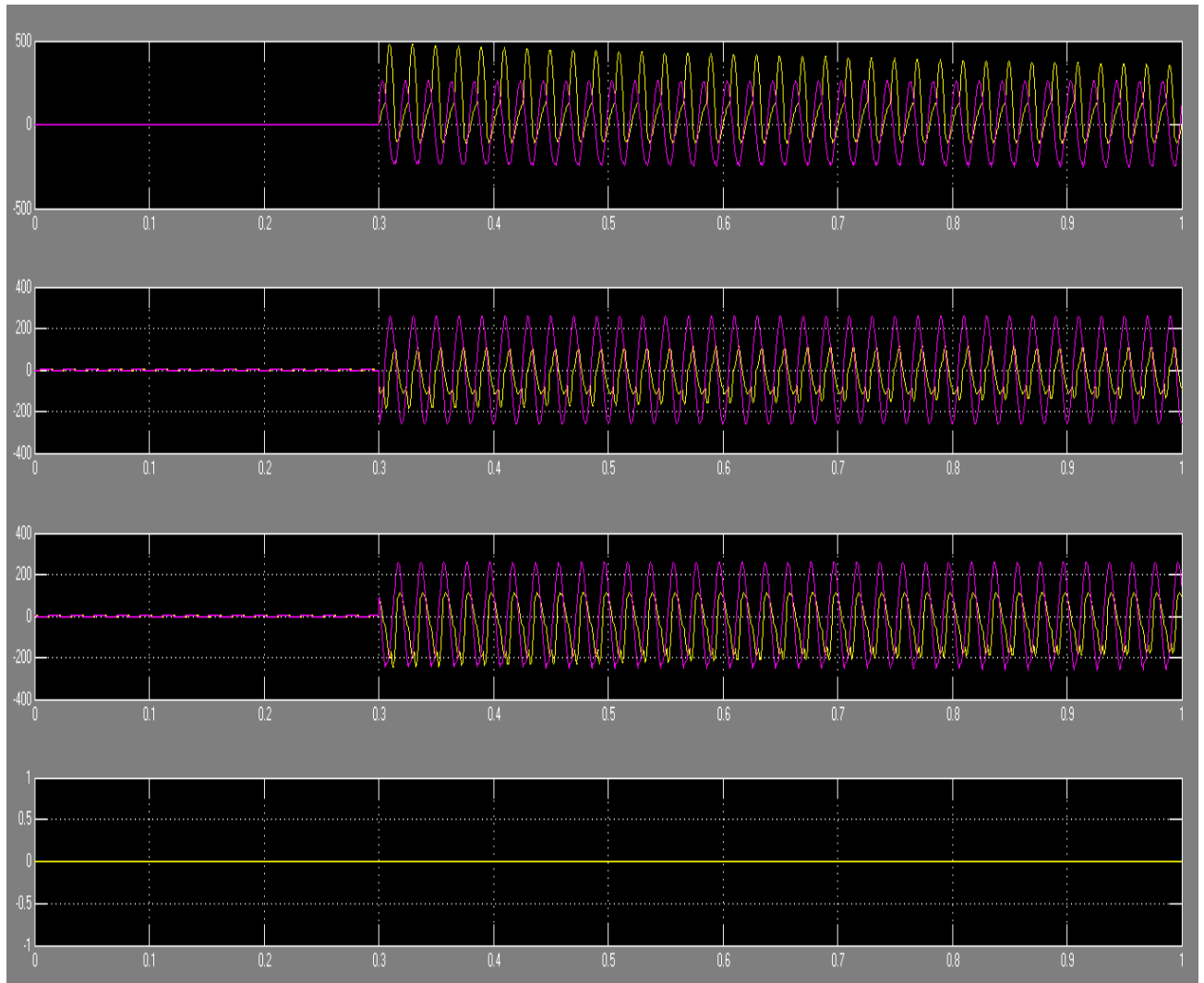


Ilustración 4.16

La corriente primaria se representa en color amarillo y la secundaria morado. Se puede comprobar que la forma de onda de I_1 se distorsiona debido a la presencia de armónicos en la corriente de conexión, esta onda se normaliza a partir de un tiempo determinado.

Antes del cierre del interruptor apenas existe corriente en el circuito, en el momento del cierre puede aparecer una corriente diferencial alta pero se discrimina por la presencia del segundo armónico como se ve a continuación.

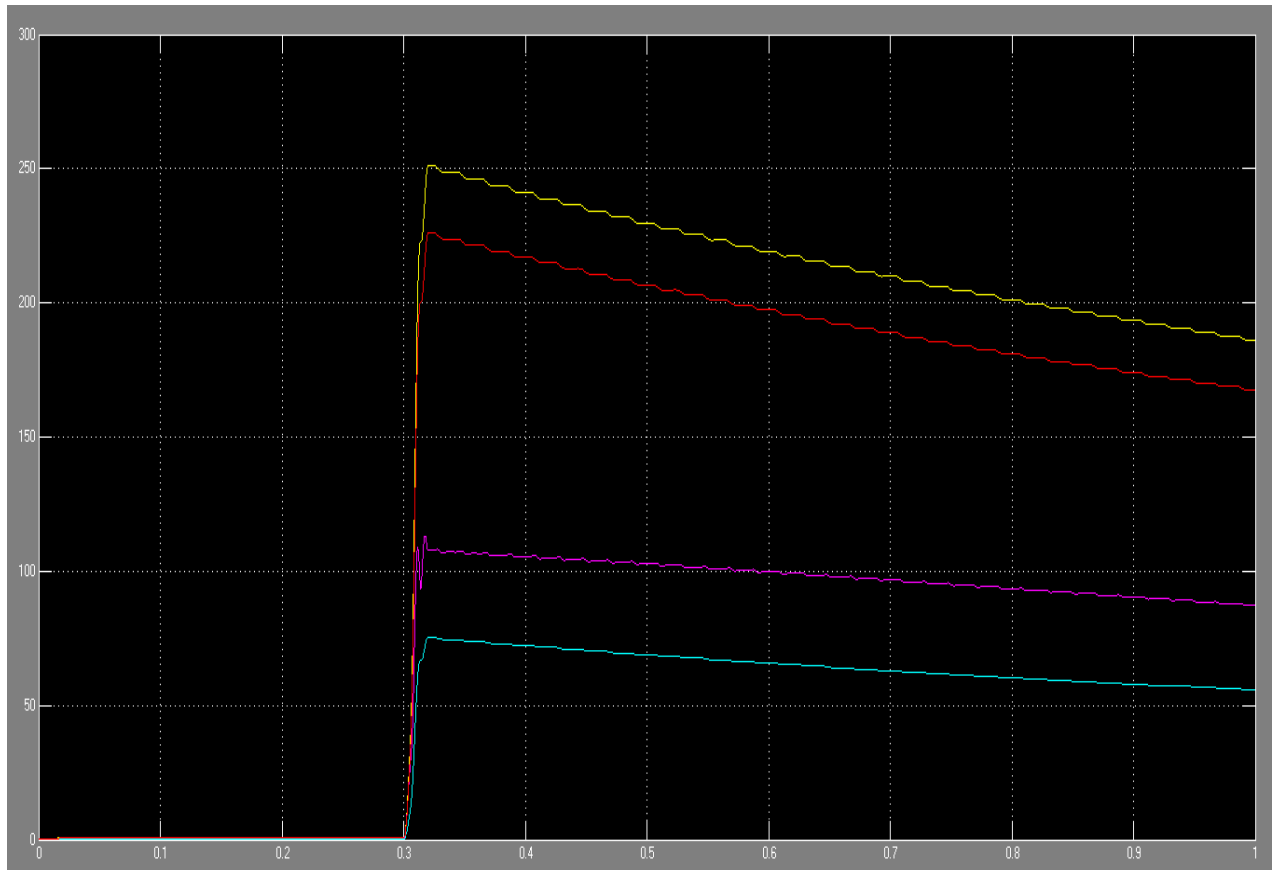


Ilustración 4.17

La onda de color amarillo es la componente fundamental de la corriente primaria y la de color morado es el segundo armónico. El 90% de la componente fundamental se representa de color rojo y el 30% de la componente fundamental de color azul.

Se puede comprobar como en el momento de conexión del transformador el segundo armónico se encuentra entre los dos porcentajes de la componente fundamental. De esta manera, el relé detecta la presencia de una corriente de conexión y no dispara de forma incorrecta.

En el momento de conexión de la fuente con el transformador y el resto del circuito, el contenido armónico es alto. El bloque FFT implementado dentro del discriminador por armónicos representa este contenido mediante la amplitud de cada armónico y su espectro.

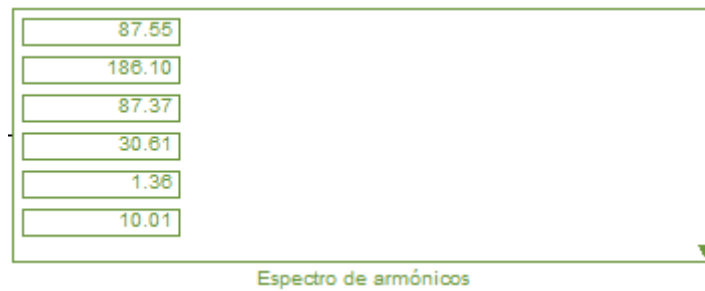


Ilustración 4.18

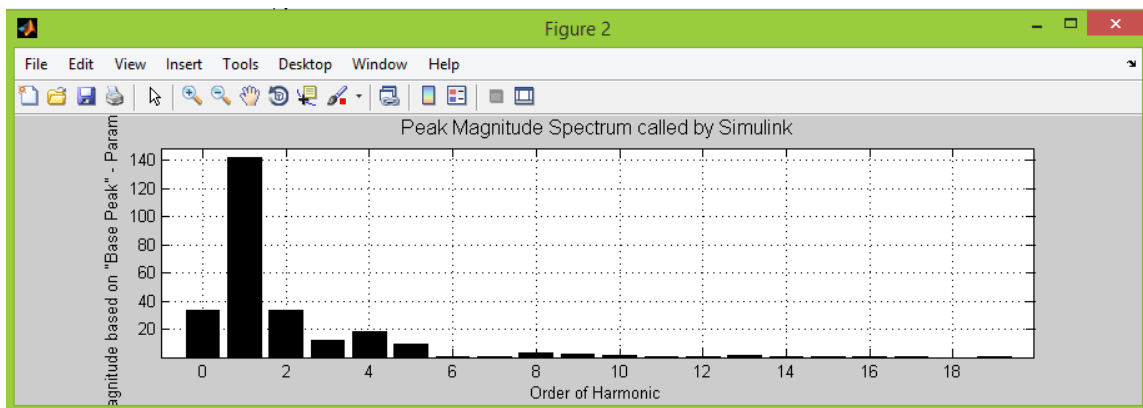


Ilustración 4.19

Se puede observar como la corriente de conexión contiene armónicos de orden 2, 3, 4 y 5 en mayor medida que el resto. El armónico que más presencia tiene es el segundo que llega a alcanzar un valor de pico superior al de la componente de corriente continua

2. Sobreexcitación. La fuente trifásica se programa de tal manera que el módulo de la tensión varíe en forma de escalón con amplitud 0,5. El tiempo de sobreexcitación estará entre 0,1 y 0,5.

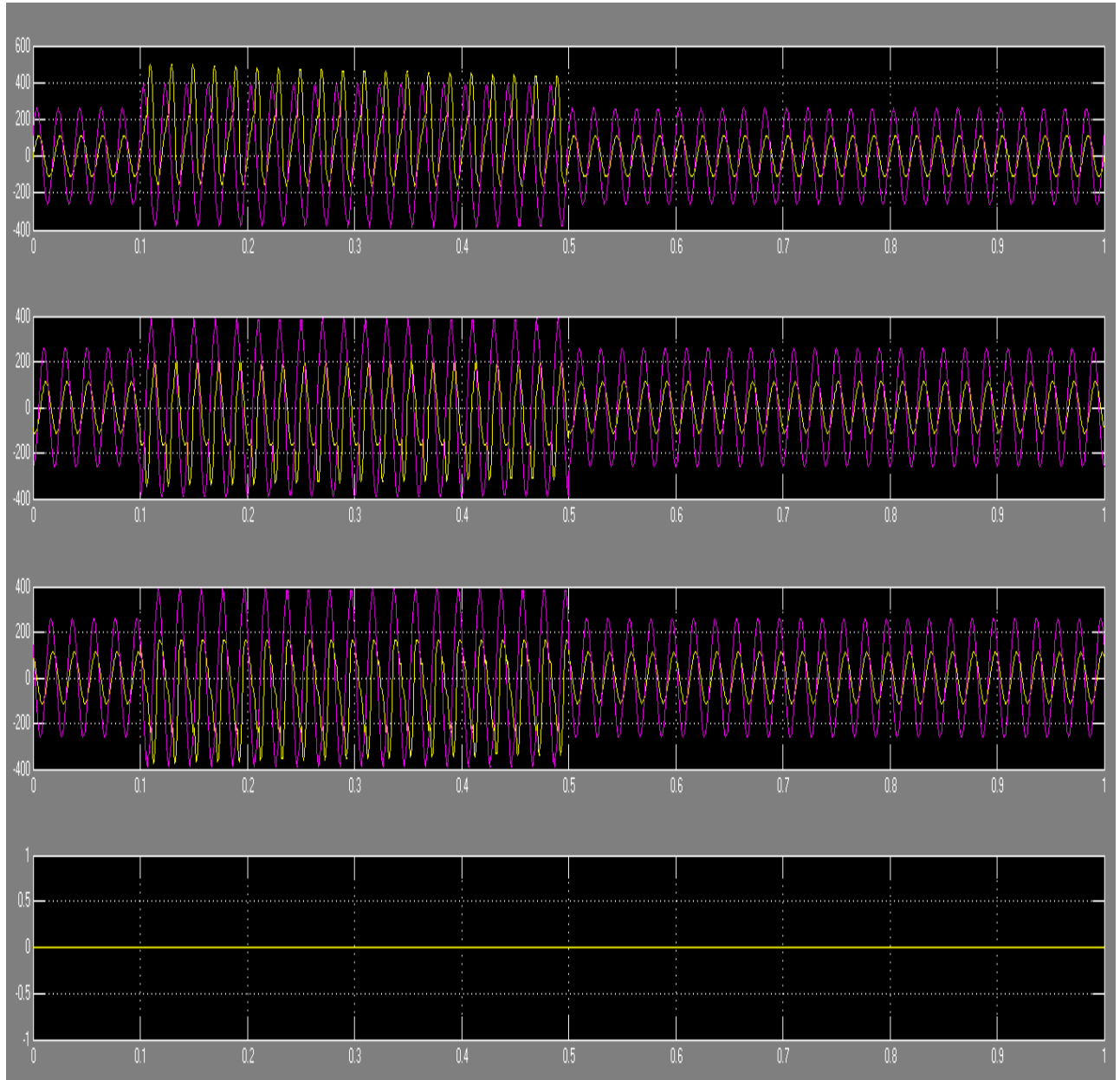


Ilustración 4.20

El relé funciona de forma correcta al no disparar y desconectar el transformador, ya que, actuar ante una sobretensión producida por una sobreexcitación no es su cometido

Al producirse la sobreexcitación el armónico segundo está dentro de los márgenes fijados.

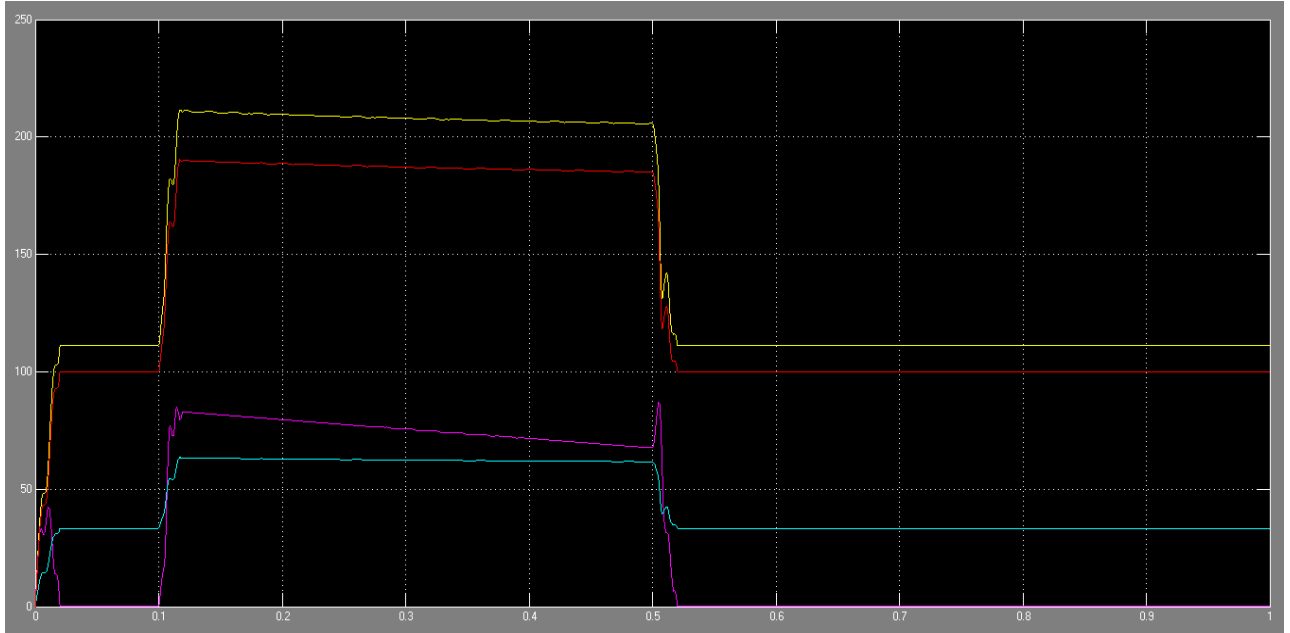


Ilustración 4.21

El tercer armónico cumple también con la condición de estar dentro del intervalo fijado. Por ello el relé detecta una corriente de sobreexcitación y no actúa sobre los interruptores.

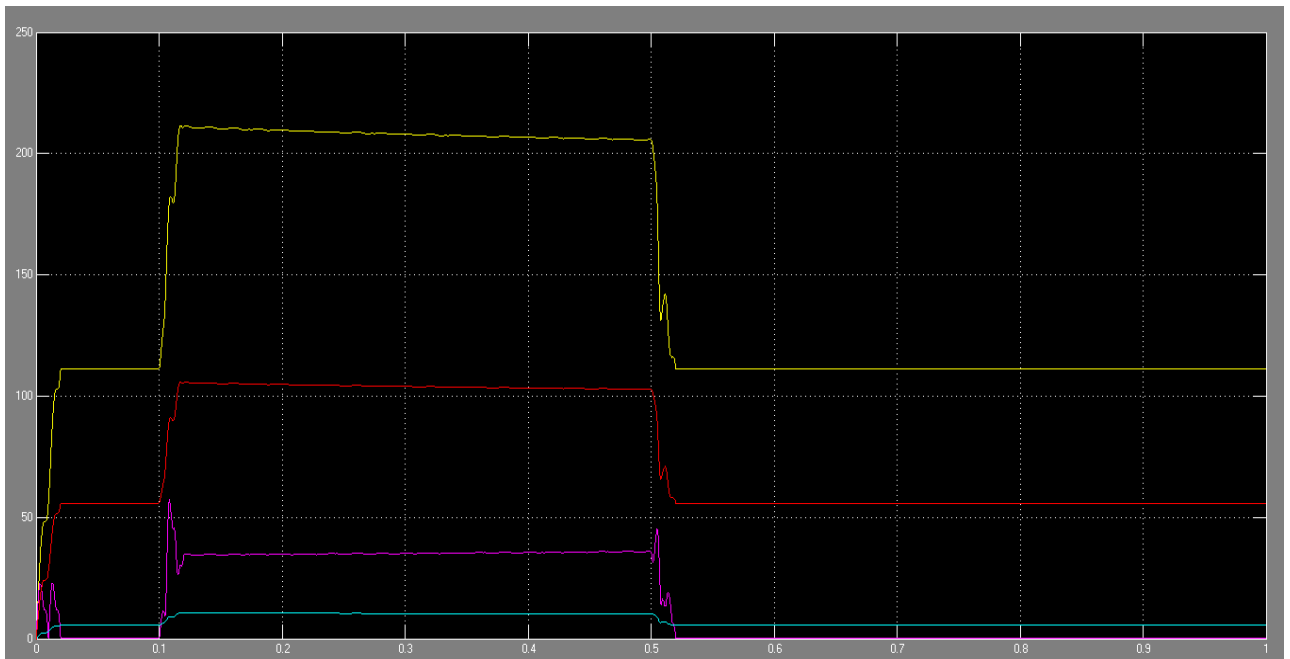


Ilustración 4.22

3. Sobrecarga. Para simular este caso se conectará el interruptor 2 y la carga 2 en paralelo con la carga 1.

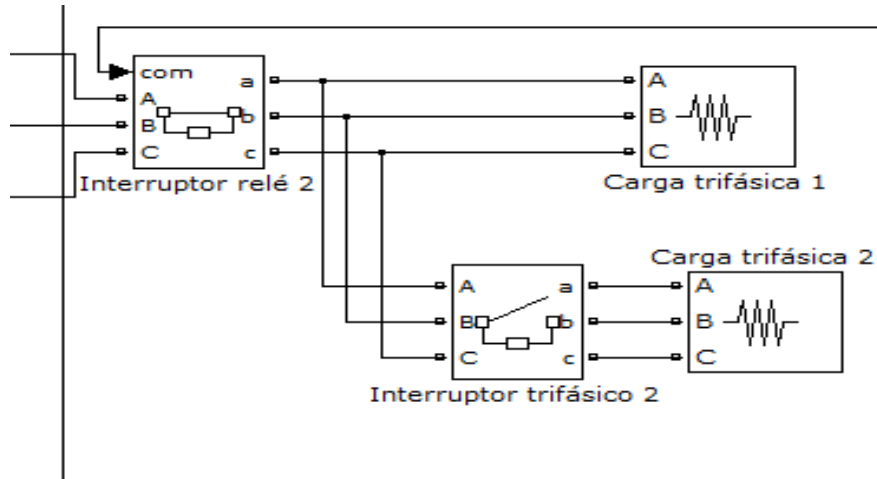
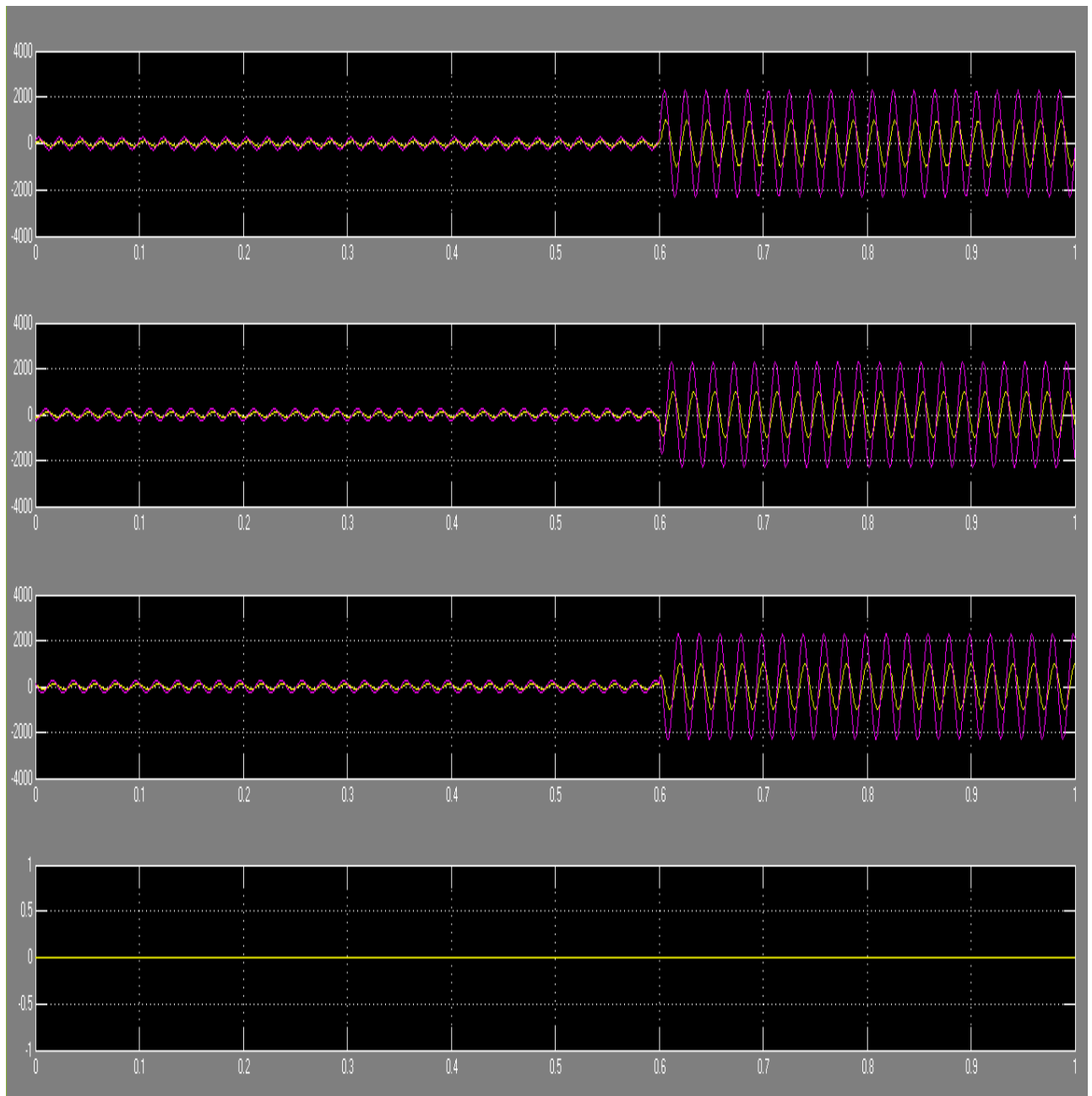
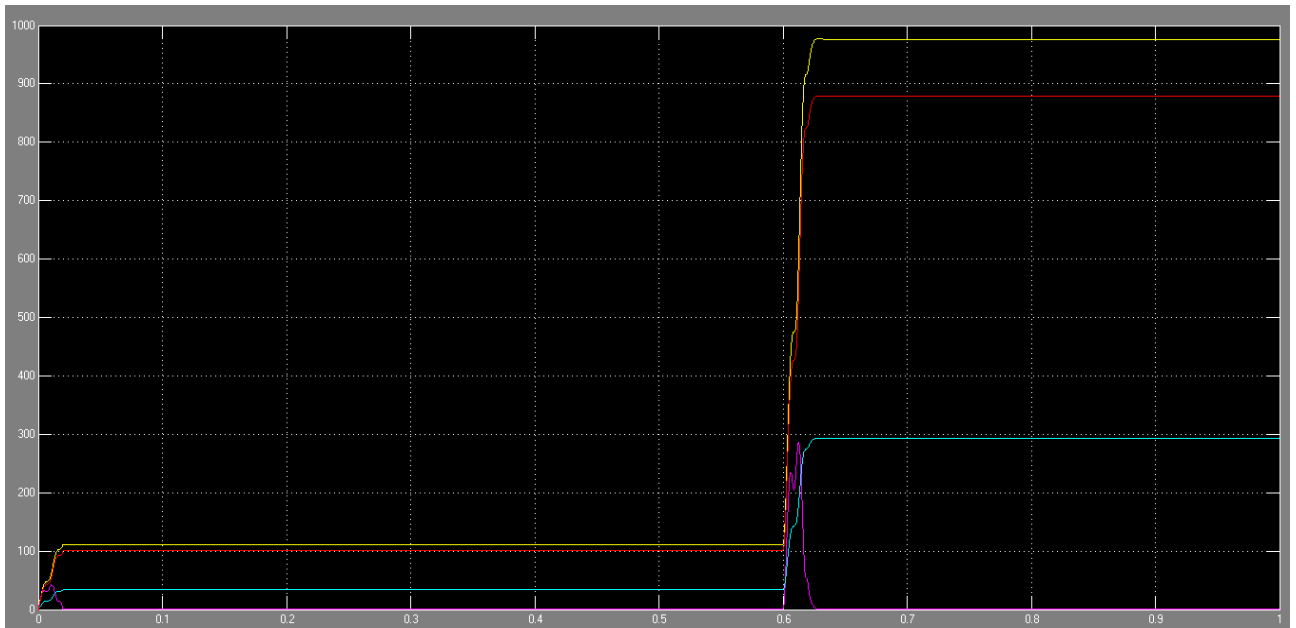


Ilustración 4.23

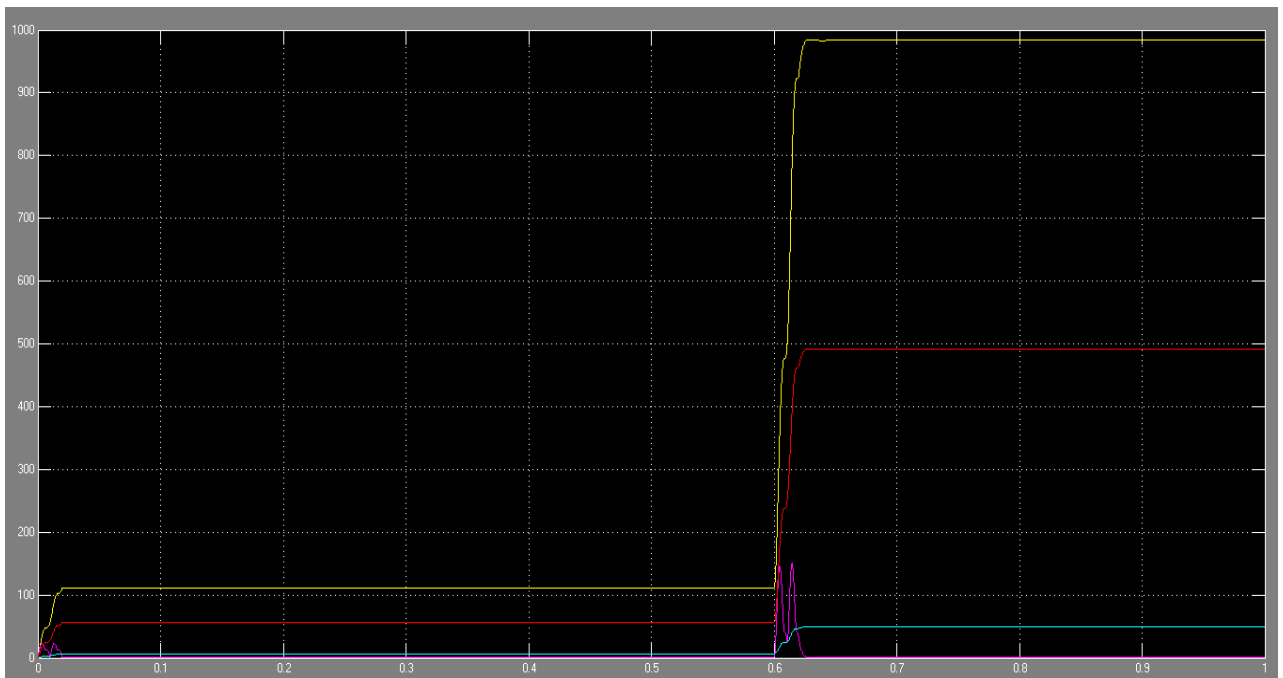
Todos los interruptores permanecerán cerrados excepto el interruptor 2 que quedará abierto. En 0,6 segundos se cerrará conectando la carga 2 y simulando una posible sobrecarga.

**Ilustración 4.24**

Se comprueba como el relé no dispara en esta situación, ya que una sobrecarga no debe afectar a la protección.

**Ilustración 4.25**

El segundo armónico aparece en el inicio de la simulación y en el momento de la sobrecarga, donde se cumple la condición de que el segundo armónico esté dentro del intervalo establecido, para después disiparse.

**Ilustración 4.26**

Ocurre de la misma forma en el tercer armónico, en el momento de producirse la sobrecarga se encuentra dentro del intervalo y posteriormente se disipa.

4. Falta interna. Con todos los interruptores cerrados se provocará un cortocircuito en la zona protegida por el relé.

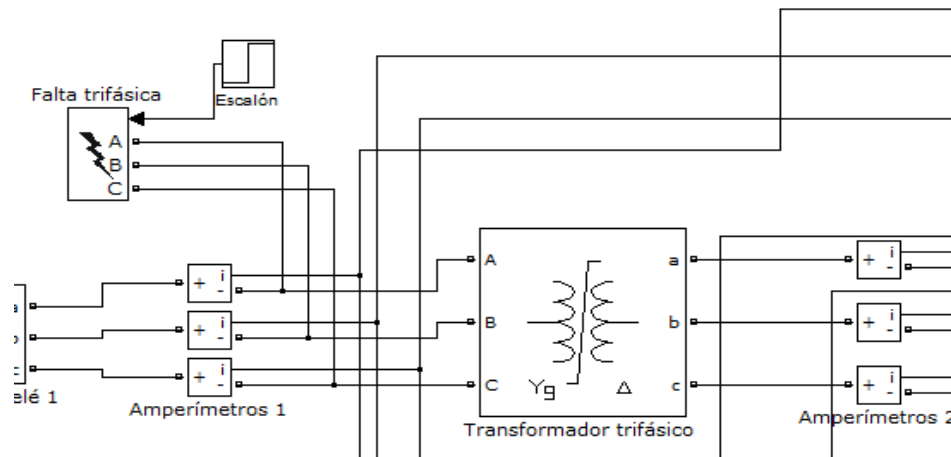


Ilustración 4.27

Se aplicarán todos los cortocircuitos en la zona de protección del relé para comprobar el funcionamiento correcto del mismo. Todos ellos se llevarán a cabo en un tiempo de 0,5 segundos en la simulación.

4.1. Cortocircuito fase A-tierra.

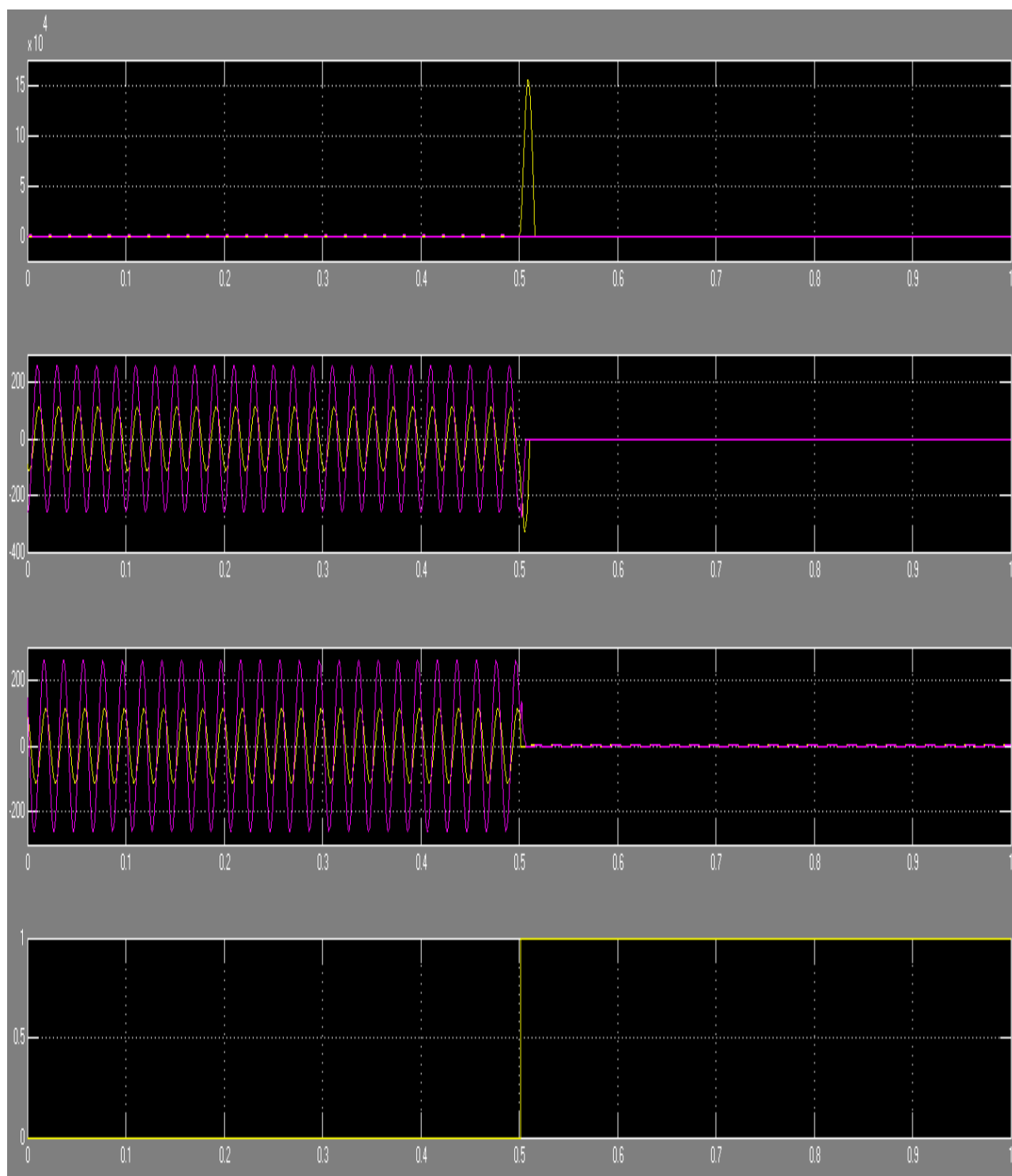


Ilustración 4.28

4.2. Cortocircuito fase B-tierra.

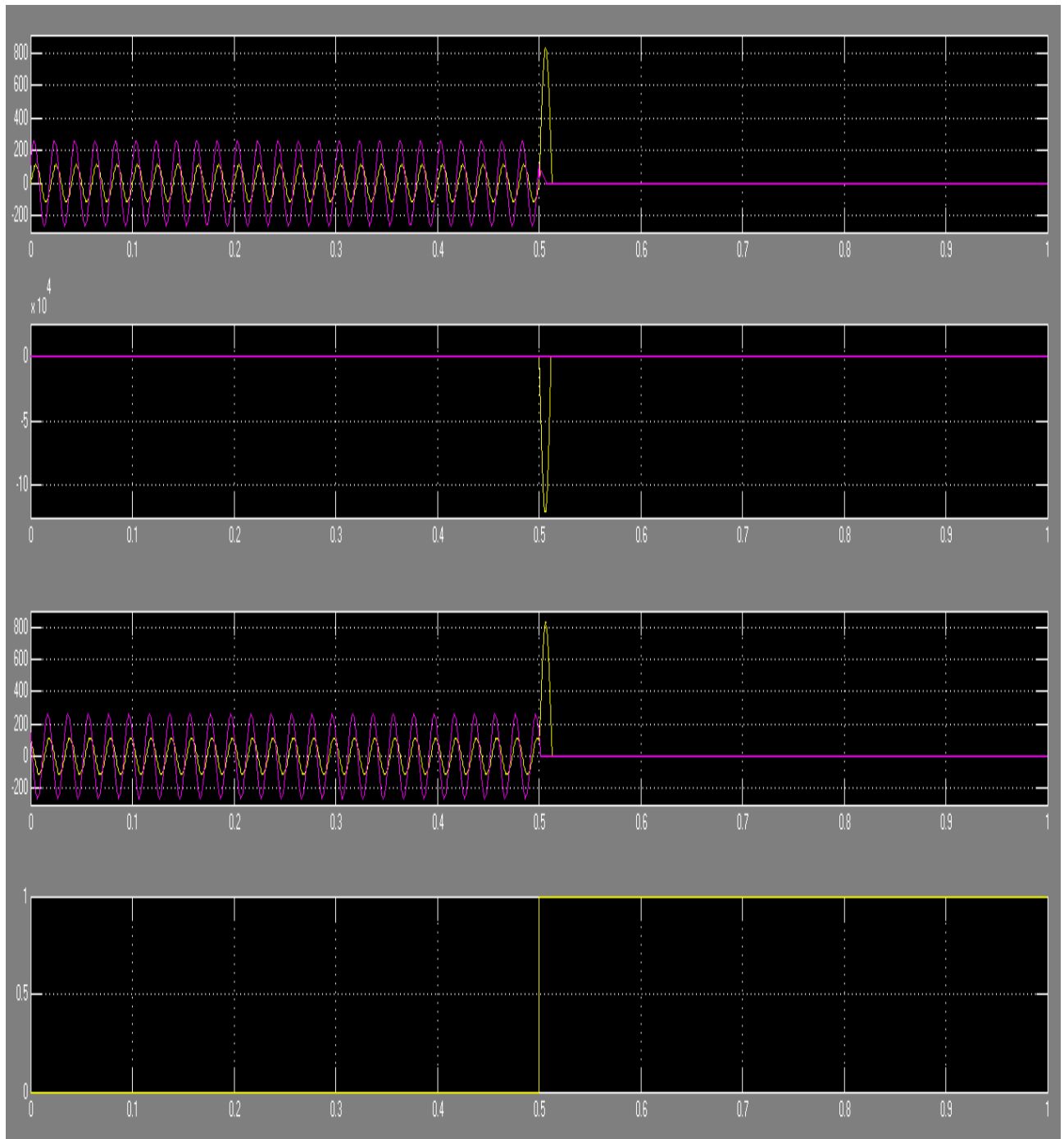


Ilustración 4.29

4.3. Cortocircuito fase C-tierra.

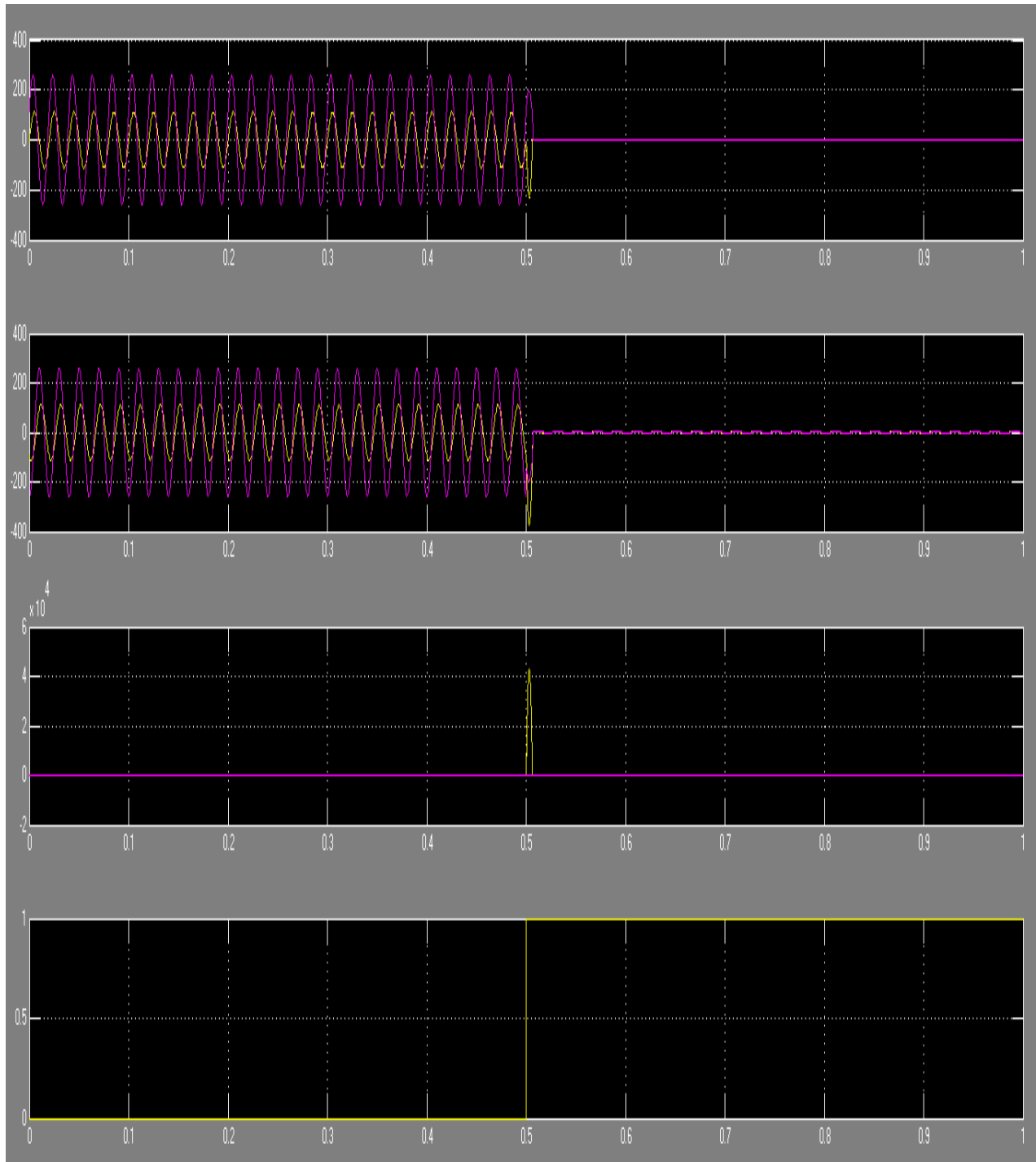


Ilustración 4.30

4.4. Cortocircuito bifásico entre fases A y B.

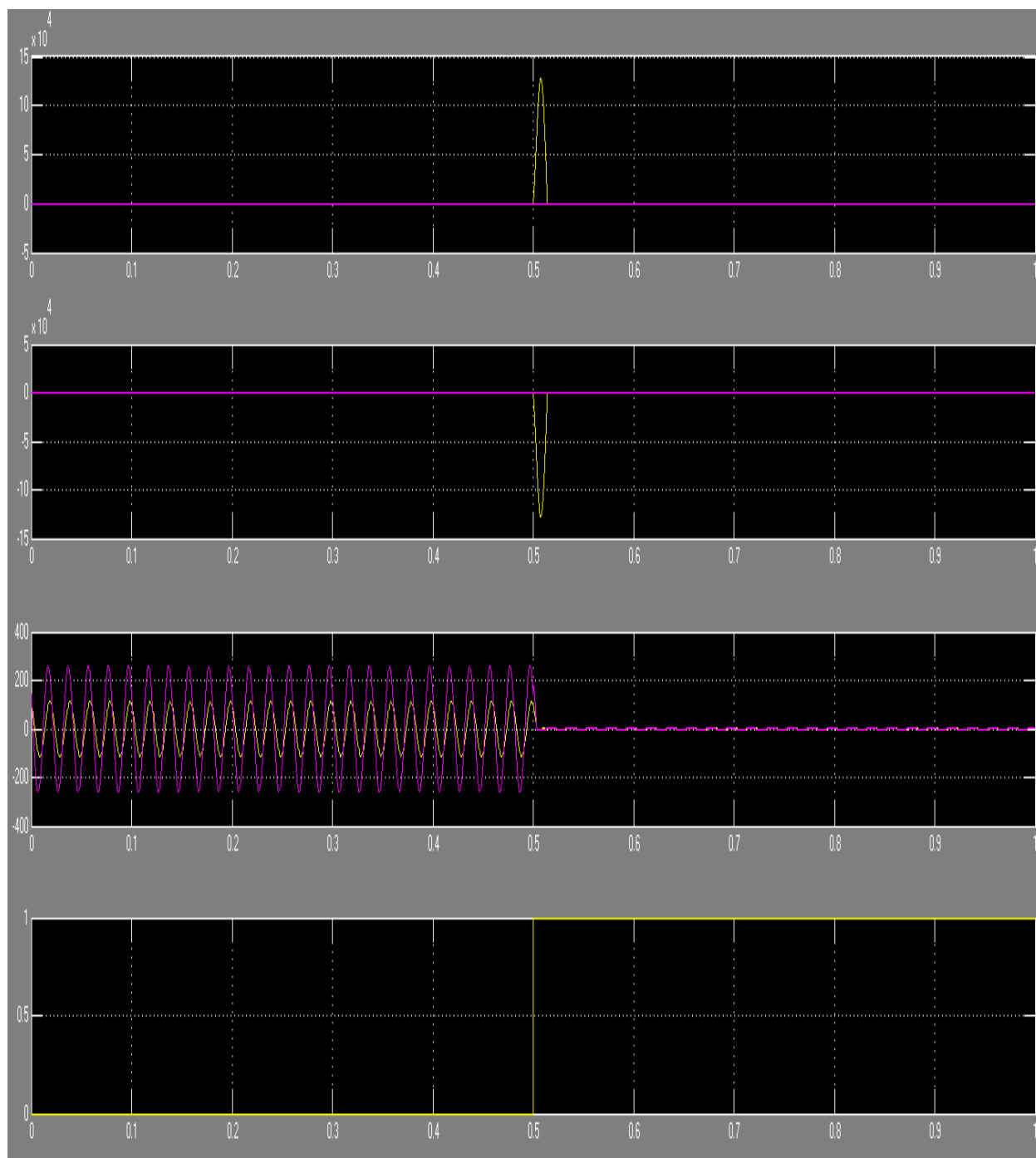


Ilustración 4.31

4.5. Cortocircuito bifásico entre fases A y C.

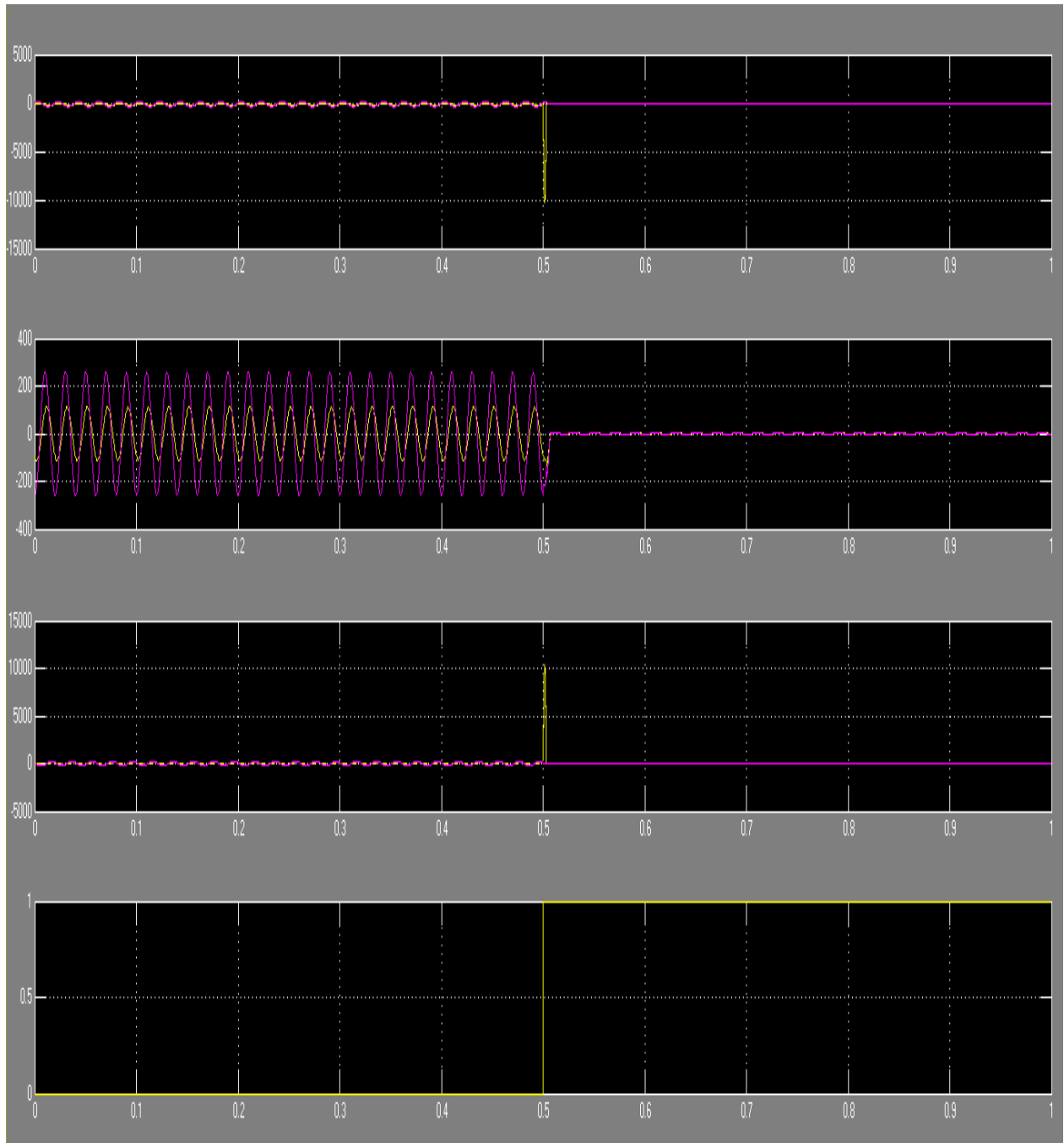


Ilustración 4.32

4.6. Cortocircuito bifásico entre fases B y C.

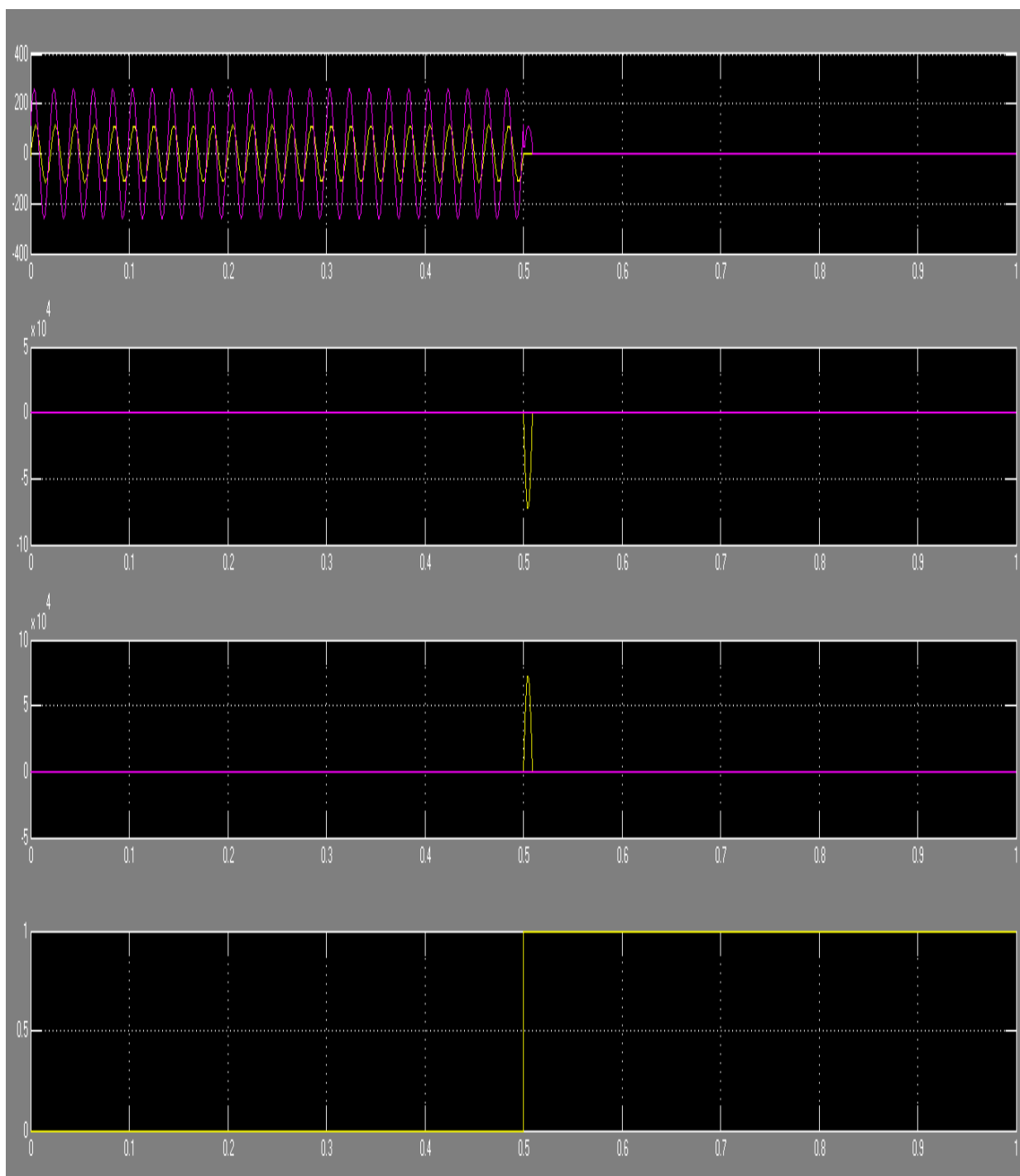


Ilustración 4.33

4.7. Cortocircuito bifásico A-B tierra.

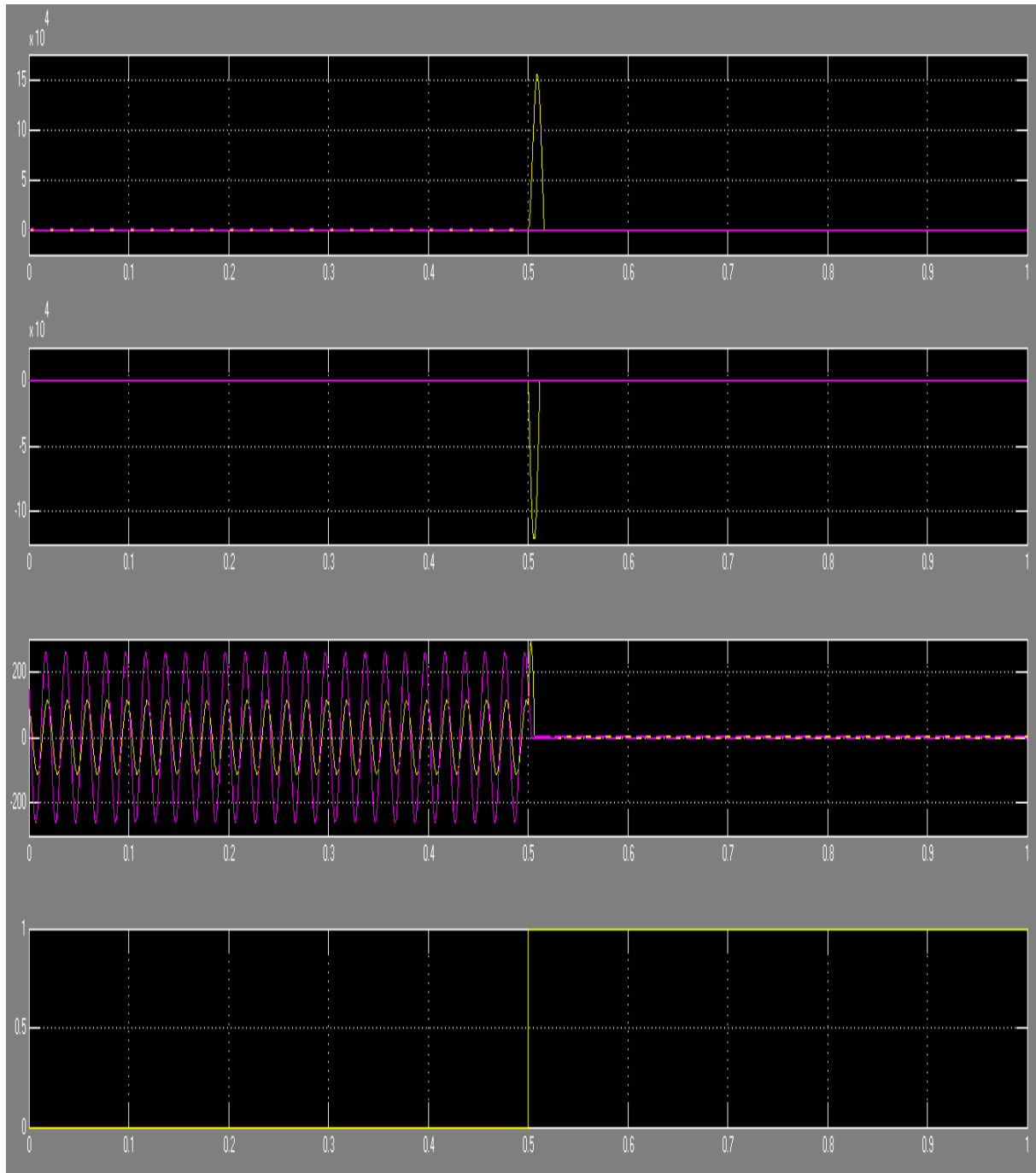


Ilustración 4.34

4.8. Cortocircuito bifásico A-C tierra.

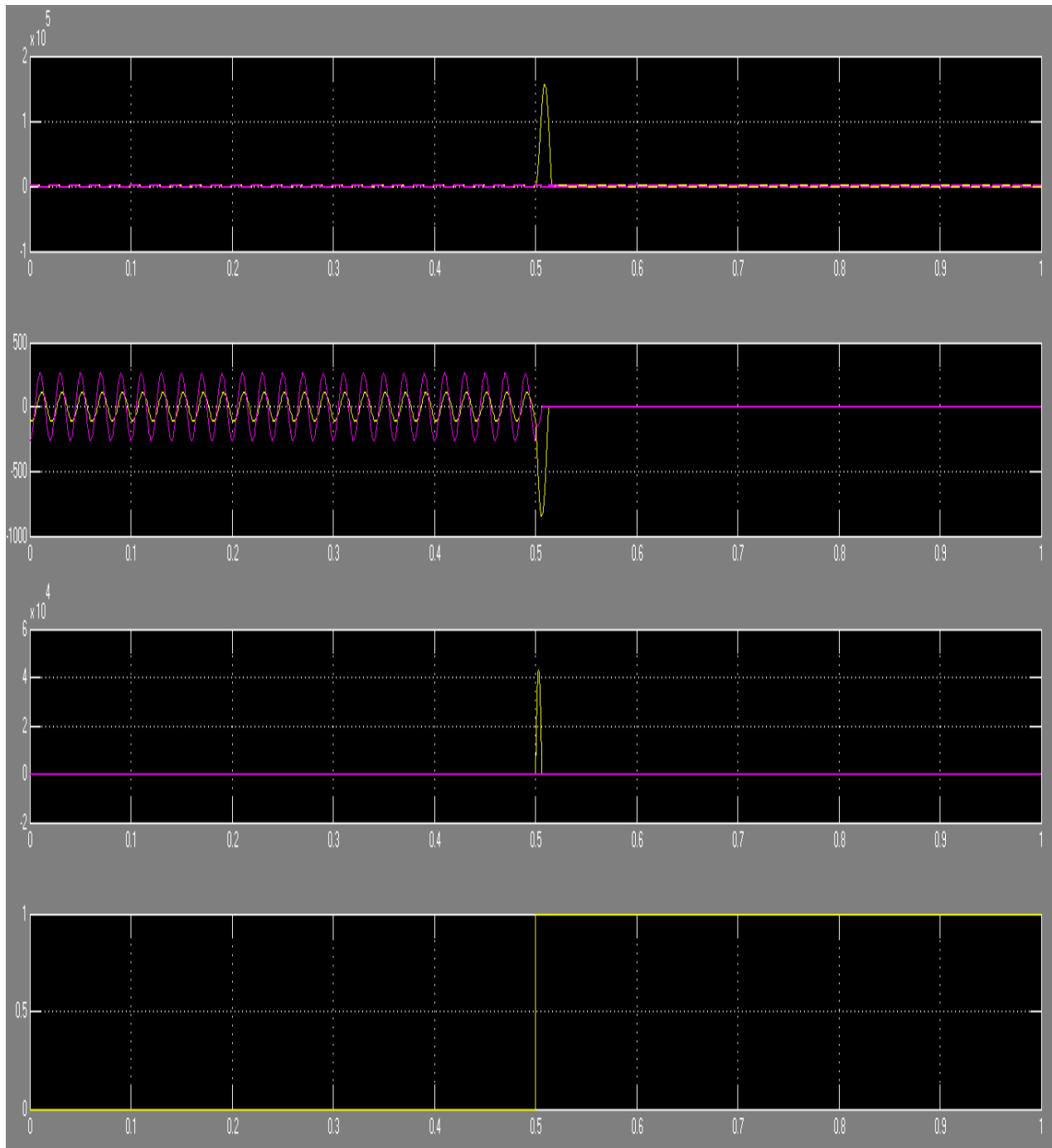


Ilustración 4.35

4.9. Cortocircuito bifásico B-C tierra.

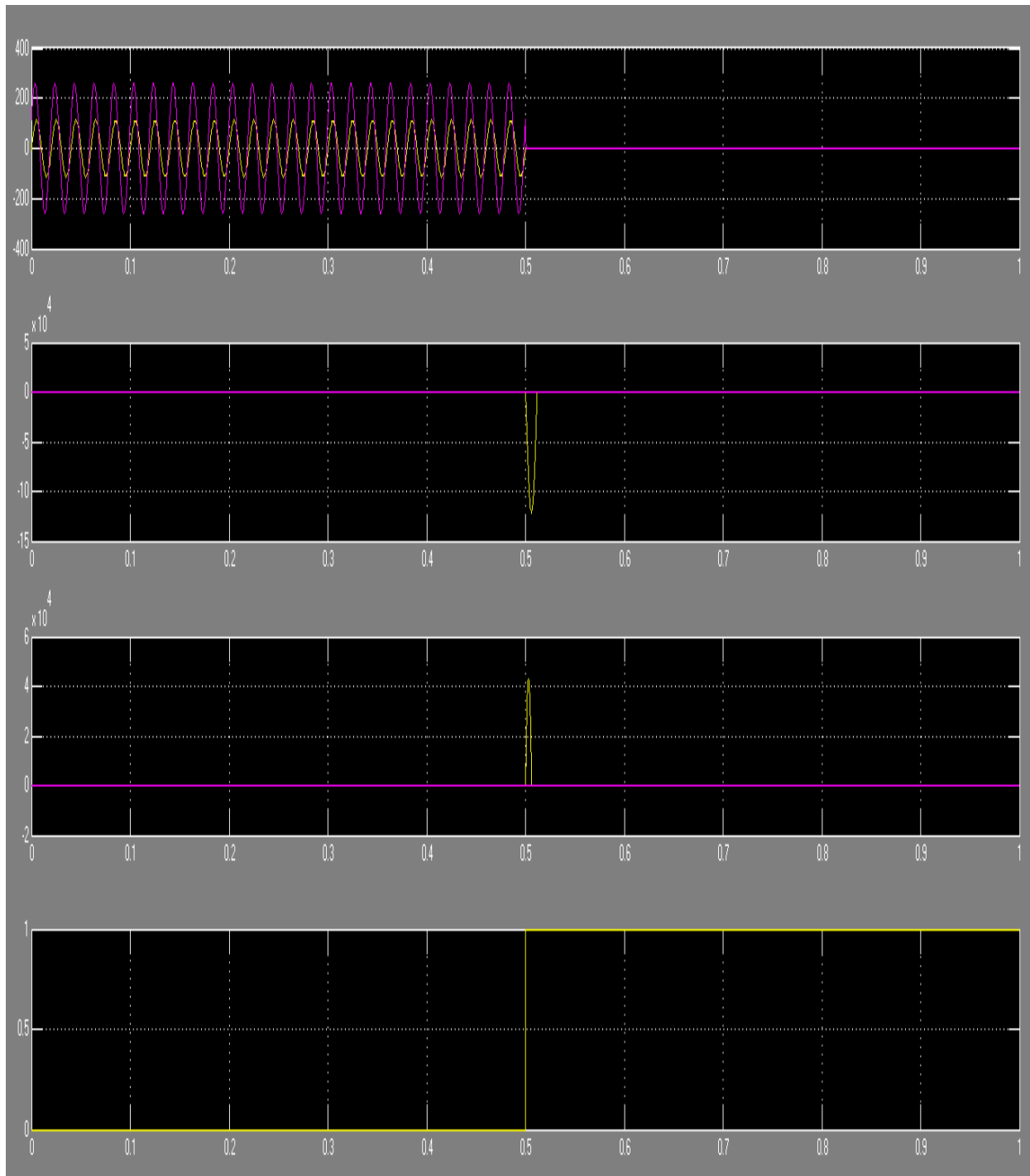


Ilustración 4.36

4.10. Cortocircuito trifásico a tierra.

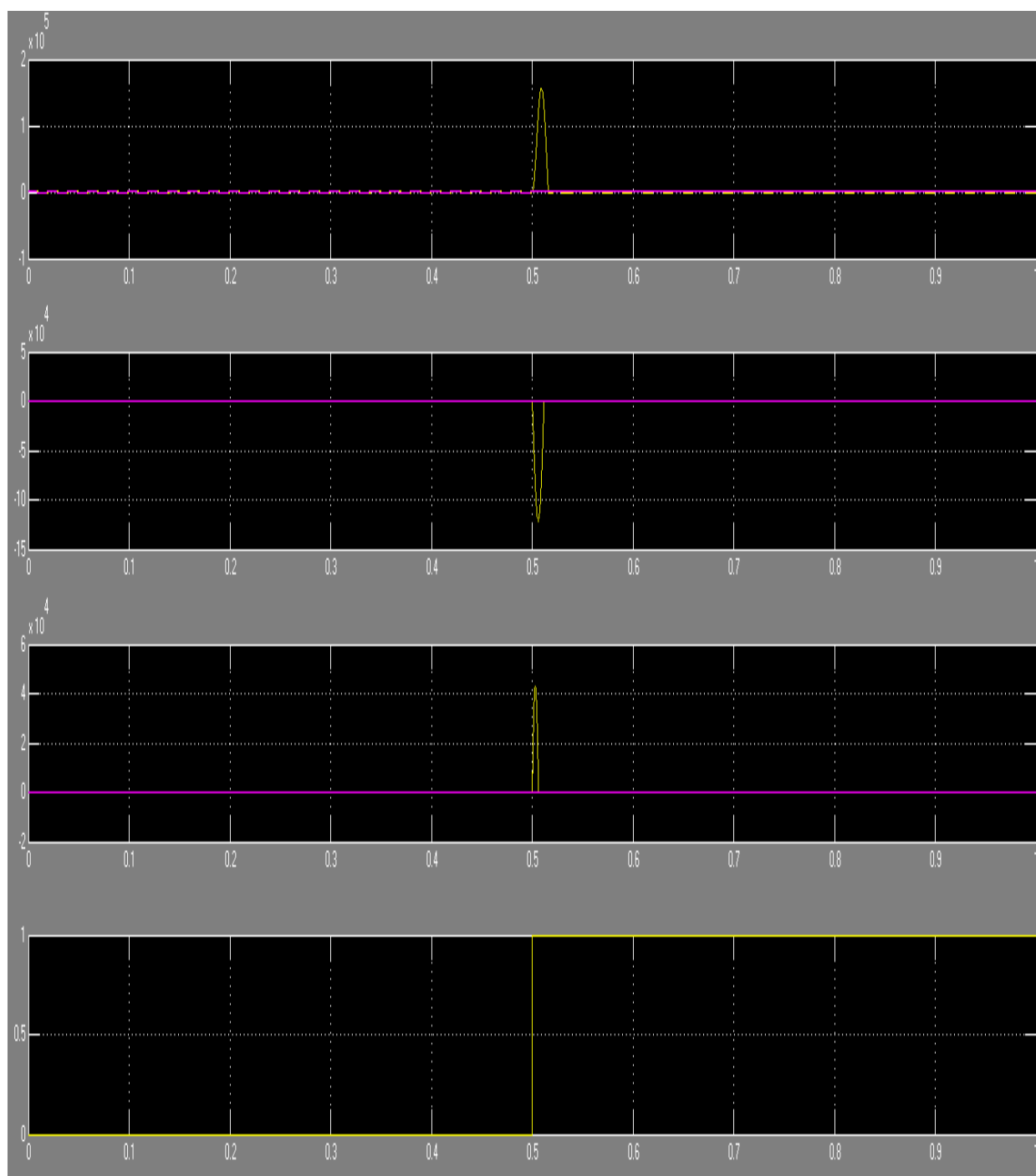


Ilustración 4.37

4.11. Cortocircuito trifásico.

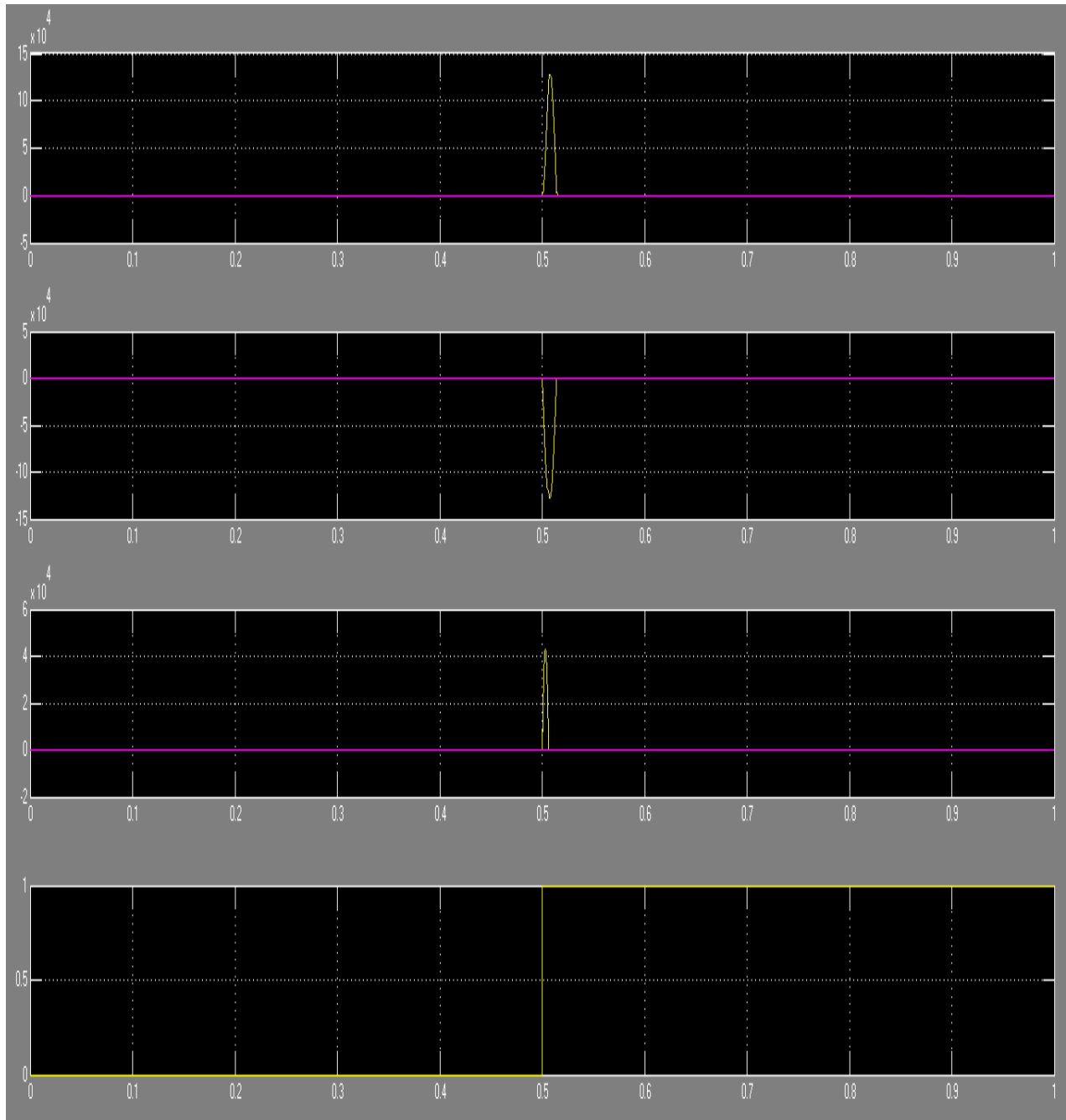


Ilustración 4.38

Se demuestra como el relé actúa ante cualquier falta provocada dentro de la zona del transformador. Al producirse el disparo de la protección, se envía la orden de abrir los interruptores asociados al relé de forma inmediata, con lo que se consigue aislar el transformador y abrir el circuito.

5. Falta externa. En este caso, se provoca un cortocircuito fuera de la zona de protección del relé, siendo esta zona la que se encuentra entre los dos conjuntos de amperímetros.

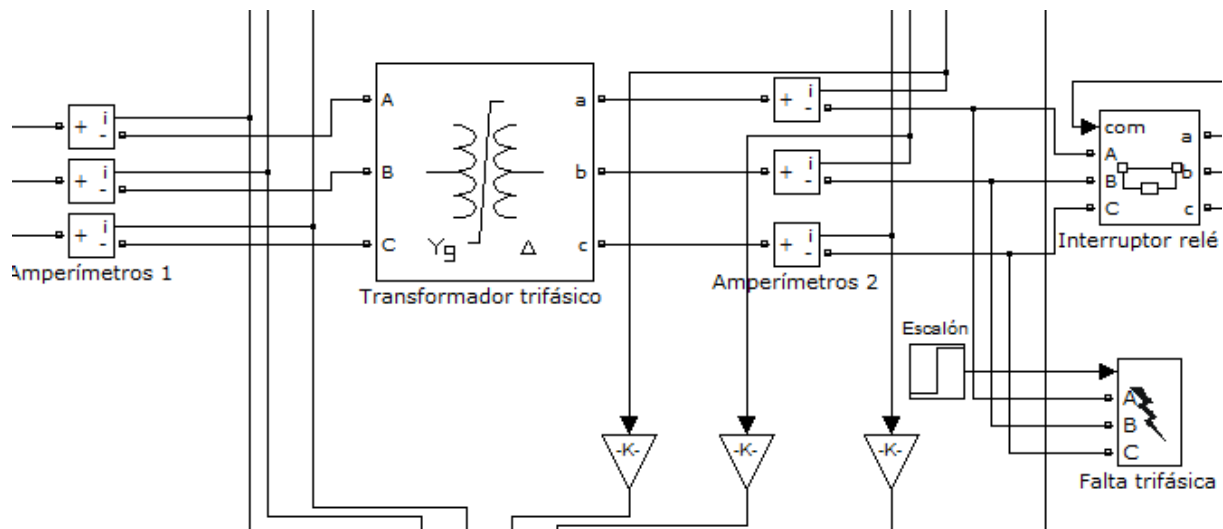
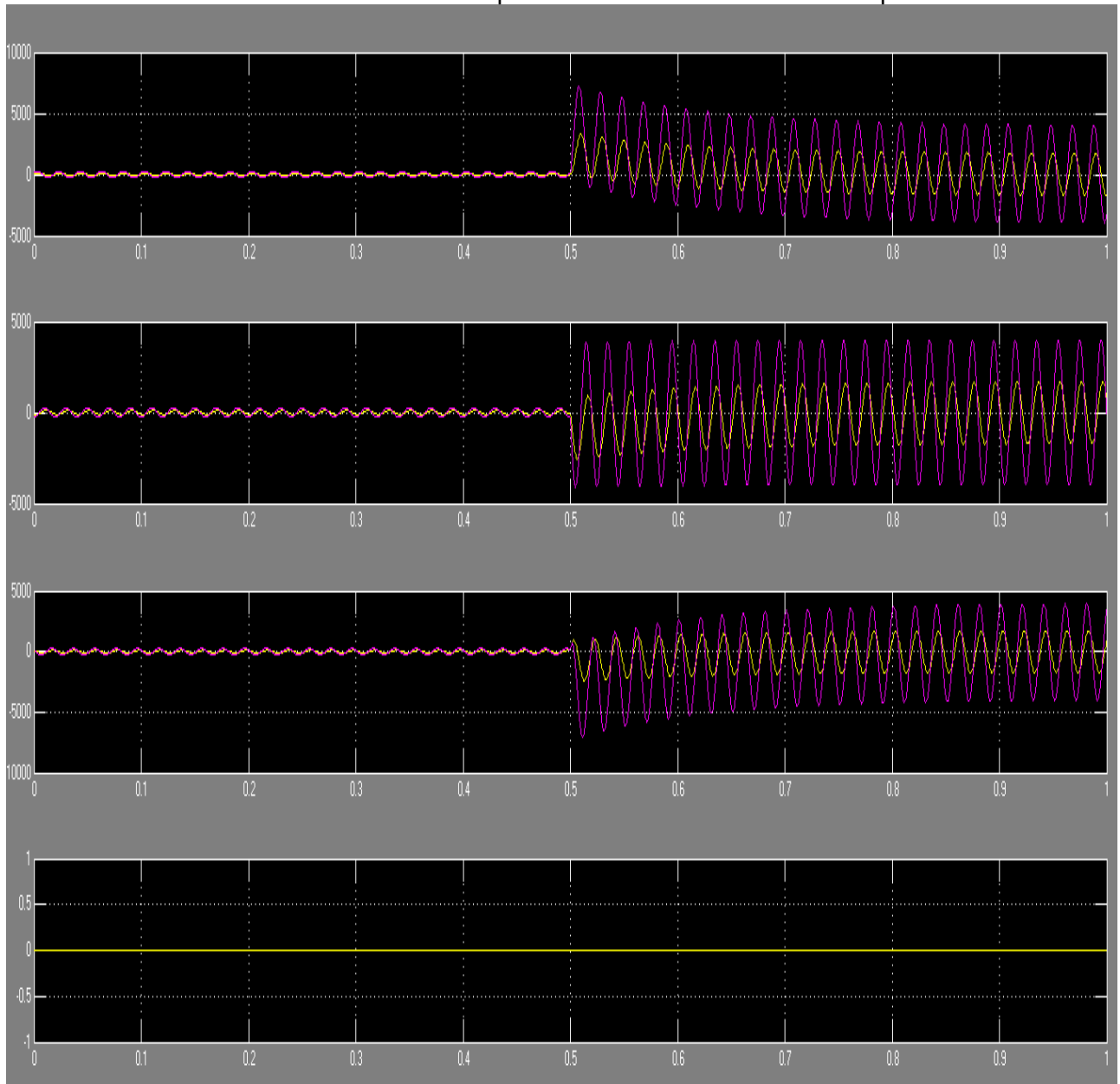


Ilustración 4.39

Se aplicará un cortocircuito trifásico en mitad de la simulación, es decir, en 0,5 segundos.

**Ilustración 4.40**

El osciloscopio detecta la falla externa en 0,5 segundos pero no dispara, por lo que tiene un comportamiento correcto ante un cortocircuito externo. Es de gran importancia que la protección no dispare en esta situación porque una falta externa que no afecta al transformador no debe provocar nunca que éste quede aislado por la apertura de los interruptores asociados al relé.

6. Desconexión accidental. En el funcionamiento normal de un transformador se puede producir la desconexión accidental de cualquiera de sus componentes.

En este caso se provocará la desconexión de una de las fases del terminal del transformador. Esta situación puede provocar corrientes elevadas poniendo en peligro la máquina protegida.

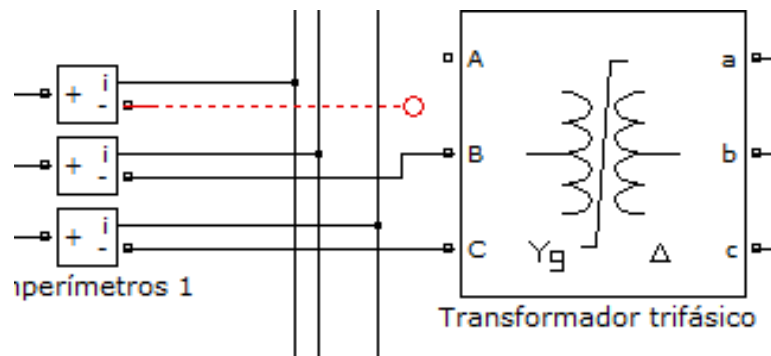
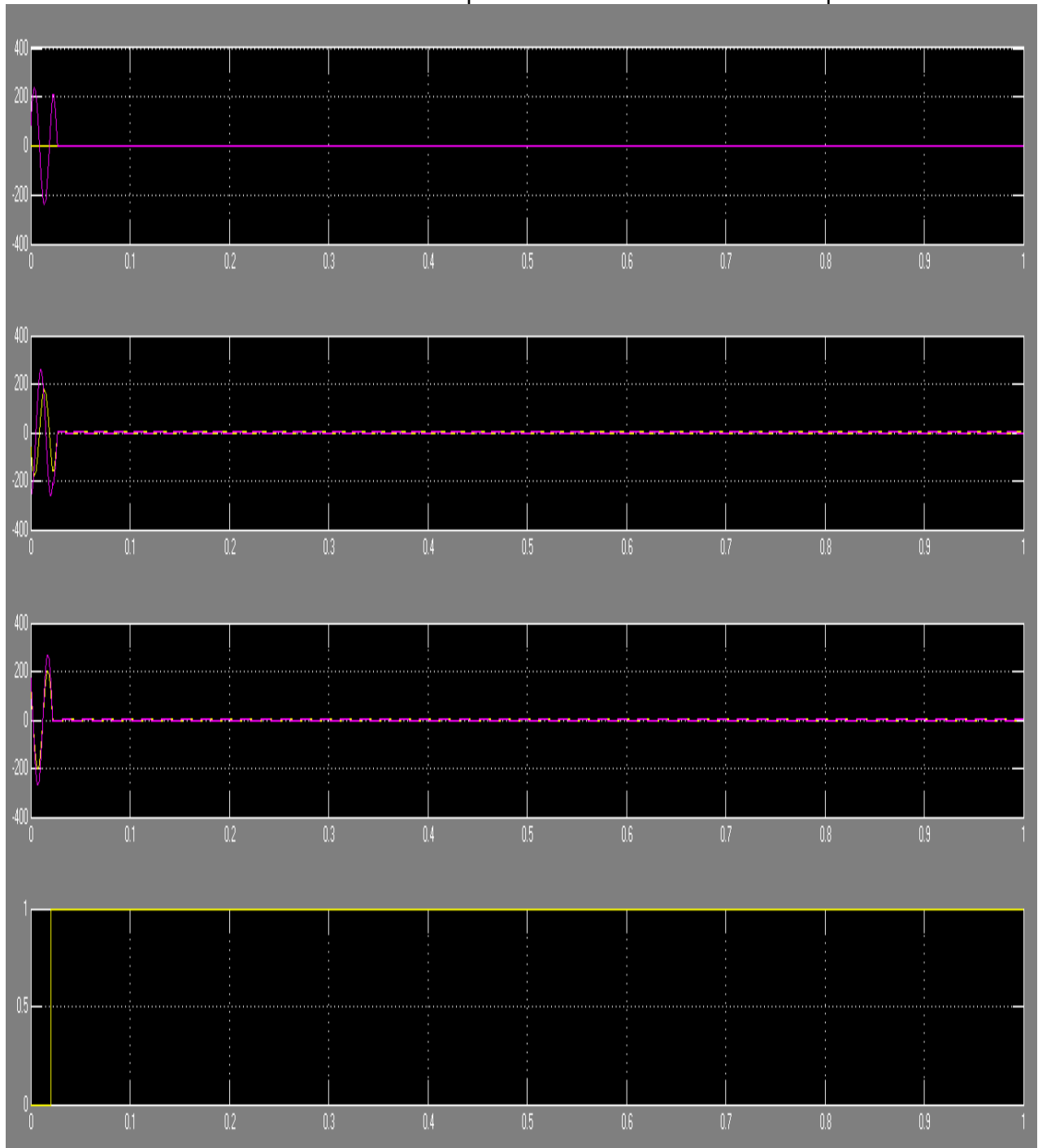


Ilustración 4.41

**Ilustración 4.42**

El relé detecta este fallo en unos 0,02 segundos debido a que la corriente diferencial está dentro de la zona de disparo. Se evita, así, que esta corriente atraviese el transformador durante un tiempo elevado y pueda poner en peligro su funcionamiento o el de cualquiera de sus componentes.

7. Corriente de conexión y sobreexcitación. Se simulará una sobretensión entre 0,1 y 0,5 segundos. En medio de esta sobretensión se simulará una corriente de conexión mediante el cierre del interruptor 1, que inicialmente estará abierto, en 0,3 segundos.

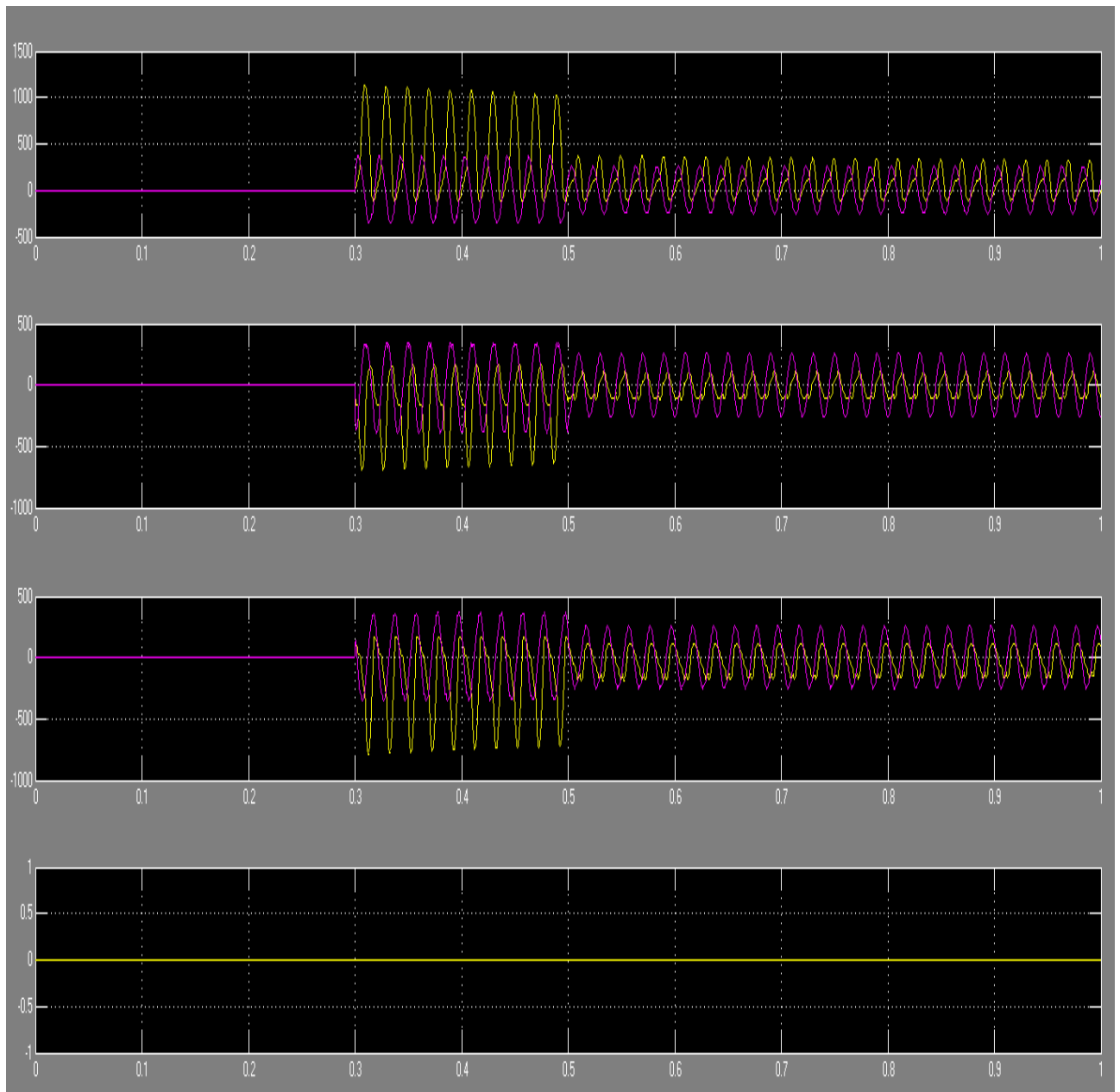


Ilustración 4.43

Esta situación puede crear una corriente diferencial alta que pueda confundir al relé. Sin embargo, la protección no actúa al diferenciar una corriente de conexión por sobreexcitación de la máquina.

El motivo por el que la protección no actúa es el armónico 3. Se mantiene dentro del intervalo fijado en el momento de la sobreexcitación como se comprueba a continuación.

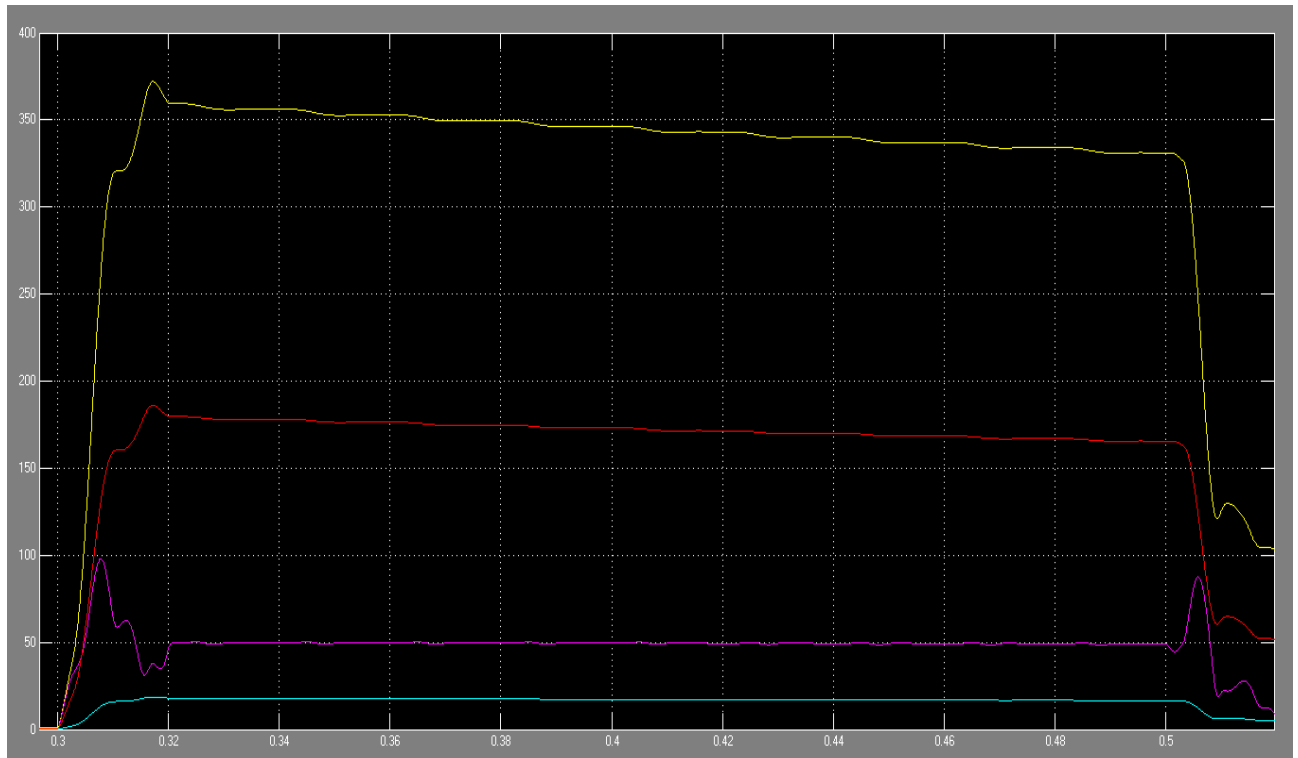


Ilustración 4.44

El tercer armónico se encuentra siempre dentro de los límites fijados, por encima del 5% de la componente fundamental (color azul) y por debajo del 50% (color rojo). La protección puede detectar una corriente diferencial que pueda provocar una situación de falta, pero al cumplirse la condición del tercer armónico reconoce una corriente de conexión por sobreexcitación y no actúa de forma incorrecta.

8. Corriente de conexión y sobrecarga. Para este caso concreto se conectará la carga 2 en paralelo con la carga 1. En 0,3 en interruptor 1 cerrará sus contactos para simular una corriente de conexión, posteriormente en 0,6 el interruptor 2 cerrará para conectar la carga 2 y simular una sobrecarga.

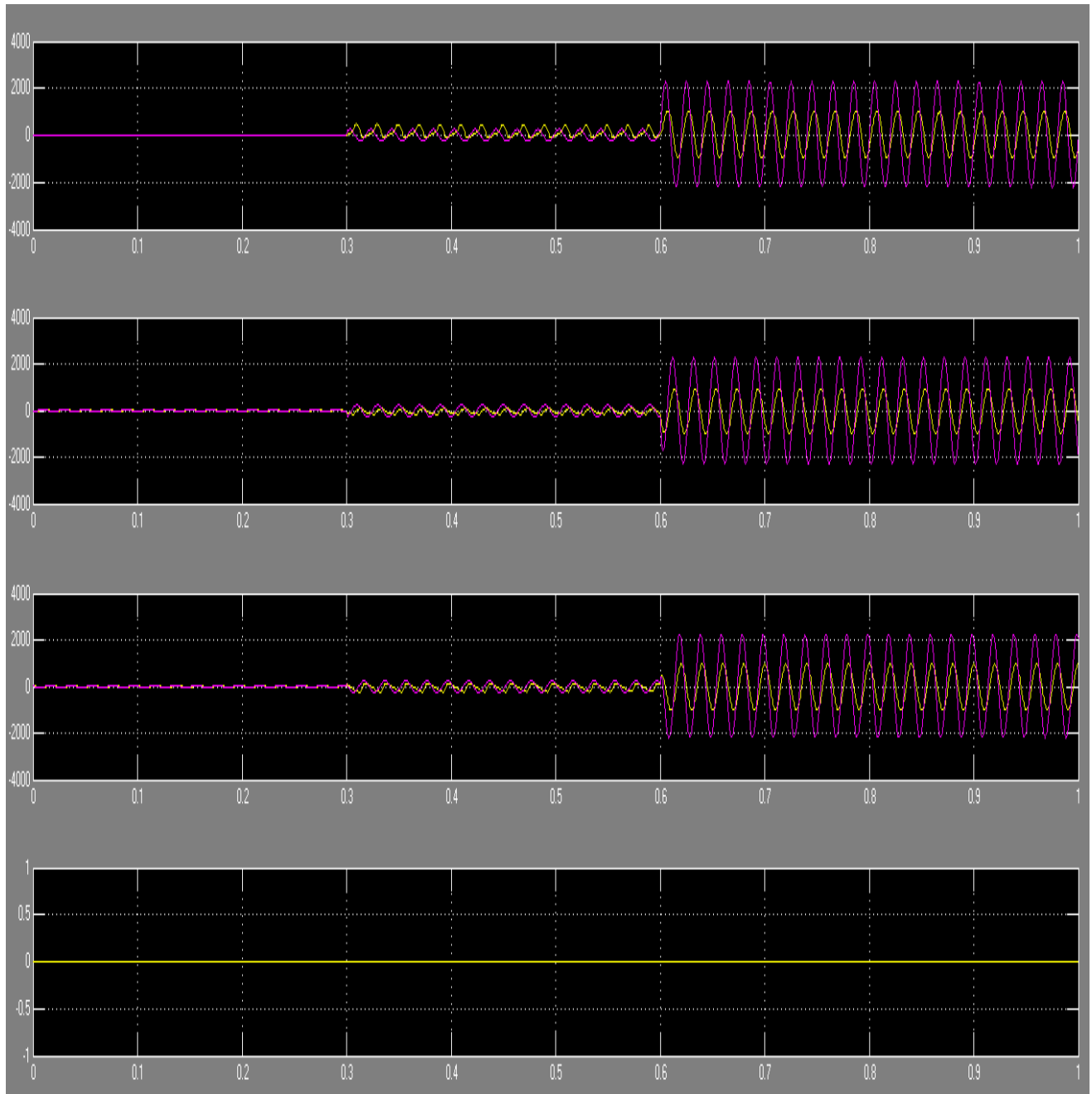
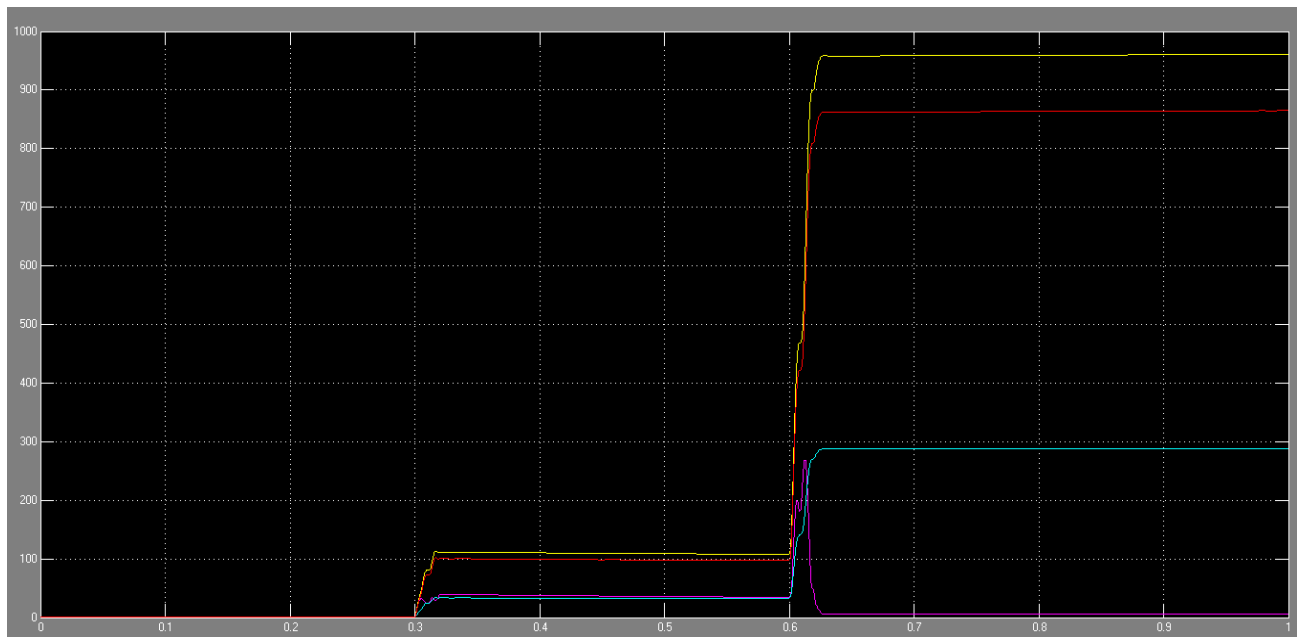


Ilustración 4.45

El interruptor no dispara en ninguno de los casos anteriores, como se muestra en la imagen anterior.

**Ilustración 4.46**

En la conexión el segundo armónico permanece dentro del intervalo. Se mantiene ahí hasta que se produce la sobrecarga, momento en el cual, tras varios milisegundos que es el tiempo que puede durar la corriente diferencial elevada, se disipa.

**Ilustración 4.47**

El tercer armónico tiene un comportamiento similar. En el instante en el que se produce la sobrecarga se sigue manteniendo dentro del intervalo, una vez que se disipa la corriente diferencial toma un valor normal.

9. Corriente de conexión y falta interna. Para simular esta situación, el interruptor 1 cerrará en 0,3 segundos y el cortocircuito trifásico se provocará en 0,5 segundos.

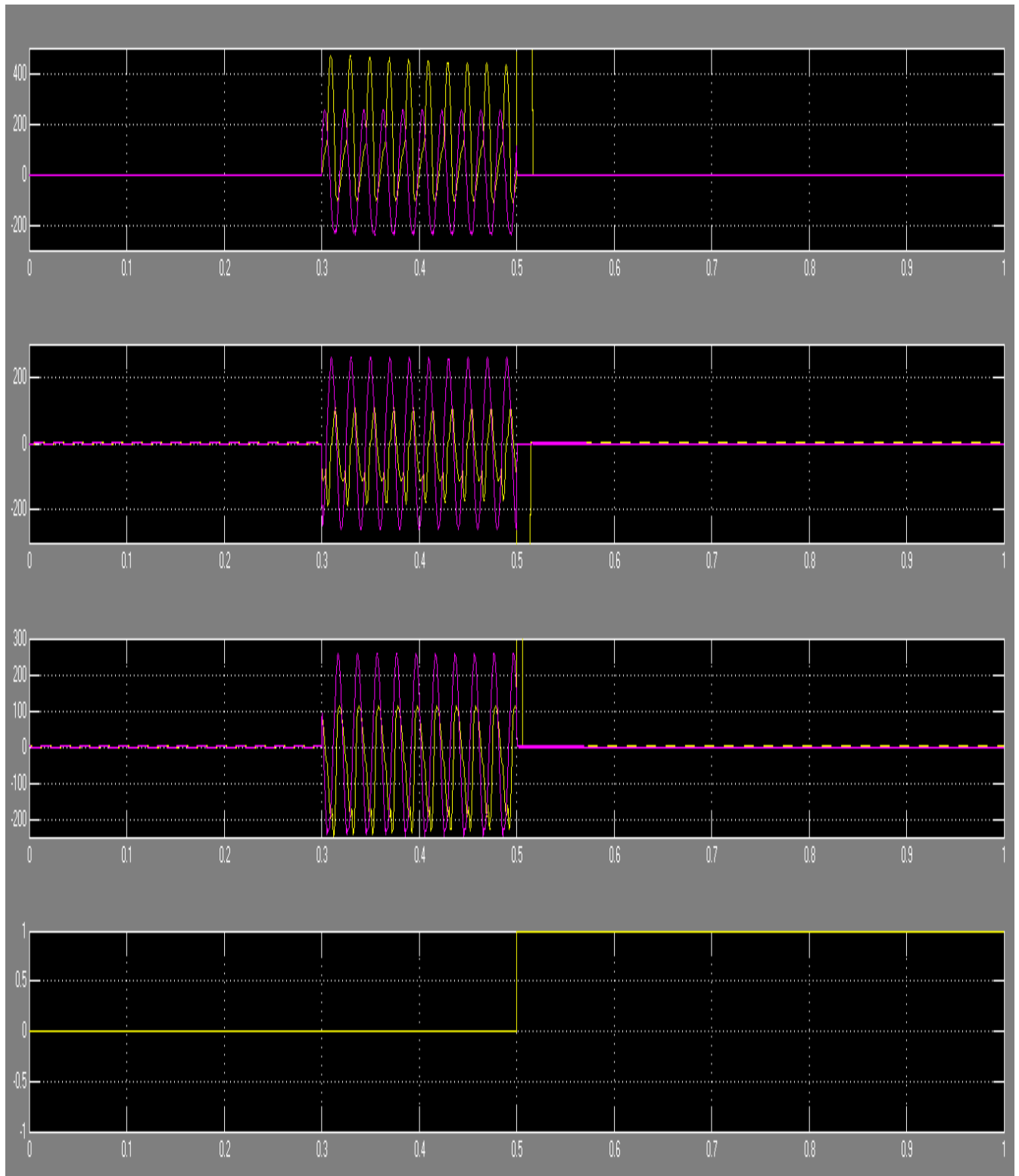


Ilustración 4.48

El relé no dispara en el momento de la conexión pero si lo hace al detectar el cortocircuito en la zona de protección del transformador.

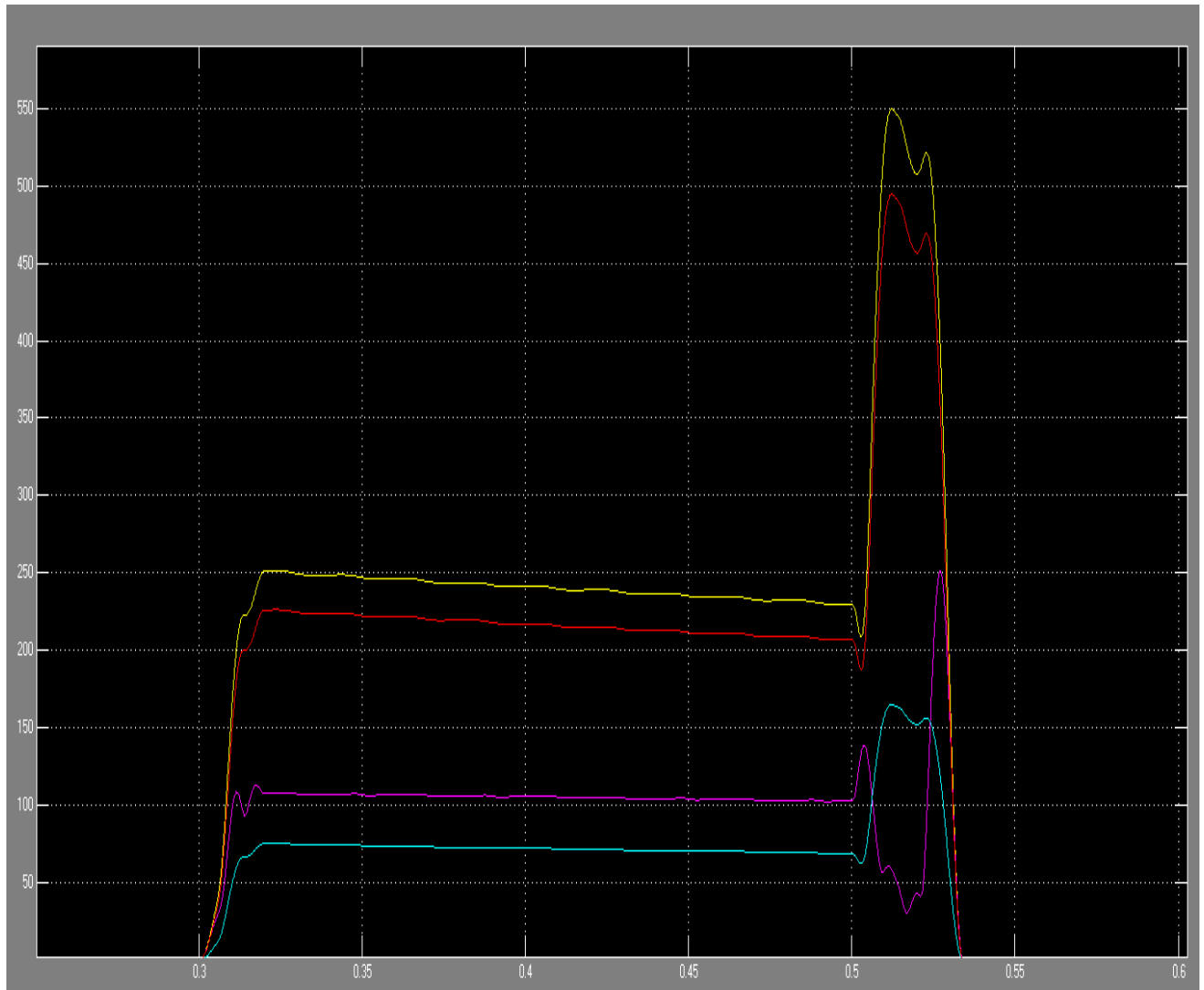


Ilustración 4.49

En la conexión el comportamiento del armónico es el correcto, sin embargo, al producirse la falta interna este comportamiento no es correcto, ya que su valor desciende por debajo del 30% de la componente fundamental de la corriente primaria. El relé dispara ante esta situación al cumplirse los dos requisitos para su actuación: la de una corriente diferencial elevada y la de un valor de 2º armónico por debajo del intervalo fijado.

10. Corriente de conexión y falta externa. En 0,3 segundos se cierra el interruptor 1 y en 0,5 segundos se produce un cortocircuito trifásico exterior a la zona protegida.

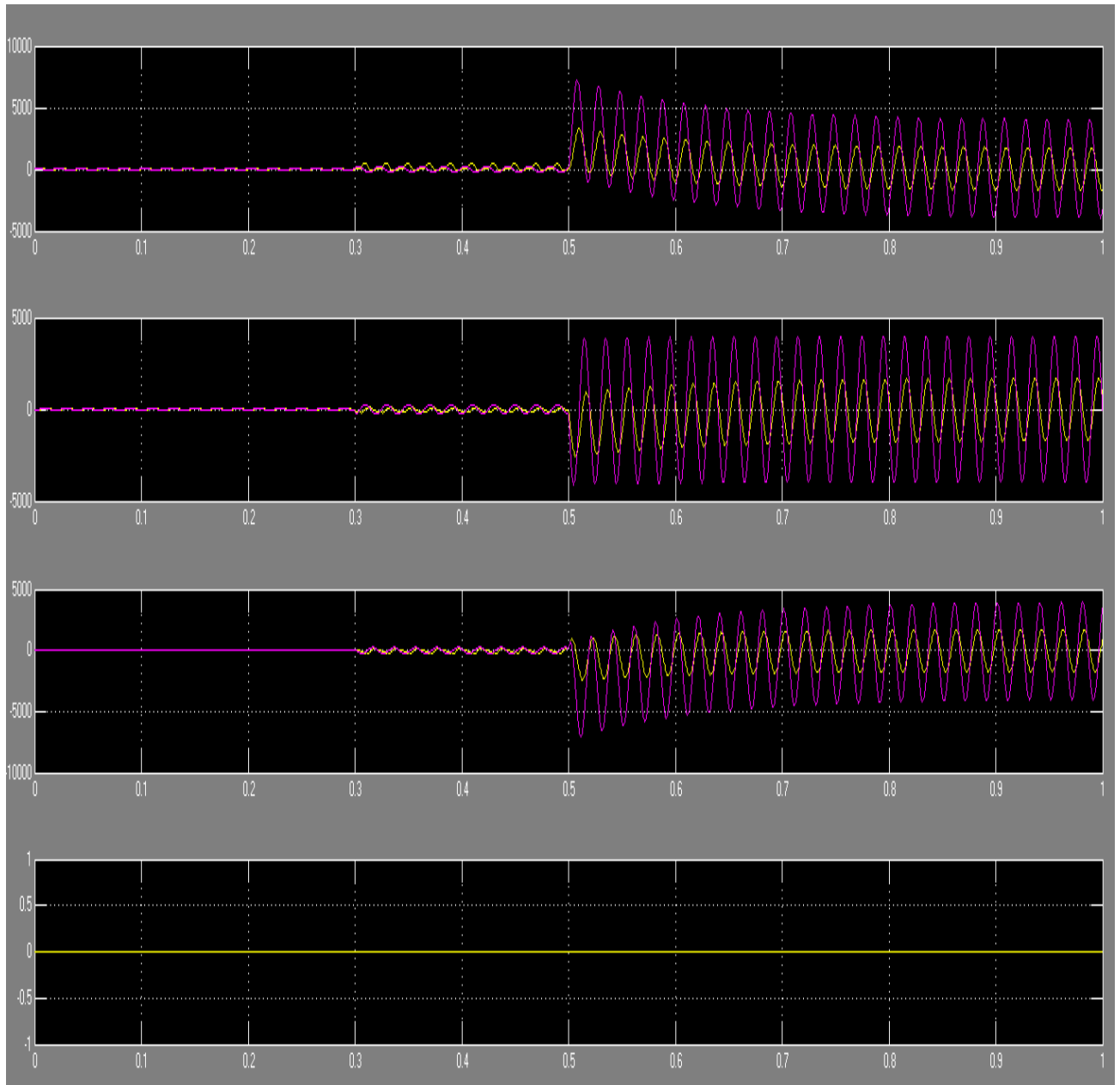


Ilustración 4.50

Cuando se cierra el interruptor 1 aparece una corriente de conexión en el transformador, al producirse el cortocircuito trifásico la onda de corriente se distorsiona pero se estabiliza varios ciclos después. El relé permanece en un estado inicial de no disparo, por lo tanto, funciona correctamente.

11. Falta interna y falta externa. Se provocarán dos cortocircuitos trifásicos, uno dentro de la zona de intervención del relé, y otro fuera de esta zona. El fallo externo se producirá en 0,3 segundos y el fallo interno en 0,6 segundos.

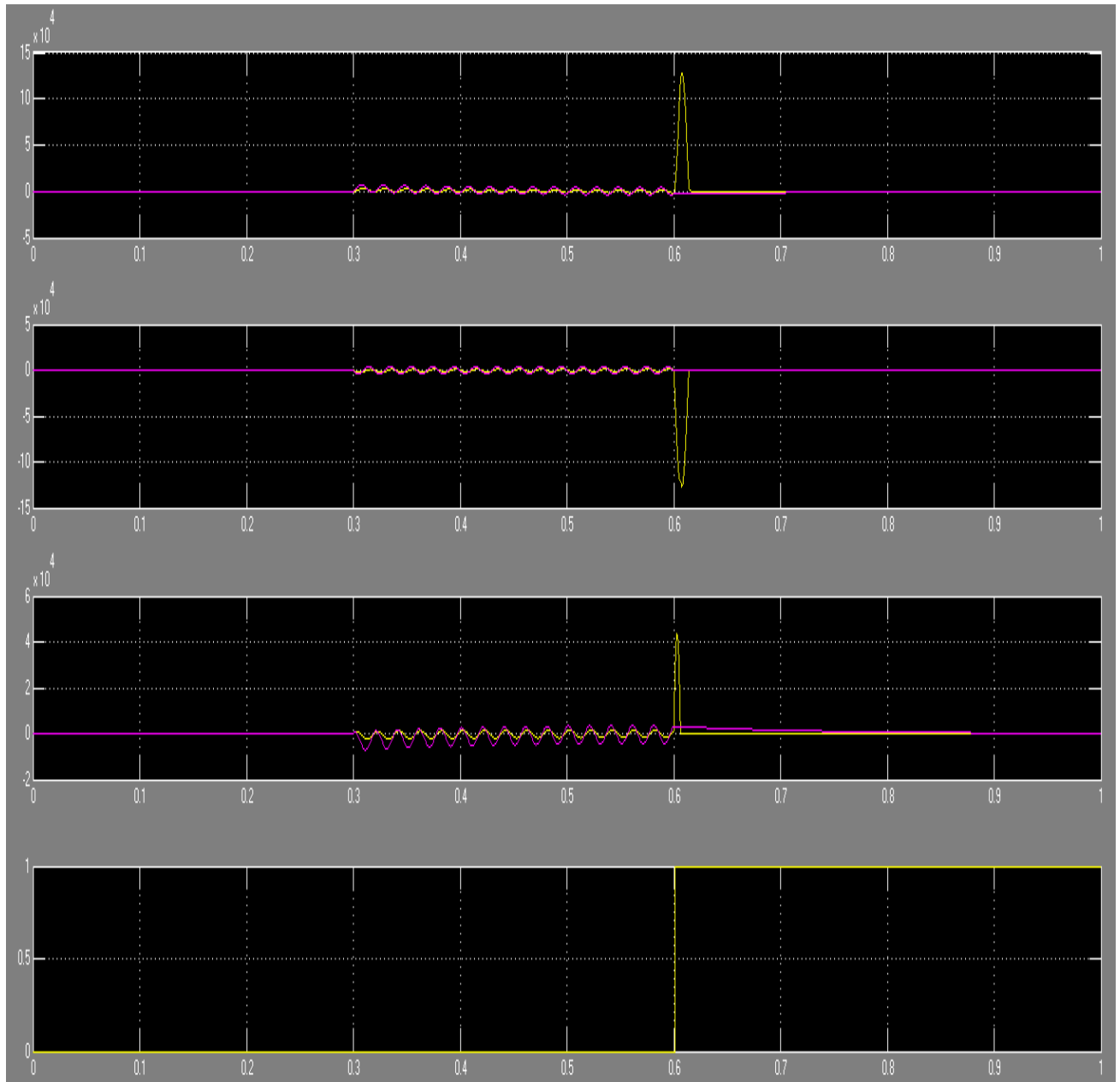


Ilustración 4.51

El relé no dispara ante la falta externa pero si lo hace ante el cortocircuito interno en 0,6 segundos, provocando la apertura de los interruptores asociados y aislando el transformador.

5. Análisis de los resultados de la simulación

Las distintas situaciones en las que se puede ver envuelto el normal funcionamiento del transformador se han representado en el apartado anterior. Se han desarrollado varios casos para observar el funcionamiento de la protección, todo ello se puede resumir en el siguiente cuadro:

Situación	Respuesta del relé
Corriente de conexión	No dispara
Sobreexcitación	No dispara
Sobrecarga	No dispara
Cortocircuito fase A tierra	Dispara
Cortocircuito fase B a tierra	Dispara
Cortocircuito fase C a tierra	Dispara
Cortocircuito fases A y B	Dispara
Cortocircuito fases A y C	Dispara
Cortocircuito fases B y C	Dispara
Cortocircuito fases A y B a tierra	Dispara
Cortocircuito fases A y C a tierra	Dispara
Cortocircuito fases B y C a tierra	Dispara
Cortocircuito trifásico a tierra	Dispara
Cortocircuito trifásico	Dispara
Falta externa	No dispara
Desconexión accidental	Dispara
Corriente de conexión y sobreexcitación	No dispara
Corriente de conexión y sobrecarga	No dispara

Corriente de conexión y falta interna	Dispara
Corriente de conexión y falta externa	No dispara
Falta interna y externa	Dispara

Tabla 5.1

Tras observar los resultados obtenidos, se puede afirmar que el funcionamiento del relé diferencial es satisfactorio. Después de haber simulado los casos expuestos anteriormente se ha comprobado que el relé actúa protegiendo el transformador ante casos de falta o perturbación interna, ya sea un cortocircuito de cualquier tipo o una desconexión accidental en uno de los elementos del transformador.

En este caso concreto, no se pueden cumplimentar todos los requisitos fundamentales que debe tener cualquier protección, ya que no es una situación de protección real. Sin embargo, la protección diferencial expuesta en este trabajo si tiene las características que se le pueden exigir: selectividad, rapidez, fiabilidad y flexibilidad.

Como ya se ha comentado, esta simulación e implementación con un software no es una reproducción exacta de una protección diferencial real. La principal diferencia es la utilización de transformadores de corriente, algo que no se ha podido implementar en el modelo desarrollado en el trabajo puesto que no existen TI en la librería de Simulink. Debido a esto no se ha podido recrear con total exactitud todos los factores de una protección con relé diferencial, como por ejemplo, la saturación de los transformadores de intensidad ya mencionados.

Se ha aclarado en otros apartados la utilización del tercer armónico y no el quinto. Este hecho se debe también a la imposibilidad de implementar TI en Simulink.

Se puede afirmar que una protección diferencial con discriminación por armónicos es un método bastante bueno para proteger un transformador de potencia, desde el punto de vista de Simulink. De todos modos, pueden existir situaciones en las que la protección no actúe o lo haga de forma intempestiva.

Bibliografía

Montané, P. (1993). *Protecciones en las instalaciones eléctricas: evolución y perspectivas*. Marcombo.

Suárez Creo, J. M. (2009). *Protección de instalaciones y redes eléctricas (2ª edición)*. Torculo Ediciones.

Iriondo Barrenetxea, A. (1997). *Protecciones de sistemas de potencia*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco.

Fraile Mora, J. (2003). *Máquinas eléctricas (5ª edición)*. McGraw-Hill.

Orille Fernández, A. L. (1993). *Centrales eléctricas III*. Ediciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Arrillaga, J.; Eguíluz, L. I. (1994). *Armónicos en sistemas de potencia*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.

Trashorras Montecelos, J. (2015). *Subestaciones eléctricas*. Paraninfo.

Harlow, J. H. (2007). *Electric power transformer engineering (2nd edition)*. CRC Press.

Katsikis, V. N. (2012). *Matlab – A fundamental tool for scientific computing and engineering applications (Volume 1)*. InTech.