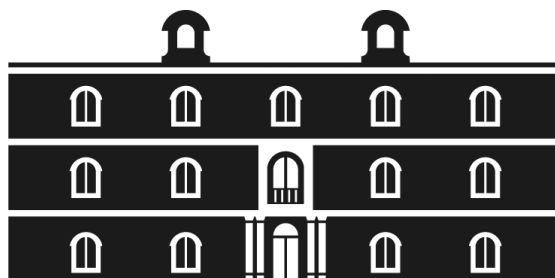




Universidad
Politécnica
de Cartagena



industriales
etsii UPCT

Desarrollo e Implementación de una Función de Protección Diferencial en el Sistema SASensor de la empresa Locamation B.V.

Resumen en Castellano

Titulación: Máster Energías Renovables
Alumno/a: Giménez Sánchez, Miguel Ángel
Director/a/s: Fuentes Moreno, Juan Álvaro
Molina García, Ángel

Contenido

- Introducción 2
 - Redes Inteligentes 2
 - Sistema SASensor 3
 - Concepto SASensor 4
- Protección Diferencial en Transformadores 5
 - Introducción 5
 - Investigación Protección Diferencial en Transformadores 5
 - Corriente de arranque 7
 - Métodos para evitar falsos disparos por corrientes de arranque 8
 - Productos en el mercado 11
- Protección Diferencial en Transformadores. Propuesta 14
 - Simulaciones 16
 - Pantalla de configuración en el sistema SASensor 20
- Protección diferencial por comparación de potencia 22
 - Modelo de Transformador 22
- Conclusiones y recomendaciones para continuar el trabajo 23

Introducción

Asegurar el uso eficiente y sostenible de los recursos naturales es uno de los retos más importantes a los que se enfrenta Europa actualmente. Mejorar la infraestructura energética es necesario para conseguir este objetivo. Sin una seria modernización de las redes eléctricas existentes, la introducción de energías renovables se frenaría, la seguridad de las redes se vería comprometida, se perderían oportunidades de ahorro energético, y el mercado energético se desarrollaría a un ritmo más bajo [1]. Estas nuevas y modernizadas redes eléctricas son conocidas como Redes Inteligentes (Smart Grids).

Redes Inteligentes

Una Red Inteligente se puede definir como una red eléctrica modernizada que incluye comunicación digital entre proveedor y consumidor, medidores inteligentes y sistemas de monitorización. [1]

Los beneficios de las Redes Inteligentes son ampliamente conocidos. Las Redes Inteligentes pueden gestionar la comunicación entre diferentes tipos de consumidores y proveedores. Crea posibilidades sin precedentes para consumidores permitiendo controlar y gestionar sus patrones de consumo, fomentando el uso eficiente de la energía. Las Redes Inteligentes serán la columna vertebral del futuro sistema energético libre de fuentes de generación basadas en el carbón. Permitirán la integración de grandes cantidades de energías renovables y vehículos eléctricos manteniendo la disponibilidad de usar sistemas convencionales de generación. [1]

En Europa, aproximadamente €5.5 billones han sido invertidos en cerca de 300 proyectos sobre Redes Inteligentes durante la última década (Figura 1. Algunos de estos proyectos están incluidos en [2]). Alrededor de €300 millones provienen de la Unión Europea. Como comparativa, el gobierno de Estados Unidos invirtió unos \$3.7 billones en Redes Inteligentes en 2011. El gobierno Chino también está invirtiendo en Redes inteligentes, aproximadamente \$ 7.3 billones en 2011 [1].

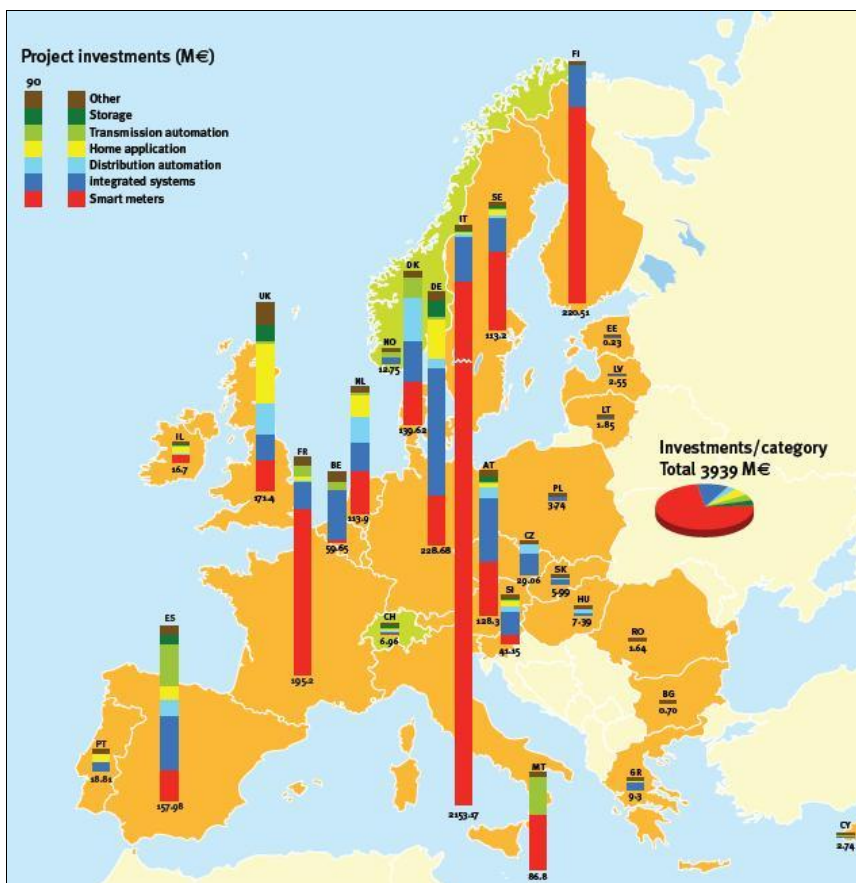


Figura 1. Vista general de las inversiones y ejecuciones de proyectos relacionados con Redes Inteligentes en la Unión Europea (Fuente: Joint Research Center, European Commission)

En este marco de Redes Inteligentes, la empresa Holandesa Locamation B.V. desarrolla soluciones innovadoras dirigidas a satisfacer los retos tecnológicos presentes en este nuevo concepto de redes eléctricas.

Sistema SASensor

Uno de los productos desarrollados por Locamation es el sistema SASensor. SASensor es un sistema destinado a la automatización de subestaciones eléctricas. Algunas de las aplicaciones que realiza este sistema son:

- Medida precisa de datos
- Control local y remoto
- Medida del consumo
- Protección por sobrecorrientes
- Control de la calidad de la señal
- Localización de fallas
- Regulación del voltaje

Concepto SASensor

El sistema SASensor está basado en una arquitectura modular y escalable. Presenta una clara separación entre la adquisición y manejo de datos (hardware) y la funcionalidad (software). Esto significa que el hardware puede combinarse con diferentes elementos de software para obtener la mayor flexibilidad y funcionalidad.

El sistema SASensor puede contener los siguientes dispositivos hardware:

- Una o más unidades de control (CCU).
- Un sistema versátil de comunicación (VCU) como enlace con el sistema de control remoto y la oficina.
- Módulos de interfaz (CIM, VIM, BIM) para medir corrientes y voltajes, y controlar interruptores.
- Ordenador operativo local (LPC) que sirve como sistema gráfico local con tecnología web Browser.
- Antena GPS que envía señales GPS al sistema de comunicación VCU.

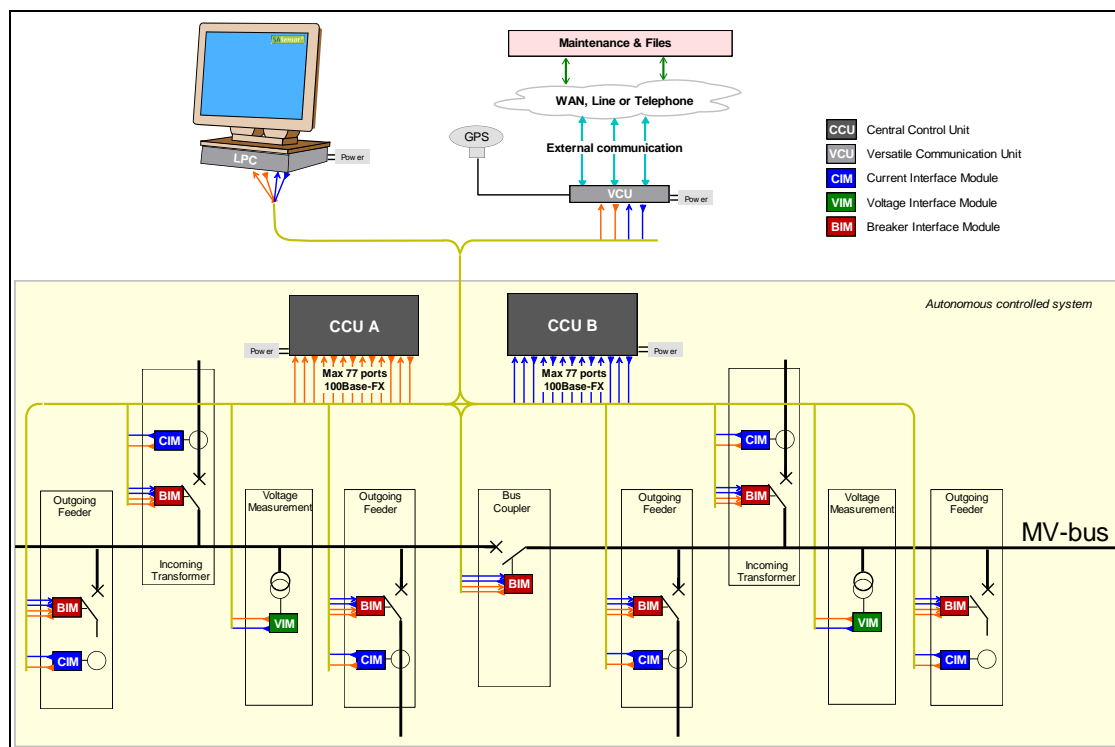


Figura 2. Sistema SASensor en una subestación.

Protección Diferencial en Transformadores

Introducción

El interés de la empresa Locamation B.V. en la investigación y desarrollo de una función de protección diferencial para transformadores, con el fin de ser implementada en el sistema SASensor, es la razón de la realización del presente proyecto. Durante 5 meses he trabajado conjuntamente con un estudiante holandés en este proyecto. Este fue el periodo de tiempo establecido por la empresa.

El proyecto fue dividido en varias etapas. Primero se realizó una investigación detallada sobre protección diferencial, incluyendo métodos normalmente usados, posibles problemas, productos en el mercado, etc. Tras la investigación, se realizaron algunos test y simulaciones en el programa Scilab con un algoritmo creado. El siguiente paso, el cual no ha sido completado, es la implementación en el sistema SASensor. Sin embargo, diferentes puntos y consejos para continuar con este proyecto han sido incluidos.

Investigación Protección Diferencial en Transformadores

El tipo de protección normalmente usado en transformadores de una potencia aproximada de 10 MVA o más es la protección diferencial basada en la comparación de la corriente en ambos lados del transformador [3]. En la Figura 3 se muestra la conexión de un relé diferencial utilizado como protección en transformador monofásico. Para un transformador trifásico cada fase se trata individualmente de la misma forma que en la Figura 3.

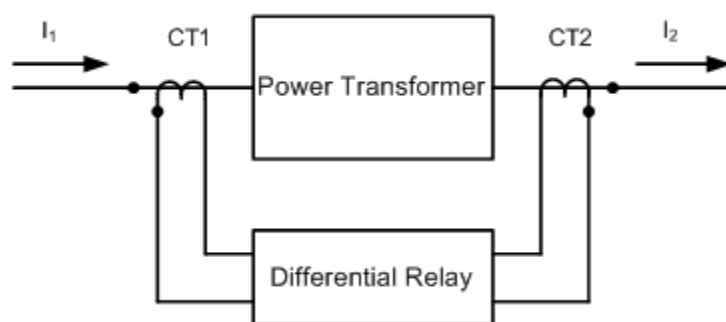


Figura 3. Protección diferencial en un transformador monofásico

La principal operación de este tipo de protección diferencial es la comparación del vector de corriente en ambos lados del transformador. En una situación normal, y sin considerar posibles errores o desplazamientos de fase, la magnitud y fase de la corriente en ambos lados del transformador debería tener el mismo valor. Una diferencia entre ambas puede indicar la presencia de una falla interna.

Pero incluso en una situación sin falla, el vector de corriente en ambos lados del transformador no presentará el mismo valor, esto es causado por:

- Transformadores con cambios de tomas.
- Corriente de magnetización
- Inexactitud de los transformadores de corriente
- Saturación de los transformadores de corriente

En relés numéricos, problemas como el desajuste entre los transformadores de corriente utilizados para reducir la corriente antes de ser comparada, puede ser solucionado matemáticamente. También la compensación de la magnitud, debido a la relación del transformador, y la compensación por desplazamiento de fase, pueden ser realizadas matemáticamente en el software del relé.

La corriente de magnetización se presenta en el primer devanado del transformador pero no en el secundario, produciendo una diferencia de corriente entre ambos. Un valor aproximado es el 5% (o menor) de la corriente nominal. Este valor permanece constante aun cuando el valor de la corriente a través del transformador se incrementa.

Otro error es el producido por la inexactitud de los transformadores de corriente. Como ejemplo el tipo 5P20 presenta un error aproximado del 3% para una corriente nominal. Este error se incrementará hasta un 5% para una corriente 20 veces la nominal.

En el caso de transformadores con cambio de tomas para modificar el voltaje, otro error deberá ser considerado. Como ejemplo, un cambio de tomas con un rango del 10% producirá un error del 10% para una corriente con valor nominal. Si la corriente aumenta, el error aumentará linealmente.

Con el fin de que el relé no se dispare a causa de estos errores, la corriente diferencial se compara con una corriente de restricción. Este valor representa la cantidad de corriente que pasa a través del transformador. Cuando esta corriente aumenta, los errores en la corriente diferencial también aumentan. Esto se utiliza para reducir la sensibilidad del relé durante situaciones con altos valores de corriente, como podría ser durante una falla externa. Existen varias alternativas para calcular esta corriente [3]:

- $I_R = K|I_1 + I_2|$
- $I_R = K(|I_1| + |I_2|)$
- $I_R = \max(|I_1|, |I_2|)$

K es una constante, normalmente 0.5 o 1.

En la Figura 4 se representa una curva de disparo típica en la protección diferencial. I_d es la corriente diferencial e I_r es la corriente de restricción, ambas en valores en por unidad. 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.

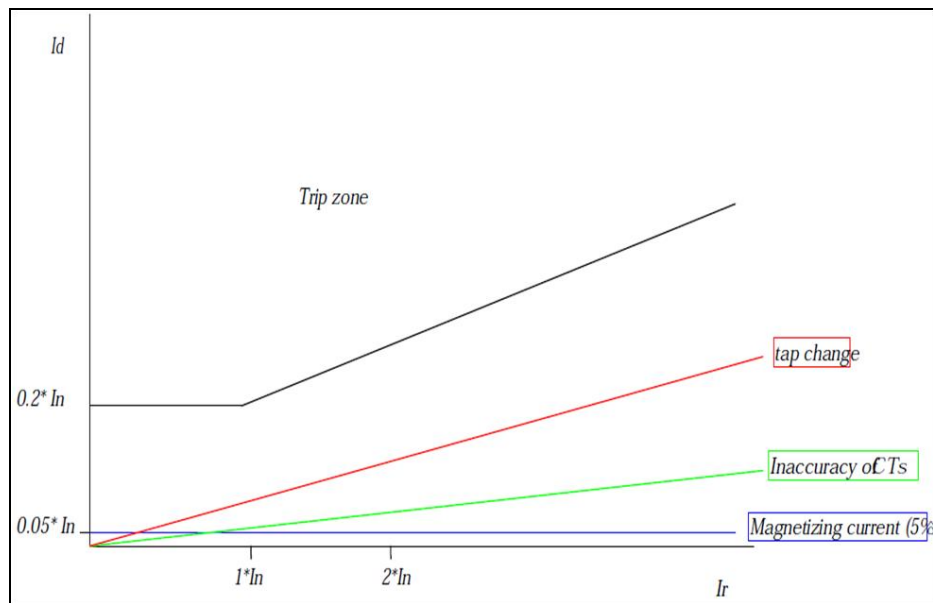


Figura 4. Protección diferencial porcentual. Errores

Corriente de arranque

La corriente de arranque es un fenómeno que se produce cuando el transformador es energizado, aunque también existen otras causas que podrían producir este tipo de corriente, como durante el restablecimiento de la tensión tras un cortocircuito. En esta situación un alto nivel de corriente se presenta en el devanado primario del transformador, mientras que el secundario no se ve afectado.

Este fenómeno puede producir un valor suficientemente alto de corriente diferencial como para disparar la protección. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de corriente de arranque. Estos datos fueron recogidos por el sistema SASensor en una de las subestaciones eléctricas donde opera actualmente.

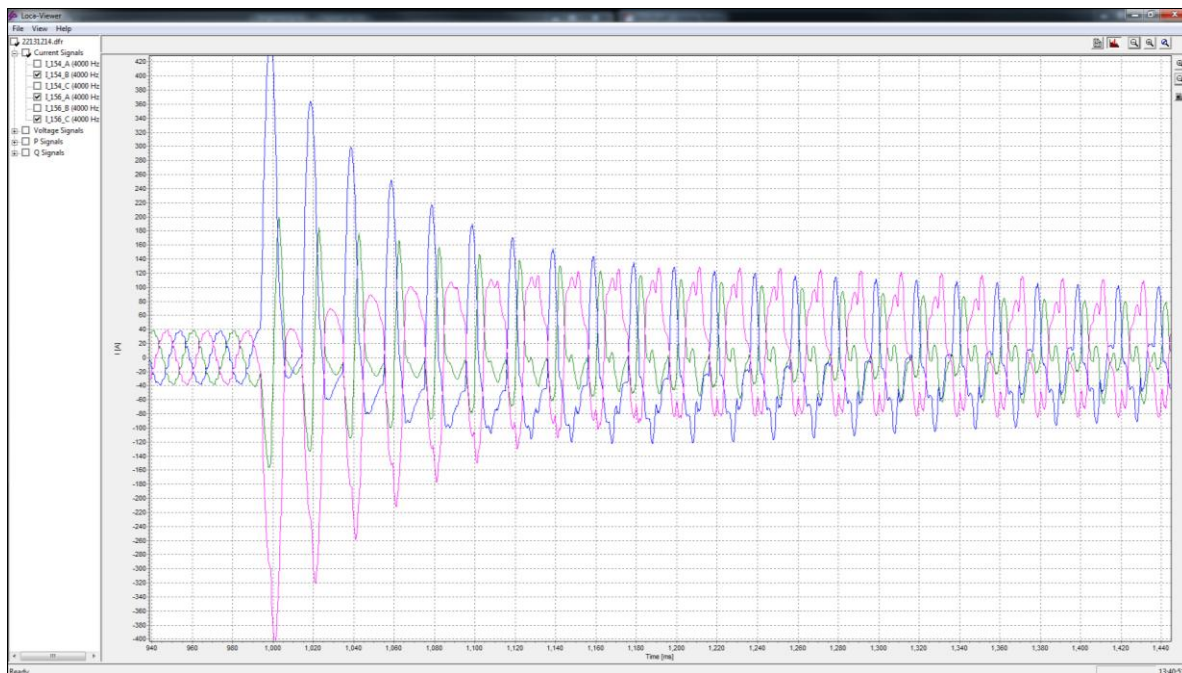


Figura 5. Corriente de arranque

Un punto importante en este trabajo ha sido el estudio del problema con la corriente de arranque.

Actualmente el sistema SASensor incluye una aplicación de protección, protección contra sobrecorriente, la cual ha sido probada en situaciones de corriente de arranque con el resultado de no producir un disparo. Esto es debido principalmente a que la corriente de arranque no dura lo suficiente como para disparar la protección. Sin embargo, la protección diferencial es más sensible y sí podría verse afectada por la corriente de arranque.

Métodos para evitar falsos disparos por corrientes de arranque

La mayoría de métodos utilizados para evitar disparos causados por corrientes de arranque hacen uso de la forma característica de la onda de esta corriente. Un método introducido en los 40 es todavía el más utilizado. Se basa en el hecho de que el contenido armónico, especialmente el segundo armónico, es mayor en una corriente de arranque que en una falla interna.

Una forma de aplicar este método es añadiendo el contenido armónico (segundo armónico, tercero,...) a la curva de disparo, de forma que el contenido armónico reduce la sensibilidad del relé (Ecuación 1).

$$|I_o| > s|I_r| + k_2|I_2| + k_3|I_3| + \dots$$

Ecuación 1

| | |
|-----------------------|--|
| $ I_o $ | Valor absoluto de la componente fundamental (50 Hz) de la corriente diferencial. |
| $ I_r $ | Valor absoluto de la corriente de restricción |
| $ I_2 , I_3 , \dots$ | Valor absoluto del segundo, tercer,.. armónico de la corriente diferencial |
| k_2, k_3 | Constantes de proporcionalidad |
| s | Pendiente de la curva de disparo del relé. |

Otra forma es bloquear el funcionamiento del relé cuando el contenido armónico es mayor que un porcentaje predeterminado de la corriente diferencial.

$$|I_o| > k_2|I_2|$$

Ecuación 2

$$|I_o| > k_5|I_5|$$

Ecuación 3

Ecuación 2 y Ecuación 3 representan las condiciones de bloqueo para el segundo y quinto armónico.

El uso del quinto armónico es usado normalmente para evitar un falso disparo causado no por corrientes de arranque sino por una situación de sobre-voltaje o reducción de la frecuencia. Estas situaciones pueden también producir una diferencia de corriente.

Detección del segundo armónico. Simulaciones en Scilab

El método de detección del segundo armónico ha sido probado mediante simulaciones utilizando el programa Scilab. La corriente de arranque de la Figura 5 es introducida en el programa, la componente fundamental y el segundo armónico son filtrados.

La Figura 6 representa la corriente de arranque en una fase (señal azul), su componente fundamental (50 Hz, color rojo) y el segundo armónico (verde).

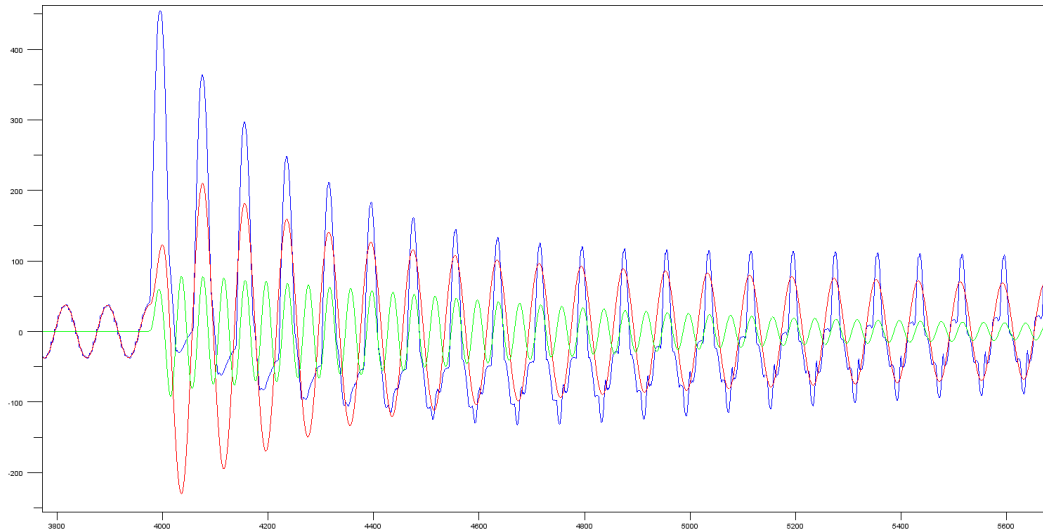


Figura 6. Corriente de arranque. Fundamental y segundo armónico

En la Figura 7 se representan los valores absolutos de la fundamental y segundo armónico.

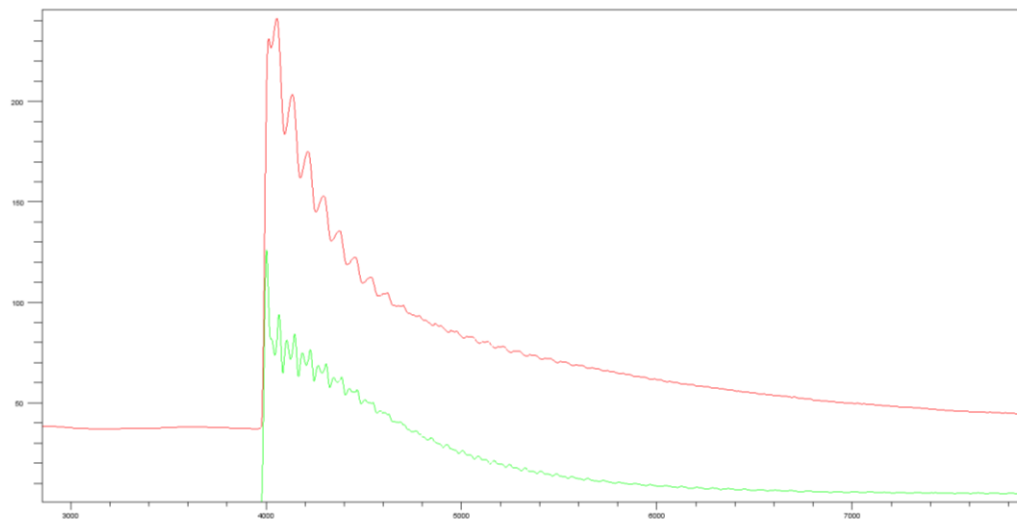


Figura 7. Fundamental y segundo armónico, valores absolutos.

Uno de los métodos comentados anteriormente consiste en el bloqueo del relé cuando el valor absoluto del segundo armónico es mayor que un determinado porcentaje de la componente fundamental. Un valor típico de este razón (I_2/I_1) es 0.15 (15%). En la Figura 8 se muestra esta razón para la corriente de arranque analizada (azul). La línea roja representa el valor establecido para realizar el bloqueo del relé. Puede verse como en este caso el relé se bloquearía durante aproximadamente 500 ms.

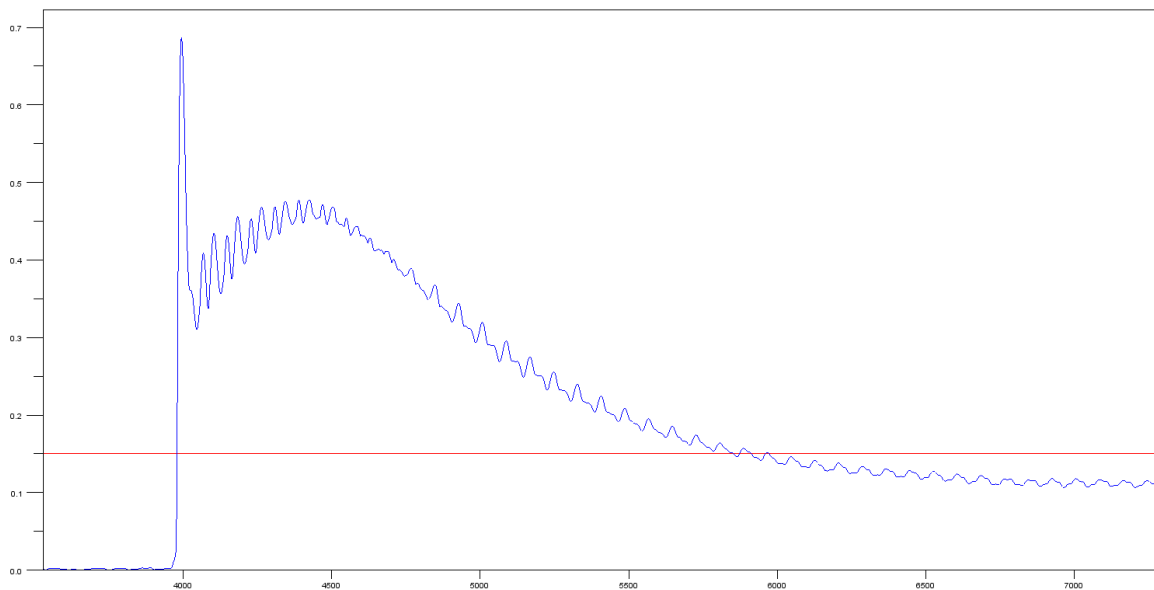


Figura 8. Razón segundo armónico

Productos en el mercado

La protección diferencial mediante la comparación de los fasores de corriente en ambos lados del transformador es el método comúnmente utilizado, lo cual queda reflejado en la gran cantidad de productos existentes que lo utilizan.

El sistema SASensor es un concepto diferente a la mayoría de productos analizados, en el sentido de que dicho sistema engloba diferentes partes de la subestación eléctrica, el software se implementa en una unidad central de control (CCU) donde el algoritmo de protección es ejecutado, y la adquisición de datos y las acciones de disparo se realizan en módulos diferentes. Existe una clara separación entre software y hardware. Por el contrario, en los productos analizados a continuación todo está incluido en un dispositivo, tanto software como hardware se encierran en una “caja”. Normalmente no solo incluyen protección diferencial también funciones complementarias como protección contra sobre-corriente, protección por voltaje o protección por frecuencia.

ABB. Protección de transformadores RET670

La aplicación de protección diferencial del relé RET670, de la empresa ABB, incluye funciones comúnmente utilizadas entre los diferentes fabricantes, como son la detección del segundo y quinto armónico o la compensación por magnitud y fase.



Incluye también otras funciones no tan convencionales, como la compensación automática por el cambio de tomas en el transformador o la detección de corrientes de secuencia negativa como método discriminatorio entre fallas internas y externas.

Figura 9. RET670 (Fuente: ABB)

Siemens. SIPROTEC 7UT6 Relé de protección diferencial para transformadores, generadores, motores y barras

La protección diferencial del relé SIPROTEC 7UT6 realiza funciones como restricción ante corrientes de arranque utilizando el segundo armónico, restricción ante sobre-voltajes y frecuencias reducidas utilizando tercer y quinto armónico, disparo rápido, etc. Una función interesante es la detección de situaciones de saturación de los transformadores de corriente.

En la Figura 10 se representa la curva de disparo de este relé.

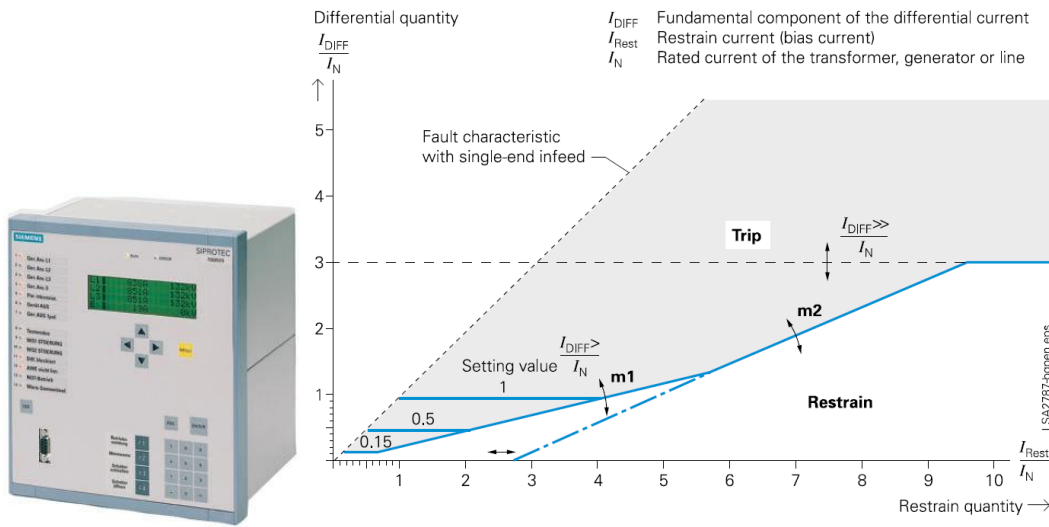


Figura 10. Siemens SIPROTEC 7UT6 Curva de disparo (derecha)

Schneider Electric. MiCOM P64x relé

La protección diferencial del relé MiCOM P64x también incluye detección de segundo y quinto armónico, compensación por magnitud y fase, y disparo rápido.

La curva de disparo se muestra en la Figura 11

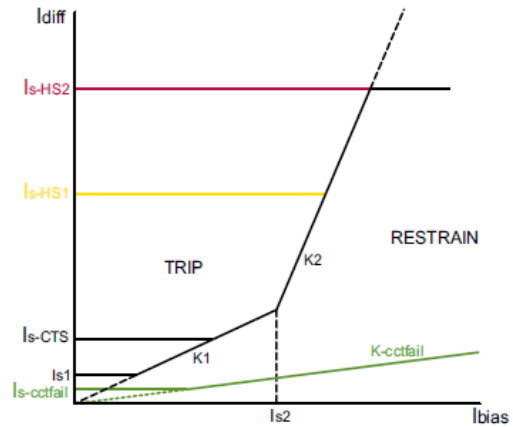


Figura 11. MiCOM P64 (Izquierda). Curva de disparo (derecha)

GE Multilin. T60 Sistema de protección para Transformadores

La protección diferencial del relé T60 realiza también las conocidas funciones de compensación por magnitud y fase, y la detección del segundo armónico para situaciones de corrientes de arranque.

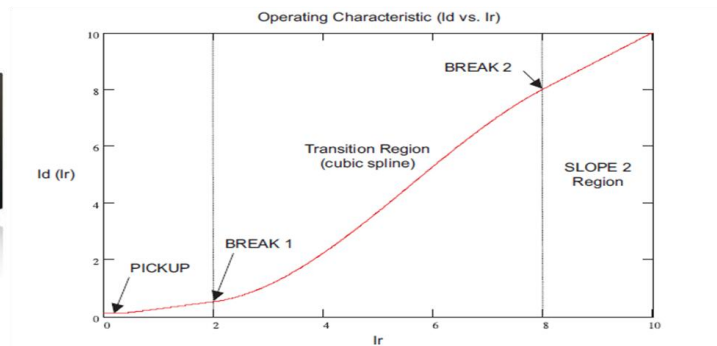


Figura 12. T60 Curva de disparo (derecha)

Una peculiaridad de este relé es la curva de disparo (Figura 12), la cual presenta una zona con pendiente variable.

Protección Diferencial en Transformadores. Propuesta

Tras haber realizado una profunda investigación sobre protección diferencial en transformadores y considerando la funcionalidad y posibilidades del sistema SASensor, se propone a continuación una función de protección diferencial para ser implementada en el sistema. En la Figura 13 se muestra como esta función (PTDF, según IEC61850-5) encajaría en el sistema. Actualmente Locamation B.V. tiene implementado un filtro que extrae la componente fundamental (50 Hz) de la señal mediante la transformada discreta de Fourier. Este filtro devuelve el valor del fasor de corriente con una frecuencia de 1Khz, este valor, expresado en números complejos, es el utilizado en el cálculo de la corriente diferencial.

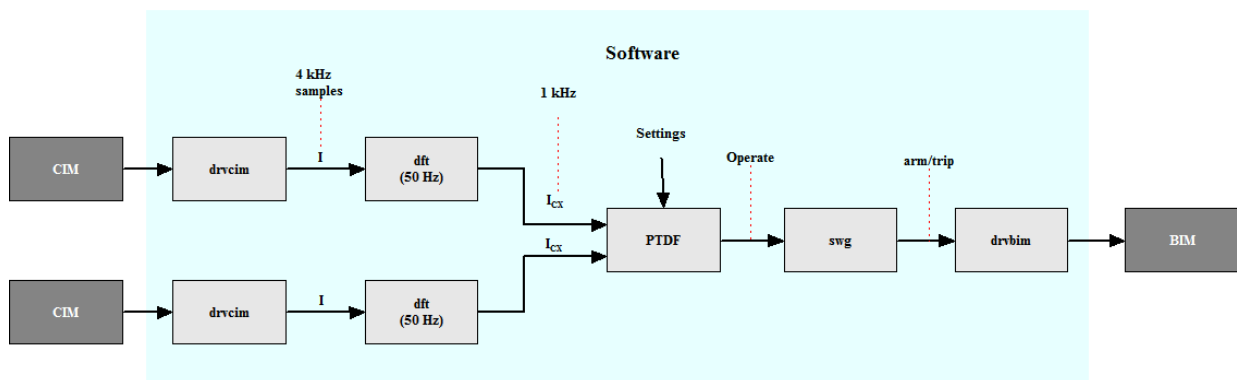


Figura 13. PTDF en el sistema SASensor

Para configurar la protección es necesario introducir algunos parámetros, como la potencia nominal del transformador o el tipo de conexión que presenta. Cuando las condiciones para realizar un disparo se satisfacen una señal de operación es enviada al módulo swg, que es el modelo para todo tipo de interruptores.

La función PTDF se puede dividir en sub-funciones (Figura 14)

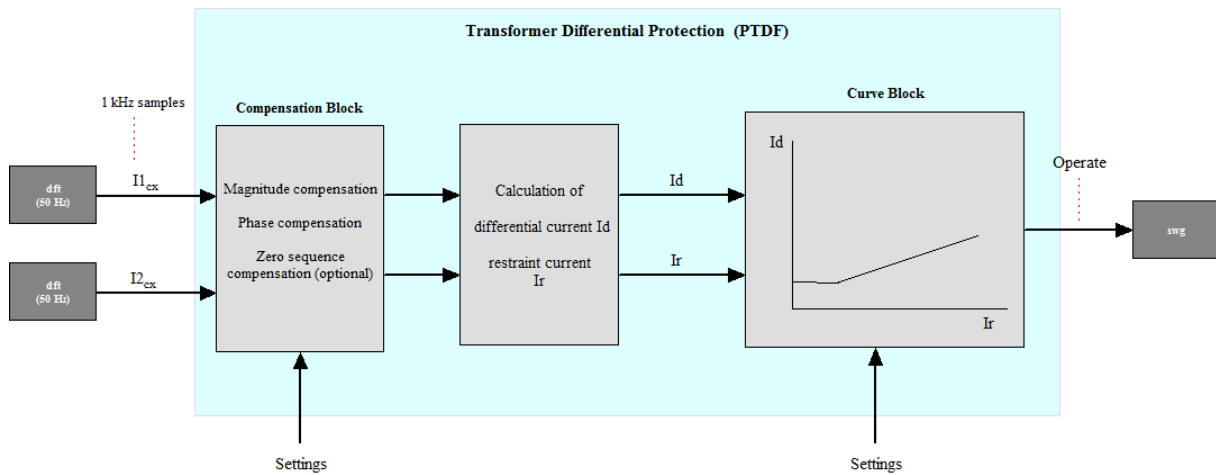


Figura 14. Bloques PTDF

Antes de comparar las corrientes es necesario realizar una compensación en magnitud, debido a la relación del transformador, y una compensación por desplazamiento de fase, dependiendo del transformador a proteger. Estas compensaciones se realizan mediante la Ecuación 4.

$$\begin{pmatrix} IA2' \\ IB2' \\ IC2' \end{pmatrix} = \frac{Un2}{Un1} * A * \begin{pmatrix} IA2 \\ IB2 \\ IC2 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4}$$

| | |
|--|---|
| $\begin{pmatrix} IA2 \\ IB2 \\ IC2 \end{pmatrix}$ | Corrientes en el segundo devanado |
| $\begin{pmatrix} IA2' \\ IB2' \\ IC2' \end{pmatrix}$ | Corrientes compensadas del segundo devanado |
| $\frac{Un2}{Un1}$ | Relación de voltaje |
| A | Matriz de compensación de fase |

Los valores a introducir en la matriz A dependerán del tipo de transformador. Por ejemplo para un transformador del tipo Ynd5 la matriz será:

$$A = \frac{1}{\sqrt{3}} * \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

En el siguiente bloque la corriente diferencial (I_d) y la corriente de restricción (I_r) son calculadas según Ecuación 5 y Ecuación 6.

$$I_d = \frac{|I1-I2|}{I1rated} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$I_r = \frac{1}{2} * \frac{(|I1|+|I2|)}{I1rated} \quad \text{Ecuación 6}$$

Los valores anteriores son introducidos en una curva de disparo donde ambos son comparados. Los parámetros de disparo son especificados en este bloque (Figura 15).

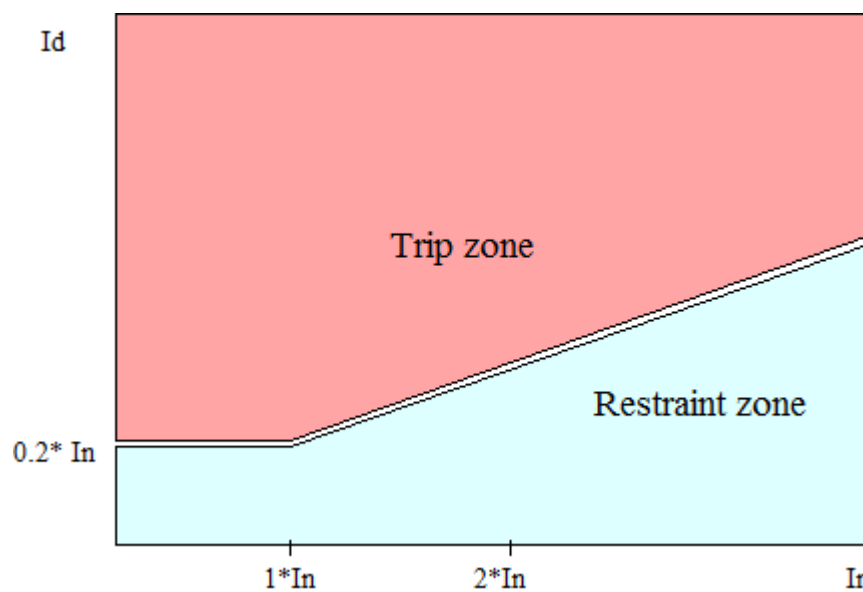


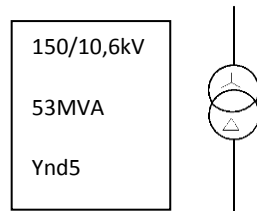
Figura 15. Curva de disparo

Esta es la parte principal de la función de protección diferencial en transformadores. Posibles problemas por corrientes de arranque o sobre-voltaje no están incluidos en esta función.

Simulaciones

Con el fin de probar la función presentada anteriormente, se han realizado varias simulaciones en el programa Scilab.

Se ha utilizado un transformador con las siguientes características:



Este transformador introduce un desplazamiento de fase de 150° , lo que resulta útil para comprobar si la compensación por desplazamiento de fase funciona correctamente. Debido a la relación del transformador, la compensación por magnitud también será comprobada.

En la Figura 16 se muestra la corriente en una de las fases del transformador. La señal azul representa la corriente en el devanado de alto voltaje (150 kV) mientras que la roja representa la corriente en el lado de baja tensión (10 kV). Las señales simuladas no contienen armónicos, solo componente fundamental. Se puede ver como existe una diferencia en magnitud y fase.

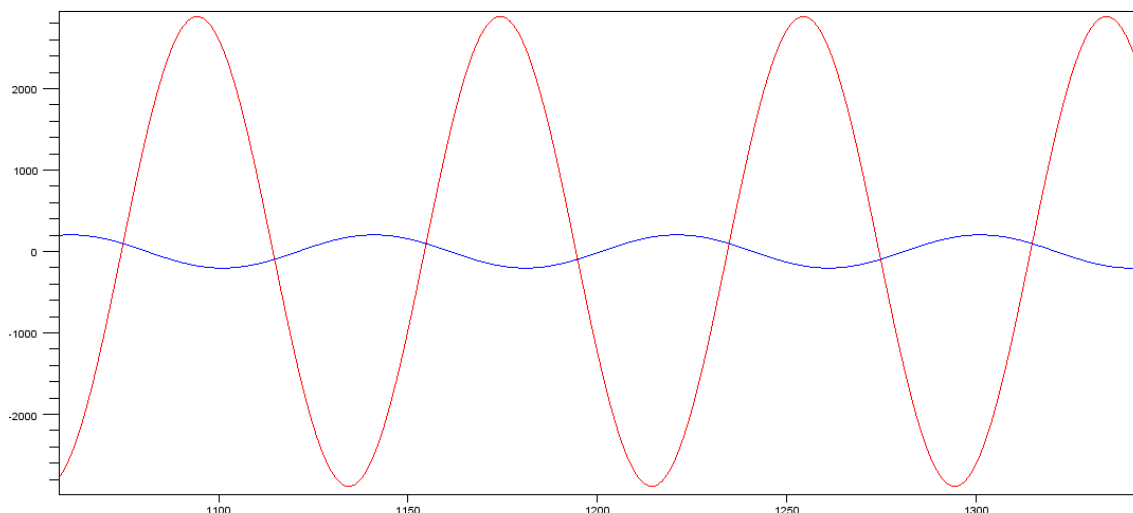


Figura 16. Corriente en el primer devanado (azul) y segundo (rojo)

El resultado tras realizar la compensación por magnitud se presenta en la Figura 17.

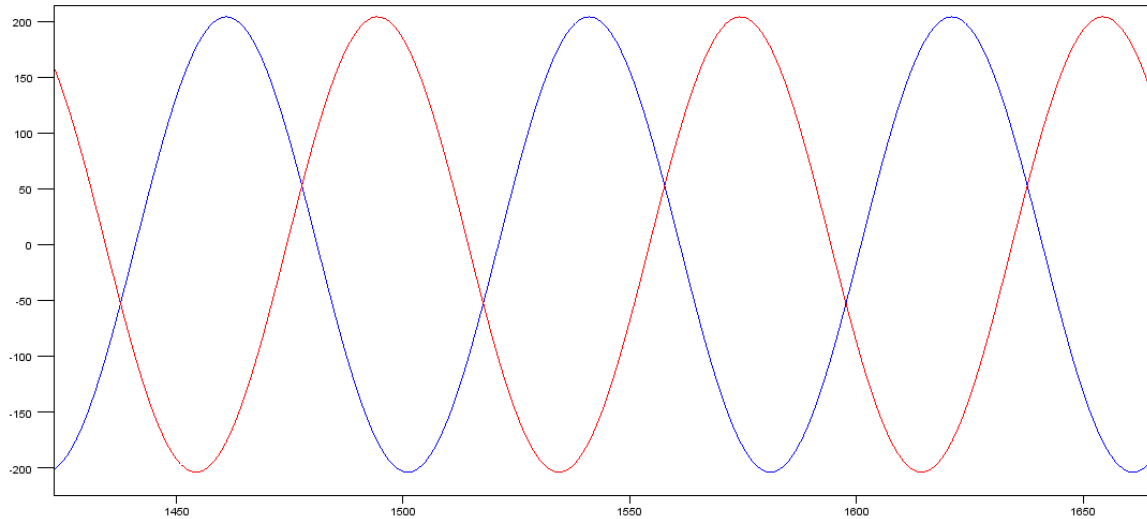


Figura 17. Compensación por magnitud

El resultado de compensar la magnitud y el desfase es representado en la Figura 18.

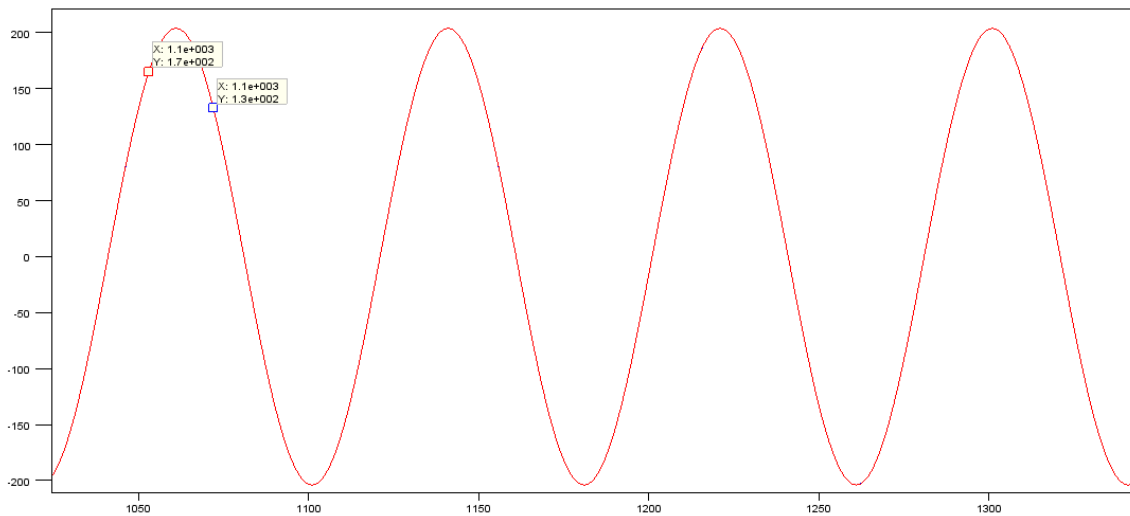


Figura 18. Compensación por magnitud y fase

Una vez realizada la compensación, la corriente diferencial y de restricción pueden ser calculadas. El valor nominal de la corriente en el primer devanado se toma como referencia en el cálculo en por unidad. En este caso 204 amperes.

En la Figura 19 se representa la simulación de una falla interna y la respuesta de la protección diferencial. El gráfico superior muestra la componente fundamental de la corriente en el lado de alta tensión, en el grafico intermedio se representa la corriente compensada del lado de baja tensión. En

el gráfico inferior se muestran la corriente de restricción I_R (verde), corriente diferencial I_D (azul) y la señal de disparo (rojo).

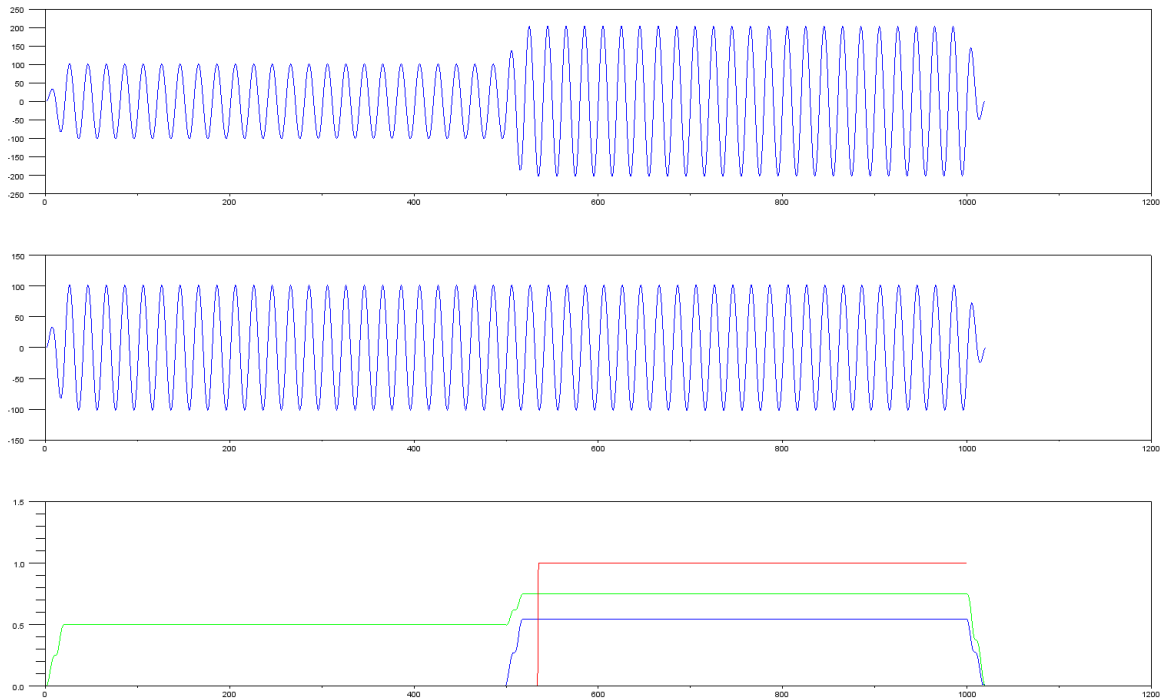


Figura 19. Falla interna, zona 1 de la curva de disparo.

Para el valor de la corriente de restricción del ejemplo, la función trabaja en la zona 1 de la curva de disparo (Figura 15). Al sobrepasar la corriente diferencial el valor establecido para esta zona ($0.2 I_N$) se produce una señal de disparo. Existe un retraso de 30 ms, para evitar falsos disparos debidos a corrientes transitorias.

En la Figura 20 se representa un caso en el que la función se encuentra trabajando en la zona con pendiente. Se puede ver como la corriente a través del transformador, reflejada en I_R , es mayor que en el caso anterior. Esto hace que disminuya la sensibilidad del relé con el fin de no realizar falsos disparos.

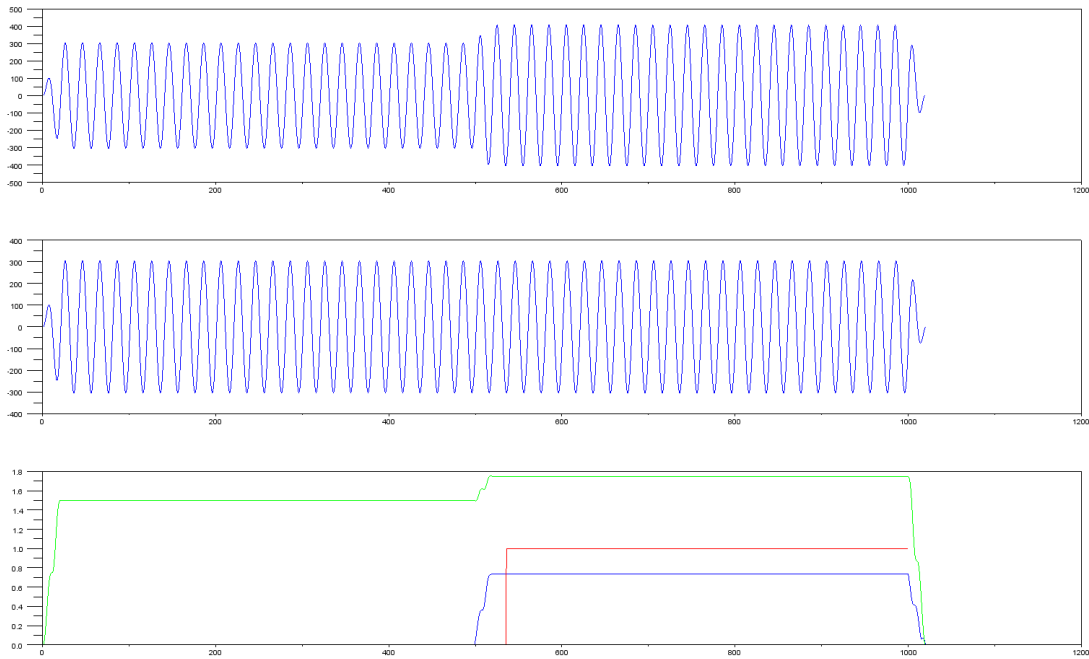


Figura 20. Falla interna segunda zona

Pantalla de configuración en el sistema SASensor

Como parte de la implementación de la función en el sistema SASensor se ha creado una interfaz web que permite introducir los datos necesarios para configurar la protección.

Los datos necesarios para configurar la función de protección diferencial son:

- Información sobre el transformador.
 - Potencia Nominal
 - Voltaje Nominal 1er devanado
 - Voltaje nominal 2do devanado
 - Vector group

| |
|------------|
| 53MVA |
| 150/10,6kV |
| Ynd5 |

- Ajustes para el disparo
 - I_{dmin} , corriente diferencial 1^{er} sector
 - End1, valor de I_R fin de la primera zona
 - Slope1, pendiente del segundo sector

| |
|--------|
| 0.2 In |
| 1.0 In |
| 25% |

En la Figura 21 se muestra la interfaz web realizada, donde se introducen los ajustes necesarios para cada caso particular.

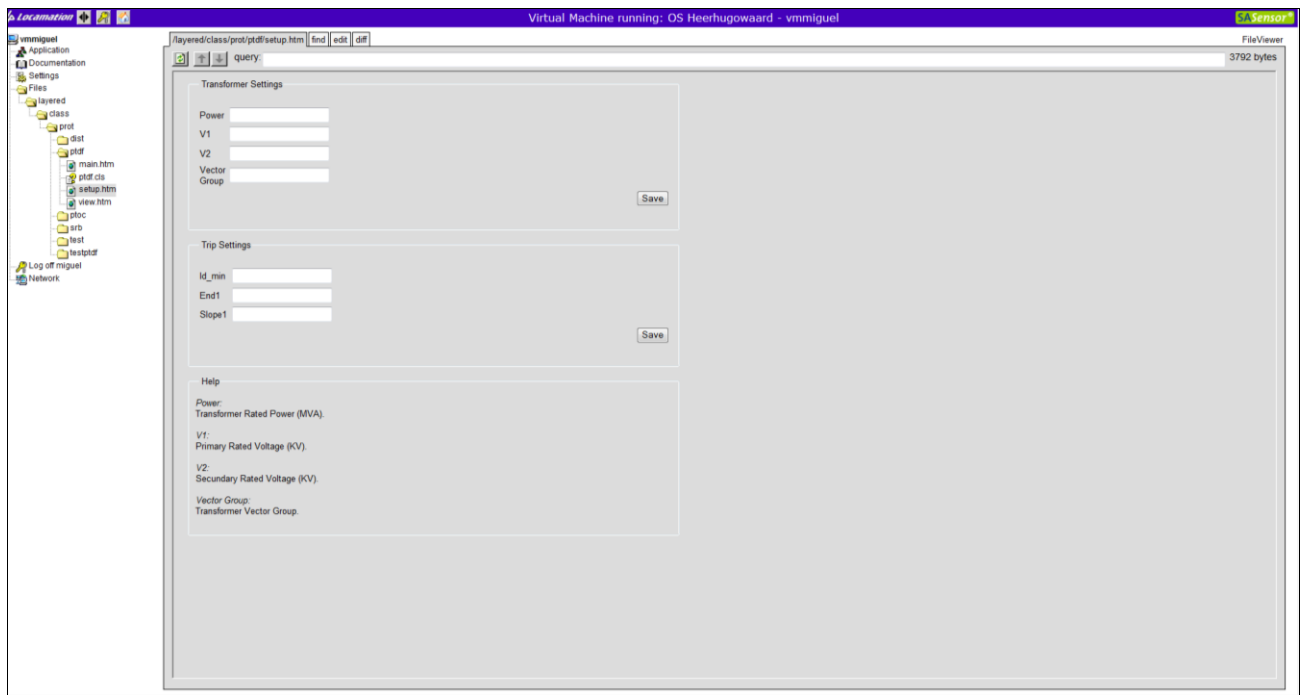


Figura 21. Pantalla para configurar la protección

Protección diferencial por comparación de potencia

La protección diferencial en transformadores normalmente utilizada consiste en la comparación de la corriente en ambos lados del transformador. Sin embargo el uso de otros métodos, como la comparación de la potencia o energía en lugar de la corriente, podría tener algunas ventajas. Cuando se compara la corriente es necesario realizar una compensación en magnitud y fase. Esto no sería necesario en el caso de comparar la potencia. Otra ventaja es que el cambio de tomas en el transformador no supondría ningún error.

Sin embargo no se han encontrado productos en el mercado que utilicen este método, solamente trabajos de investigación. Quizás la razón sea la necesidad de medir el voltaje en ambos lados del transformador. En muchas instalaciones solo es posible medir el voltaje en el secundario del transformador.

En SASensor las aplicaciones de protección presentan ventajas respecto a las utilizadas en los relés convencionales. La arquitectura del sistema introduce mas funcionalidad, toda la información recogida en diferentes puntos de la subestación pueden ser utilizados en el algoritmo de protección, cosa que no es posible en relés "aislados" que solo tienen información de la corriente en ambos lados del transformador. Con esta extra funcionalidad podría ser posible introducir soluciones alternativas con mejores características. Podría merecer la pena investigar soluciones alternativas en el futuro.

Modelo de Transformador

Con el fin de desarrollar soluciones alternativas, es de gran utilidad tener un modelo de transformador donde simular fallas internas y externas, corrientes de arranque, etc..., y probar el algoritmo con este modelo.

Se pueden encontrar multitud de trabajos sobre modelado de transformadores. Hay también diferentes programas donde crear y simular el modelo, como son Matlab/Simulink, Scilab, ATP (Alternative Transient Program), etc... Estos programas son capaces de simular el comportamiento electromagnético de un sistema eléctrico ante cambios transitorios.

Interesante en el modelado de sistemas físicos es el lenguaje Modelica. Este es un lenguaje no propietario, orientado a objetos, basado en ecuaciones para simular sistemas físicos. Algunos programas donde utilizar Modelica están disponibles gratuitamente, como es el caso de OpenModelica. [4] [5]

Conclusiones y recomendaciones para continuar el trabajo

Protección diferencial es el método normalmente utilizado en la protección de transformadores contra fallas internas. Se ha realizado una profunda investigación sobre este tipo de protección, incluyendo productos en el mercado y también consultando trabajos de investigación. Como resultado de esta investigación se ha realizado una propuesta de función diferencial para ser implementada en el sistema SASensor.

La parte principal de esta función ha sido probada utilizando el programa Scilab. Se ha comprobado como la función compensa la diferencia en magnitud y el desfase. La lógica de disparo se basa en la comparación de la corriente diferencial y una corriente de restricción, con el fin de evitar falsos disparos ocasionados por errores durante por ejemplo fallas externas.

Una función interesante para ser incluida en futuros trabajos es la compensación por cambio de tomas en el transformador. Actualmente el sistema SASensor es capaz de monitorizar y regular cambios de toma en transformadores, la posición de la toma podría ser introducida en la función de protección con el fin de evitar el error producido, aumentando de esta forma la sensibilidad de la protección.

El problema con las corrientes de arranque ha sido analizado. Introducir una función para detectar situaciones de corriente de arranque es necesario. El análisis del segundo armónico es la solución normalmente utilizada entre fabricantes, y parece ser de las más fiables. Para su implementación sería necesario introducir un filtro de 100 Hz en el sistema.

Si existe la posibilidad de que el transformador sufra situaciones de sobre-voltaje o frecuencia reducida, sería necesario introducir un método que detecte estas situaciones. El análisis del quinto armónico es el método normalmente utilizado. En este caso un filtro a 250 Hz sería necesario.

La protección diferencial mediante la comparación de los fasores de corriente es el método de protección usado normalmente. Sin embargo, investigar otros métodos alternativos, como la comparación de potencia, que pudieran mejorar las prestaciones del relé, es una posible línea de trabajo para el futuro.

Un modelo dinámico de transformador, con la posibilidad de simular fallas internas, sería necesario para entender de manera más precisa el comportamiento del transformador durante situaciones de falla. Esto ayudaría a desarrollar soluciones alternativas e innovadoras que destaquen sobre las funciones convencionales de protección.

Bibliografía

- [1] E. Commission, "Smart Grids: from innovation to deployment," 2011.
- [2] "<http://www.smartgridsprojects.eu/>," [Online].
- [3] IEEE, *Guide for Protecting Power Transformers*, 2008.
- [4] "openmodelica.org," [Online].
- [5] "modelica.org," [Online].
- [6] Locamation, *Time overcurrent protection manual, version 5.6*, 2010.
- [7] Locamation, *Measurement manual, version 5.6*, 2010.
- [8] Locamation, *SASensor architecture manual, version 5.7*, 2011.
- [9] Locamation, *SASensor architecture manual, version 5.7*, 2011.
- [10] Locamation, *CCU600 series manual, version 5.6*, 2010.
- [11] Locamation, *VCU100 series manual, version 5.6*, 2011.
- [12] Locamation, *VIM620 series manual, version 5.7*, 2011.
- [13] Locamation, *CIM630 series manual, version 5.7*, 2011.
- [14] Locamation, *BIM640 series manual, version 5.7*, 2011.
- [15] ABB, *Transformer protection RET670. Technical reference manual*, 2011.
- [16] Siemens, *SIPROTEC Differential Protection 7UT6x. Manual*, 2009.
- [17] S. Electric, *MiCOM P64x Transformer Protection Relay. Technical Manual*, 2011.
- [18] GE, *T60 Transformer Protection System. Intruccion Manual*, 2011.
- [19] IEC, *IEC 61850*, 2001.