

NUEVO ALGORITMO PARA PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR QUE DETECTA FALLAS ENTRE ESPIRAS Y FALLAS EN LA ZONA DE COBERTURA DE LA PROTECCION DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

Rafael Alberto Cordova Cruz, Comisión Federal de Electricidad (CFE),
Gerencia Regional de Transmisión Noroeste

Resumen: la detección de fallas entre espiras de los equipos de transformación, son difíciles de detectar por las protecciones diferenciales ordinarias, ya que solo trabajan con la secuencia positiva. Al integrar la secuencia negativa en una protección diferencial, se pueden detectar fallas entre espiras de una forma segura. Este reporte, introduce un nuevo algoritmo para operar las protecciones diferenciales, garantizando la detección de fallas entre espiras y fallas en la zona de protección diferencial.

El día 28 de Agosto de 2008 a las 13:39 horas, se presenta falla en el devanado primario de la fase de la Subestación Hermosillo Cinco (HLI) ubicada en la Ciudad Hermosillo Sonora, operando la protección diferencial y disparando los interruptores HLI-92020 y HLI-72020. Personal de Protecciones y Subestaciones acuden a la subestación con la finalidad de atender la falla.

Al analizar el registro de la protección diferencial, la falla no esta claramente definida, ya que el cambio angular entre los fasores del lado de alta y de baja del autotransformador, solo cambian unos grados del comportamiento normal, como los muestra la Figura 1. De esta forma, se espera que personal de Subestaciones dictamine si hay falla en el equipo con las pruebas a realizarse.

Las muestra de aceite tomadas de la parte de arriba del tanque así como de la parte de abajo, no fueron concluyentes para determinar que la fase presentaba problema, ya que al momento del disparo del autotransformador, éste contaba con 20 MW, no alcanzando a uniformarse el aceite en todo el interior del tanque por la baja carga, y la temperatura externa no se encontraba muy elevada.

De esta forma, con las pruebas realizadas por personal de Subestaciones y del Ing. Químico, no se podía determinar concluyentemente si la fase presentaba problema alguno, y la pregunta seguía en el aire.....

¿Esta el equipo en condiciones de energizarse?

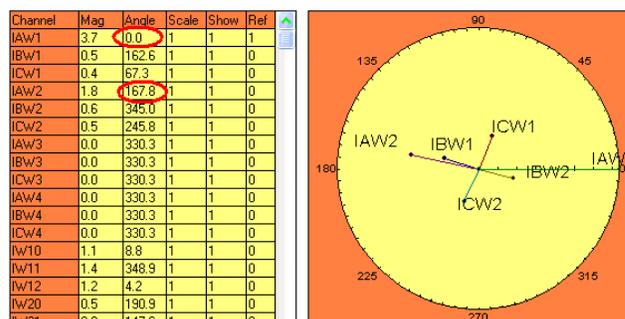


Figura 1 Gráfica de las corrientes de falla

¿Como validar que realmente se encuentra presente una falla en la zona de la diferencial ante graficas de corrientes no muy convincentes?

Un análisis con la secuencia negativa es una buena herramienta para determinar sin lugar a dudas de que realmente hay algún

RVP-AI/2009 - PRO-02 PONENCIA RECOMENDADA
POR EL **COMITÉ DE PROTECCIONES** DEL
CAPÍTULO DE POTENCIA DEL IEEE SECCIÓN MÉXICO
Y PRESENTADA EN LA **REUNIÓN DE VERANO, RVP-AI/2009,**
ACAPULCO GRO., DEL 5 AL 11 DE JULIO DEL 2009.

problema en la zona de la protección diferencial.

La corriente de secuencia negativa solo se presenta en condiciones de falla o de valores muy pequeños en condiciones normales, y se pueden analizar fallas de transformadores estrella-delta en sus diferentes configuraciones, ya que por ejemplo, si se presenta una falla en el lado de baja de un transformador de distribución que tiene el devanado de alta tensión en conexión en delta y el devanado de baja tensión en estrella, la corriente de secuencia negativa en por unidad es la misma tanto para el lado de alta como para el lado de baja, no ocurriendo así con la corriente de secuencia cero, pues solo se presenta del lado de baja.

Para realizar el análisis del autotransformador de la S.E. HLI con corrientes de secuencia negativa, es necesario crear un modelo de la protección, con la finalidad de que con el registro de la protección diferencial y/o de un registrador de disturbios en formato comtrade, se pueda determinar si realmente existe una falla en la zona de la diferencial.

Se realiza el modelo de la protección en el programa Mathcad, validándose con el software propietario de la compañía del relevador diferencial.

El análisis de la validación del modelo aquí mostrado, se enfocará en las magnitudes y ángulos de las corrientes de secuencia negativa antes y después de la falla, aunque se validaron todas las magnitudes de los fasores.

La validación inicial del modelo realizado es que la obtención del registro de la protección diferencial es coincidente con el del modelo como muestran las Figuras 2 y 3.

La frecuencia de muestreo obtenido del registro del relevador corresponde a 240 Hz, o sea, 4 muestras por ciclo.

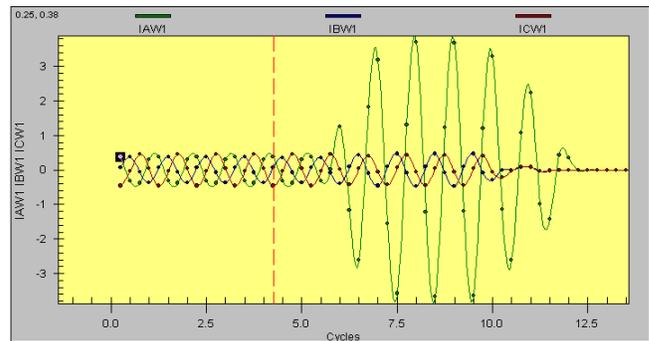


Figura 2 Gráfica de las corrientes del lado de alta

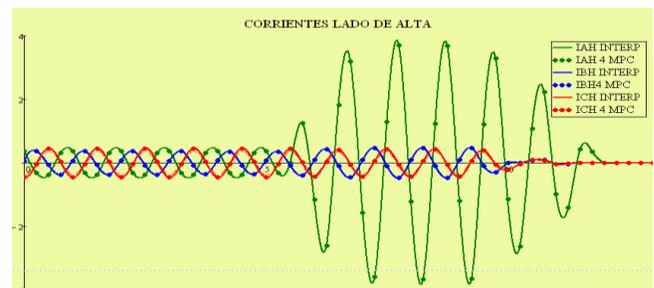


Figura 3 Gráfica de las corrientes del lado de alta del modelo

Las Figuras 2 y 3 son totalmente coincidentes en sus puntos. En la Figura 3, las graficas con puntos corresponden a las señales del relevador de la protección diferencial con 4 muestras por ciclo, y las graficas continuas, corresponden a la graficas obtenidas con interpolación de los 4 puntos por ciclo en el programa Mathcad. Las corrientes del lado de baja también son coincidentes.

El ángulo de las corrientes de secuencia negativa antes de la falla y en la falla se muestra en la Figura 4.

Channel	Mag	Angle	Scale	Show	Ref	Channel	Mag	Angle	Scale	Show	Ref
IAW1	0.5	0.0	1	1	1	IAW1	3.9	0.0	1	1	1
IBW1	0.4	239.9	1	1	0	IBW1	0.5	172.6	1	1	0
ICW1	0.5	135.8	1	1	0	ICW1	0.4	79.5	1	1	0
IAW2	0.6	178.8	1	1	0	IAW2	1.9	169.1	1	1	0
IBW2	0.5	59.8	1	1	0	IBW2	0.6	352.5	1	1	0
ICW2	0.6	316.0	1	1	0	ICW2	0.6	258.9	1	1	0
IAW3	0.0	230.7	1	1	0	IAW3	0.0	251.7	1	1	0
IBW3	0.0	230.7	1	1	0	IBW3	0.0	251.7	1	1	0
ICW3	0.0	230.7	1	1	0	ICW3	0.0	251.7	1	1	0
IAW4	0.0	230.7	1	1	0	IAW4	0.0	251.7	1	1	0
IBW4	0.0	230.7	1	1	0	IBW4	0.0	251.7	1	1	0
ICW4	0.0	230.7	1	1	0	ICW4	0.0	251.7	1	1	0
Iw10	0.0	184.4	1	1	0	Iw10	1.2	8.1	1	1	0
Iw11	0.4	5.5	1	1	0	Iw11	1.5	350.6	1	1	0
Iw12	0.1	327.1	1	1	0	Iw12	1.3	3.5	1	1	0
Iw20	0.0	39.8	1	1	0	Iw20	0.5	191.0	1	1	0
Iw21	0.6	185.0	1	1	0	Iw21	1.0	152.7	1	1	0
Iw22	0.1	147.7	1	1	0	Iw22	0.6	178.7	1	1	0
Iw30	0.0	230.7	1	1	0	Iw30	0.0	251.7	1	1	0

Figura 4 Valores de los ángulos de IW12 e IW22 a) antes de la falla, b) en el ciclo 8.25

Las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran los ángulos de las corrientes de secuencia negativa del lado del alta y de baja del modelo en Mathcad.

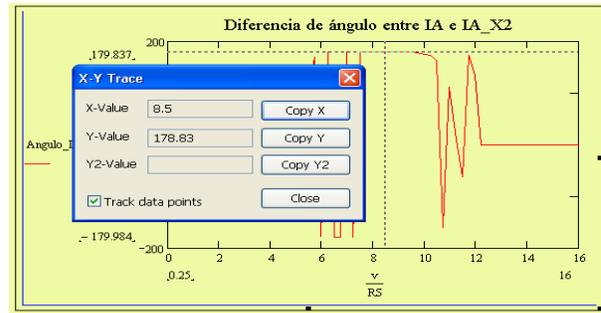


Figura 8 Ángulo de la corriente de secuencia negativa lado de baja respecto de IAH

Con las graficas anteriores, se valida el modelo realizado.

¿Cual es el modelo del algoritmo a utilizar para discriminar la falla entre espiras y en la zona diferencial?

Debido a que el movimiento de los fasores en la falla no es muy convincente para el Ingeniero de Protecciones, el modelo desarrollado contempla la relación de las corrientes de secuencia negativa y positiva de acuerdo a las Ec. 1 y Ec. 2.

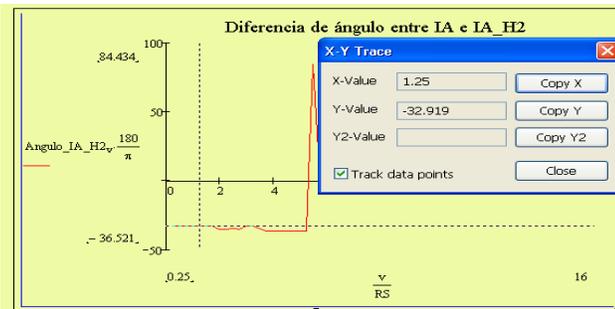


Figura 5 Ángulo de la corriente de secuencia negativa lado de alta respecto de IAH

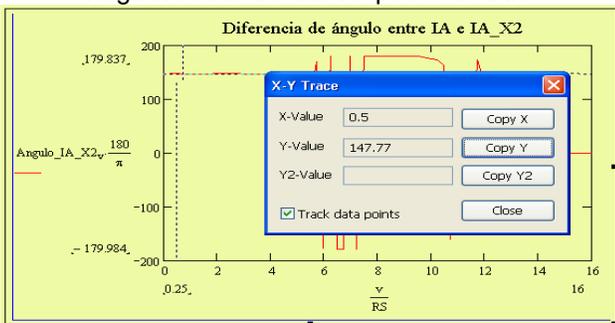


Figura 6 Ángulo de la corriente de secuencia negativa lado de baja respecto de IAH

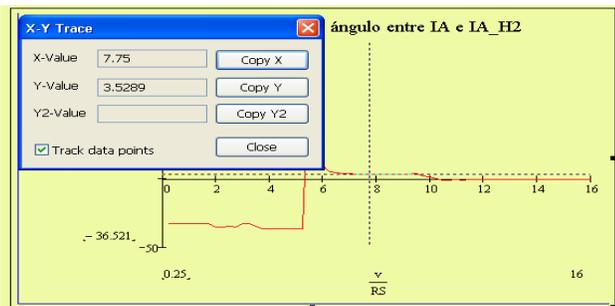


Figura 7 Ángulo de la corriente de secuencia negativa lado de alta respecto de IAH

$$I_{22} = \frac{IA_H2}{IA_X2} \quad \text{Ec. 1}$$

$$I_{11} = \frac{IA_H1}{IA_X1} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde :

I_{22} es el fasor resultante de la relación de 2 fasores de secuencia negativa
 IA_H2 es el fasor de la corriente de secuencia negativa lado de alta
 IA_X2 es el fasor de la corriente de secuencia negativa lado de baja
 I_{11} es el fasor resultante de la relación de 2 fasores de secuencia positiva
 IA_H1 es el fasor de la corriente de secuencia negativa lado de alta
 IA_X1 es el fasor de la corriente de secuencia negativa lado de baja

Cuando se simula una falla externa a la zona diferencial, el fasor de secuencia negativa del lado de alta y del lado de baja son iguales y opuestos, así la relación de las corrientes de secuencia negativa es 1 para fallas externas y un valor diferente a 1 para fallas internas. El fasor de secuencia positiva, es 1 hasta que se presenta la falla, ya que en el funcionamiento normal del autotransformador solo hay secuencia positiva

De acuerdo a lo anterior, la Figura 9 muestra al fasor I_{22} durante el registro de la protección diferencial.



Figura 9 Magnitud del fasor I_{22} para la falla entre espiras

En la Figura 9 se observa que la relación se mantiene en un valor cercano a 1 hasta antes de la falla, cambiando rápidamente a un valor mayor a 1 en cuanto las magnitudes de los fasores de secuencia negativa se descompensan por ser una falla interna.

Antes de realizar la relación de las corrientes de secuencia negativa, es importante realizar la igualdad de corrientes a cualquiera de los lados del autotransformador, con la finalidad de realizar también, la diferencial con secuencia negativa.

Para el autotransformador de la falla de acuerdo a sus ajustes, se tiene una relación de los transformadores de corriente de 400/5 en el lado de alta y de 600/5 en el lado de baja. Como la relación en el modelo de Mathcad se realizó en el lado de alta, es necesario multiplicar la

corriente del lado de baja por un factor de 0.75 para realizar la igualdad de corrientes.

La relación de corrientes de secuencia positiva lado de alta respecto al lado de baja también mantiene la relación de 1 hasta antes de la falla, pues solo hay secuencia positiva. La Figura 10 muestra las relaciones de los fasores de secuencia positiva y negativa.

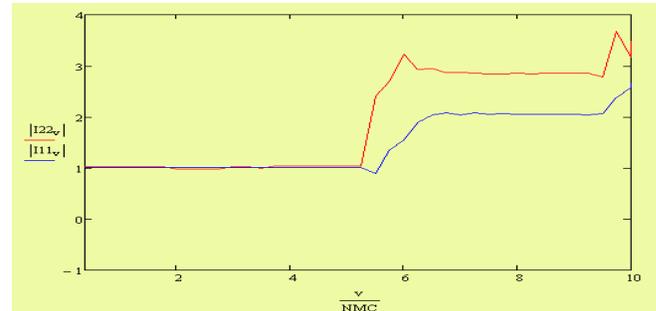


Figura 10 Relación de corrientes de secuencia positiva y negativa para la falla en espiras

Una ecuación de disparo de la diferencial de secuencia negativa se puede obtener considerando lo siguiente:

- Nivel de corriente diferencial de secuencia negativa adecuado
- Relación de corriente de secuencia positiva lado de alta/lado de baja
- Nivel de corriente de secuencia negativa lado de alta
- Nivel de corriente de secuencia negativa lado de baja

Con lo anterior, el disparo del modelo del relevador se observa en la Figura 11.

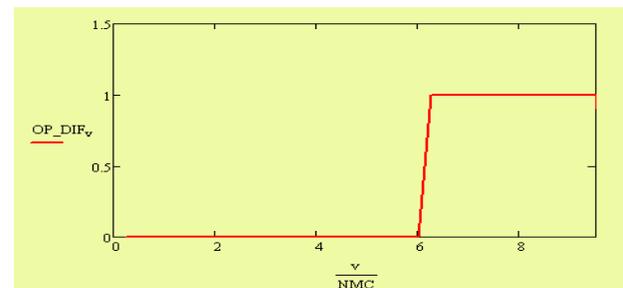


Figura 11 Operación del modelo de la diferencial con secuencia negativa para la falla real

En la Figura 9 la detección de la falla se da en ciclo 5.25, por lo que solo hay que esperar a que se den las otras condiciones del disparo, el cual sucede en el ciclo 6, garantizando un disparo rápido para la falla en espiras de un autotransformador.

En cierta manera se observa una pequeña diferencia en magnitud en los fasores de las corrientes del lado de alta I_{AW1} e I_{AW2} de acuerdo a la Figura 1, pero es mas evidente esta diferencia con las magnitudes de secuencia negativa, tal y como lo muestra la Figura 12, la cual también es el comportamiento de la característica diferencial de secuencia negativa.

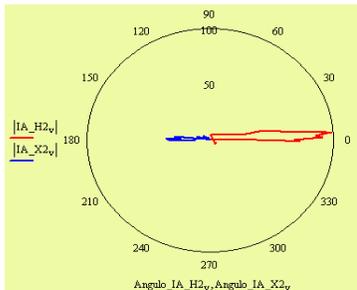


Figura 12 Fasores de corriente de secuencia negativa

Se realizó un modelo en el programa ATPDraw para validar la efectividad del modelo del relevador diferencial, para falla en la zona de protección así como fallas externas.

En el modelo se simulan fallas externas francas fuera y dentro de la zona diferencial en la fase A de acuerdo a la siguiente secuencia:

- Falla inicial en el lado de baja fuera de la zona diferencial
- 20 ms después, se simula falla en la zona diferencial lado de baja
- 20 ms después, se simula falla fuera de la zona diferencial lado de alta

- 20 ms después, se simula falla dentro de la zona diferencial lado de alta

Una vez realizada la simulación, las señales obtenidas del programa ATPDraw son reprocesadas con el programa ATPanalyzer para cambiar la frecuencia de muestreo a 960 Hz, y después son procesadas en el modelo de Mathcad, utilizando además el filtro coseno de ciclo completo para eliminar frecuencias que no son de interés [1,2,3].

La Figura 13 muestra las corrientes de falla de la fase A.

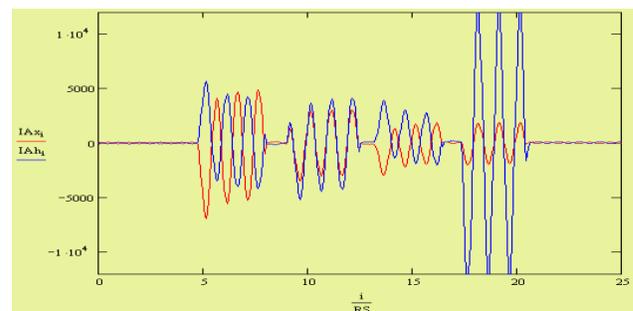


Figura 13 Corrientes de las fases A de la simulación

La Figura 14 muestra el valor del fasor I_{22} , verificándose que cuando la falla se simula externa se tiene un valor de 1 y un valor diferente cuando esta se simula dentro de la zona diferencial.

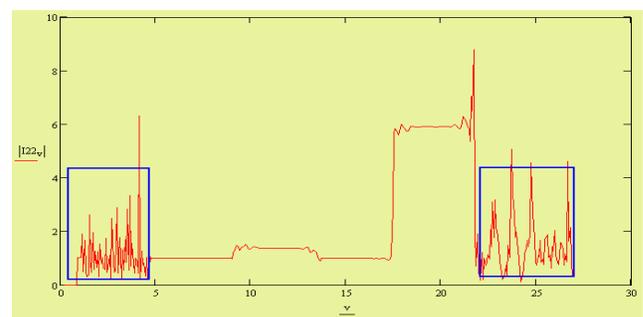


Figura 14 Magnitud del fasor I_{22} para las simulaciones

En la Figura 14 en la zona del recuadro de la izquierda se muestra una inestabilidad natural debido a que el sistema se

encuentra balanceado siendo la magnitud de corriente de secuencia negativa muy pequeña, al igual que el de la derecha, ya que nunca se simula la apertura de los interruptores de alta y de baja.

A diferencia de la falla real entre espiras que se presentó en el autotransformador, cuando la falla es franca en la zona de la diferencial, los ángulos de la corriente I_{AW1} y I_{AW2} se encuentran en ángulos cercanos a 0 grados y a 180 grados cuando la falla se encuentra fuera de la zona diferencial, como lo muestra la Figura 15.

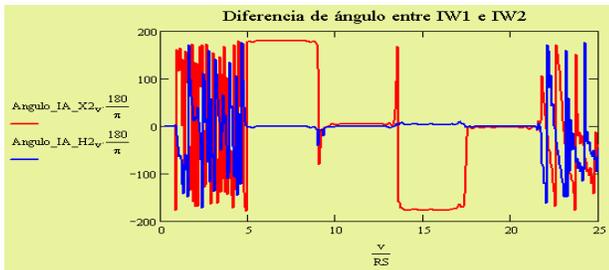


Figura 15 Ángulo de las corrientes I_{AW1} y I_{AW2}

El ángulo resultante de la diferencia de los fasores de secuencia negativa de alta y de baja muestra un comportamiento similar de acuerdo a la Figura 16.

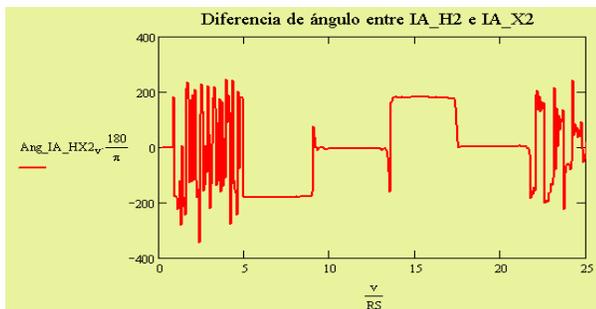


Figura 16 Ángulo resultante de la diferencia

La diferencial de secuencia negativa en amperes primarios se muestra en la Figura 17.

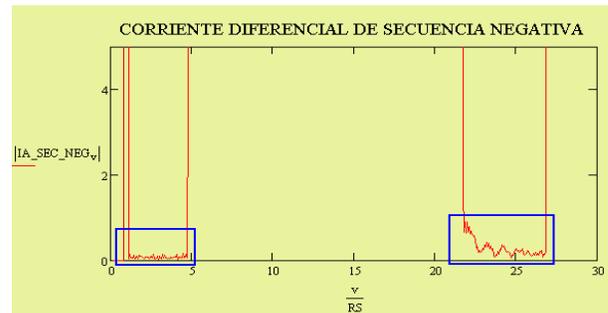


Figura 17 Medición del elemento diferencial de secuencia negativa en amperes primarios

En la Figura 17, los recuadros corresponden a la simulación de las fallas en zona externa a la diferencial.

Simulando una falla externa a la zona de la diferencial, la magnitud de los fasores de secuencia negativa son iguales y opuestos, por lo que la diferencial de secuencia negativa no mide diferencia alguna, como lo muestra la Figura 18.

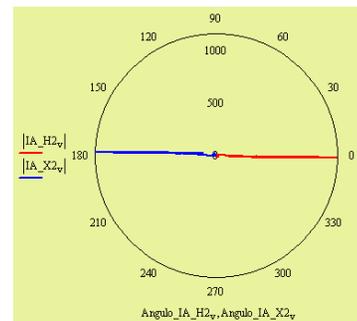


Figura 18 Fasores del elemento diferencial para falla externa

La Figura 19 muestra al fasor I_{22} para la falla externa con un valor de 1

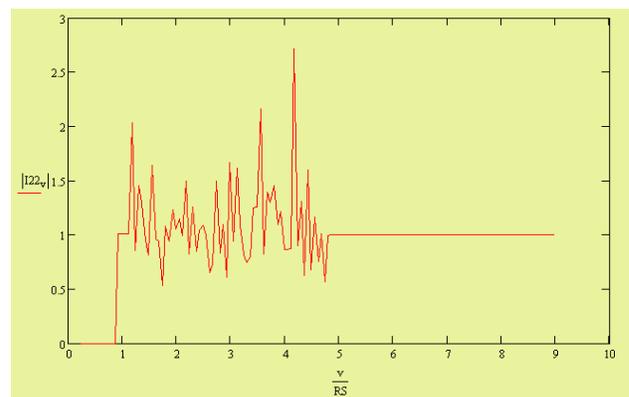


Figura 19 Fasor I_{22} para la falla externa

Un especial agradecimiento al Ing. Pedro Alonso Verdugo Ibarra de Comisión Federal de Electricidad, por su contribución en este documento por su valiosa ayuda en el modelo proporcionado en el programa ATPDraw, así como también, al Ing. Gerardo R. Trevino de American Electric Power por la traducción de este documento al idioma Ingles.

CONCLUSIONES:

- El algoritmo propuesto detecta fallas en forma segura entre espiras en los equipos de transformación y también, fallas en la zona de cobertura de la protección diferencial de transformador.
- La secuencia negativa es una excelente herramienta para analizar fallas, ya que solo se encuentra presente cuando hay alguna anomalía en el sistema de potencia.
- El Ingeniero de Protecciones al utilizar los fasores de secuencia negativa en el análisis de fallas de equipos de transformación, no tendrá duda cuando las fallas son entre espiras, en la zona de la diferencial o externas en los equipos de transformación, tomando una decisión más rápida de cambiar la fase fallada por la de reserva, normalizando el equipo en menor tiempo.

El Anexo 1 muestra las fotografías cuando se realizó la inspección del equipo fallado.

Este algoritmo se realizó un día después del evento.

Referencias:

[1] E. O. Schweitzer III and J. Roberts, "Distance Relay Element Design" Proceedings of the 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1992.

[2] Liancheng Wang, "High Speed Microprocessor Distance Relaying for Transmission Lines", ABB Power T&D Company, Inc.

[3] Rafael A. Córdova Cruz, "Simulación de una Protección de Distancia Multifunción que incluye una Protección Direccional de Sobrecorriente, Protección de Falla de Interruptor y Protección de Potencia Utilizando el Programa Simulink", Tesis de Maestría.

Biografía



Rafael Cordova terminó sus estudios de Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Hermosillo en 1990 y en 2008 terminó sus estudios de Maestría con Honores por el Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Trabaja en CFE desde 1990 y se interesa en el estudio y comportamiento de los relevadores así como de los Sistemas de Potencia.

Anexo 1

Al inspeccionar el autotransformador, la falla se localizó en la colilla que va hacia la boquilla de alta tensión.



Llegada al devanado de alta tensión



Apariencia del devanado después de quitar la cubierta de cartón



Residuos de carbonización en el resto del devanado



Otra vista del devanado dañado



Vista de la fractura de la espira tipo solera



Otra vista del daño encontrado



Restos de papel carbonizado en la parte inferior del devanado