

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



CÁLCULOS E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL AJUSTE DEL RELÉ DIFERENCIAL

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

JACQUELINE PANEZ IZAGUIRRE

**PROMOCIÓN
2009- I**

**LIMA – PERÚ
2013**

**CÁLCULOS E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO
PARA EL AJUSTE DEL RELÉ DIFERENCIAL**

Quiero dedicar el esfuerzo para la realización de este informe a mis padres Marino Panez y Elsa Izaguirre, por todo el apoyo incondicional que me brindaron durante toda mi vida.

SUMARIO

En el presente informe de suficiencia trata de los pasos a seguir para el cálculo de ajuste del relé diferencial 7UT613 de la marca SIEMENS, el cual es empleado como protección principal para transformadores de potencia porque es una protección del tipo unitario y no coordinable y despejara de manera instantánea las fallas internas que se produzcan en el transformador de potencia.

Mediante el lenguaje de programación DPL (DIgSILENT Programming Language), que tiene incluido el software DIgSILENT PowerFactory, se implemento el algoritmo del relé 7UT613, que ayudara a visualizar los cálculos que realiza para diferentes estados del sistema, tales como energización, fallas externas con y sin saturación de los transformadores de corriente, fallas internas a la zona de protección del relé diferencial, afectan en su operación. También se realizo pruebas al relé con la maleta de Omicron CMC-256 y con archivos comtrade para los mismos estados del sistema que se simularon con el programa DPL.

INDICE

PROLOGO.....	1
CAPITULO I	2
PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Tipos de fallas en el transformador	2
1.2.1 Fallas externas	2
1.2.2 Fallas internas.....	3
1.3 Protecciones típicas del transformador.....	4
CAPITULO II.....	5
PROTECCIÓN DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA CON RELÉ SIEMENS 7UT613.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Soluciones del relé numérico 7UT613 para evitar las operaciones incorrectas	5
2.2.1 Magnitud de las corrientes en lado de alta, media y baja del transformador	6
2.2.2 Conexión estrella–delta del transformador provoca una corriente diferencial.....	9
2.2.3 Desigualdad de las corrientes secundarias de los transformadores de corriente.....	10
2.2.4 Cambios de TAP automático del transformador de potencia.....	12
2.2.5 Corriente diferencial ante fallas externas a tierra.....	14
2.3 Características de operación del relé diferencial Siemens 7UT613	16
2.3.1 Bloqueo por 2da armónica	17
2.3.2 Protección de falla a tierra restringida.....	20
CAPITULO III	21
CÁLCULOS PARA EL AJUSTE DEL RELÉ DIFERENCIAL 7UT613 DEL TRANSFORMADOR DE LA S.E. TRUJILLO NOR-OESTE	21
3.1 Introducción.....	21
3.2 Cálculos para el ajuste del relé diferencial 7UT613.....	21
3.2.1 Datos del transformador de potencia.....	21
3.2.2 Datos de los transformadores de corrientes.....	22

3.2.3	Ajuste del relé diferencial 7UT613	22
CAPITULO IV		36
MODELAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO.....		36
4.1	Introducción.....	36
4.2	Modelamiento del transformador de potencia de la subestación eléctrica Trujillo Nor-Oeste 138/22.9/10.5 kV	36
4.2.1	Modelo del transformador en estado estable.....	36
4.2.2	Modelo del transformador para energización.....	37
4.3	Modelamiento de los transformadores de corrientes.....	45
CAPITULO V		46
SIMULACIONES DEL RELÉ DIFERENCIAL 7UT613 DEL TRANSFORMADOR DE LA S.E. TRUJILLO NOR-OESTE 138/23.8/10.5 KV.....		46
5.1	Introducción.....	46
5.2	Simulaciones.....	46
5.2.1	Energización del transformador con tap central y sin flujo remanente.....	47
5.2.2	Energización del transformador con tap central y con flujo remanente.....	50
5.2.3	Operación en estado estable	52
5.2.4	Falla externa a la zona de protección del relé diferencial	53
5.2.5	Falla interna a la zona de protección del relé diferencial.....	55
5.2.6	Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga	56
5.2.7	Falla interna a tierra en el lado de media tensión con resistencia de 21 ohm	57
5.2.8	Falla interna a tierra en el lado de alta tensión con resistencia de 700 ohm	59
CAPITULO VI		62
PRUEBAS AL RELÉ DIFERENCIAL SIEMENS 7UT613		62
6.1	Introducción.....	62
6.2	Desarrollo de los archivos Comtrade para los casos a probarse.....	62
6.3	Pruebas al relé diferencial Siemens 7UT613 ante diferentes eventos del sistema..	63
6.3.1	Energización del transformador con tap central y sin flujo remanente.....	63
6.3.2	Energización del transformador con tap central y con flujo remanente.....	64
6.3.3	Falla externa a la zona de protección	67
6.3.4	Falla interna a la zona de protección.....	69
6.3.5	Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga	71

6.3.6 Energización real del transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
ANEXOS	77
BIBLIOGRAFIA	84

PROLOGO

El propósito de este informe, es brindar los pasos a seguir para el cálculo de ajuste del relé diferencial 7UT613 de la marca SIEMENS, ya que es un relé de tecnología numérica y ofrece varias ventajas con respecto a los relés electromecánicos y es por ello que su ajuste tienen un cálculo diferente y nuevas consideraciones para su funcionamiento correcto.

El capítulo I, contiene la teoría de los tipos de fallas que se pueden presentar en el transformador de potencia y los tipos de protecciones que se utilizan para protegerlo.

El capítulo II, se analiza las dificultades que se presentan para los relés diferenciales y como el relé 7UT613 de la marca Siemens lo solución, también se explica las características de operación de dicho relé.

El capítulo III, se explica los cálculos que se deben de realizar para el ajuste del relé diferencial 7UT613 del transformador de potencia y como ejemplo se toma el transformador de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV.

El capítulo IV, se realiza el modelamiento del transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV y de los transformadores de corriente.

El capítulo V, se realiza las simulaciones del relé diferencial implementado a la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV, para los casos de energizaciones, fallas externas con y sin saturación de los transformadores de corrientes, fallas internas y operación normal del sistema.

El capítulo VI, se realiza pruebas al relé diferencial 7UT613 con archivos comtrade para los mismos casos simulados en el capítulo V.

Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones finales del trabajo.

Además de los capítulos mencionados, se incluyen anexos sobre las pruebas FAT del transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV y de los transformadores de corriente.

CAPITULO I

PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

1.1 Introducción

El transformador de potencia es uno de los elementos más importantes en el sistema eléctrico, ya que sin este elemento no se podría trasladar la energía de los centros generadores hasta los consumidores.

La protección para los transformadores de potencia, depende del tamaño, la tensión y la importancia que pueda tener en el sistema.

En la práctica general, adicionalmente a la protección eléctrica contra sobrecalentamiento o sobrecarga, puede haber accesorios térmicos o mecánicos para accionar una alarma, un banco de ventiladores, y en última instancia desconectar los transformadores.

La protección de los transformadores se hace típicamente con fusibles, para potencia hasta de 2,5 MVA, entre 2,5 y 5 MVA con fusibles o relés de sobrecorriente; de 5 a 10 MVA, se protegen con relés de sobrecorriente y/o protección diferencial simple, y para mayores de 10 MVA se usa necesariamente protección diferencial.

1.2 Tipos de fallas en el transformador

El transformador de potencia es un elemento con un índice de fallas menor en comparación con otros elementos del sistema eléctrico. Cuando el transformador falla, generalmente es en forma severa y muchas veces se producen incendios, de ahí la importancia de contar con esquemas rápidos y seguros. Los tipos de fallas que pueden ocurrir en un transformador se pueden dividir en 2 clases: fallas externas y fallas internas.

1.2.1 Fallas externas

Las fallas externas ocurren fuera de la zona protegida de la protección diferencial del transformador de potencia y acortan la vida útil del transformador debido al posible daño térmico y mecánico en los devanados. Entre los tipos de fallas externas están:

- a. Sobrecarga causada por la demanda eléctrica en el sistema, y es el motivo principal de envejecimiento prematuro del transformador.

- b. Sobrevoltaje causada por descargas atmosféricas.
- c. Sobretensión / reducción de frecuencia. El transformador es alimentado mediante una tensión alterna el cual genera un flujo magnético en el circuito magnético de dicho transformador cuyo valor eficaz es proporcional al cociente entre el valor eficaz de la tensión y la frecuencia de dicha tensión. Cuando el valor del flujo alcanza la zona de saturación en la curva B-H la corriente aumenta incrementando las pérdidas del transformador. Es por ello que las pérdidas en el núcleo magnético es debido a la saturación el cual puede producirse por una sobretensión como también por una reducción de la frecuencia del sistema.
- d. Cortocircuitos fuera del área protegida en el transformador.

1.2.2 Fallas internas

Las fallas internas ocurren dentro de la zona de protección del transformador y en general todas las fallas internas son muy serias, sobre todo porque siempre está presente el peligro de incendio. Las fallas internas pueden ser subdivididas en dos grupos: fallas incipientes y fallas activas. Así mismo las fallas incipientes son las siguientes:

- a. Sobrecalentamiento interno en el transformador.
- b. Sobreflujo en el núcleo.
- c. Sobrepresión en el tanque del transformador.
- d. Arqueo entre un devanado y el núcleo, debido a sobretensiones causadas por descargas atmosféricas, fallas externas y maniobras de switcheo en el sistema.
- e. Arqueo entre devanados o entre espiras contiguas de capas diferentes de un mismo devanado, debida a la misma causa anterior o por movimiento de los devanados bajo la acción de fuerzas electromagnéticas durante cortocircuitos externos.
- f. Fallas en los contactos de cambiadores de derivaciones produciéndose calentamiento o cortocircuito de vueltas entre derivaciones.

Las fallas activas requieren de una acción rápida para la desconexión del transformador para no causar algún daño severo en el transformador. Este tipo de fallas se clasifican como:

- a Cortocircuito en el devanado primario del transformador.
- b Cortocircuito en el devanado secundario del transformador.
- c Cortocircuito entre espiras de fases distintas, este tipo de fallas son detectados mediante una protección diferencial (87T) colocada a la entrada y salida de cada bobinado del transformador.

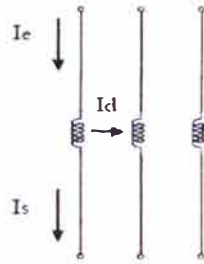


Fig. 1.1 Defecto provocado por un cortocircuito entre espiras

En la figura 1.1, se puede observar que el cortocircuito entre fases provoca una intensidad de defecto I_d entre fases que hace que la intensidad de entrada al devanado I_e de un fase sea distinta de la de salida I_s , situación que no se produce en ausencia del defecto.

- d Cortocircuito entre espiras en la misma fase, es el tipo de falla más difícil de detectar, ya que en sus fases iniciales, cuando el fallo involucra únicamente unas pocas espiras, resulta prácticamente imposible de detectar, especialmente en el caso de transformadores de alta tensión con un elevado número de espiras. Cuando el fallo se va extendiendo para abarcar un mayor número de espiras, es posible detectarlo a partir de la componente inversa de la intensidad.
- e Fallas en el núcleo, este tipo de falla suele producirse como resultado del deterioro del aislamiento entre chapas producido por un incremento excesivo de temperatura, estos incrementos pueden estar producidos por una condición de sobrecarga, por la presencia de armónicos en la corriente, o por sobretensiones o disminuciones de frecuencia que den lugar a una saturación de flujo magnético.

1.3 Protecciones típicas del transformador

En la tabla 1.1, se muestra un resumen de las protecciones básicas de un transformador en función de su potencia nominal y del mecanismo de refrigeración.

Tabla N° 1.1 Resumen de la protección del transformador

Tipo de defecto	Potencia AT/MT $S_N > 10-15 \text{ MVA}$	Distribución MT/BT	
		Sumergido	Seco
Sobrecarga	Imagen térmica (49) Termostato (26) Sondas PT100 (38/49T)	Imagen térmica (49) Termostato (26/71)	Imagen térmica (49) Sondas PT100 (38/49T)
Cortocircuito externo	Máximo de I (50/51)	Máximo de I (50/51) o fusibles	Máximo de I (50/51) o fusibles
Cortocircuito interno	Relé Buchholz (63) Protección diferencia (87)	Detector de nivel de aceite (71)	
Defecto a tierra	Máximo de I homopolar (50N/51N) Máximo de I de defecto a tierra (50G/51G)	Máximo de I homopolar (50N/51N)	Máximo de I homopolar (50N/51N)

CAPITULO II

PROTECCIÓN DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA CON RELÉ SIEMENS 7UT613

2.1 Introducción

La función diferencial es la protección principal que se emplean hoy día en la protección de transformadores de potencia mayores de 10 MVA. Esta protección puede actuar incorrectamente por las dificultades que se presentan como por ejemplo la desigualdad de la magnitud de la corriente en el lado de alta, media y baja del transformador de potencia, el desfasaje de las corrientes a través del transformador de potencia debido a las conexiones estrella - delta, magnetización en la energización en vacío (corriente de inserción), la desigualdad de los transformadores de corriente, la saturación de los transformadores de corriente ante fallas externas, etc. En este capítulo se explica como el relé numérico digital 7UT613 de marca SIEMENS, soluciona estas dificultades mediante su algoritmo matemático, así como también se explica las características de operación de dicho relé diferencial.

2.2 Soluciones del relé numérico 7UT613 para evitar las operaciones incorrectas

Existen varios factores que afectan el funcionamiento de la protección diferencial, a continuación se mencionan:

- Las magnitudes de las corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador de potencia son diferentes.
- Las conexiones estrella – delta provoca una diferencia angular de las corrientes entre los devanados del transformador de potencia. Esto provoca una diferencia de corrientes aunque los transformadores de corriente sean ideales.
- Los cambios automáticos de TAP del transformador de potencia varía la relación de corriente entre los devanados. Esto puede provocar un incremento en la corriente diferencial.
- La desigualdad de las corrientes nominales en secundarios de los transformadores de corriente.

- La saturación de los transformadores de corriente ante cortocircuitos externos a la protección diferencial. Este hecho puede provocar la operación del relé diferencial.
- La energización del transformador de potencia en vacío. La corriente de inserción es un fenómeno transitorio y ocasiona operación errónea de los relés diferenciales al crearse una diferencia muy grande entre las corrientes en ambos devanados.
- La corriente diferencial que se presenta ante fallas a tierra externas, esto puede provocar la operación errónea del relé diferencial.

Para poder explicar como el relé 7UT613, soluciona los factores antes mencionados usaremos como ejemplo, el transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV, así como también los transformadores de corriente usados para la protección diferencial.

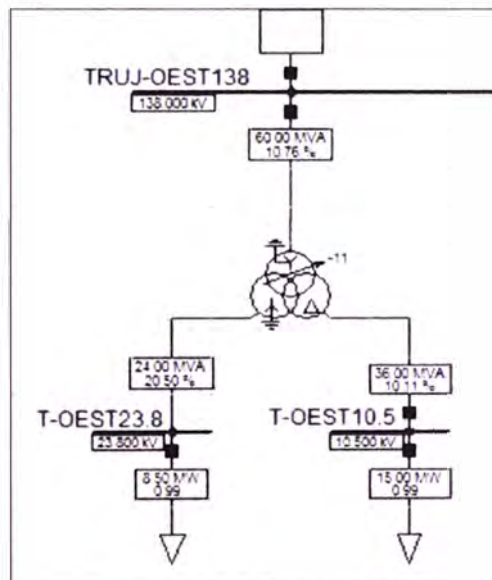


Fig. 2.1 Transformador de la subestación Trujillo Nor-Oeste

2.2.1 Magnitud de las corrientes en lado de alta, media y baja del transformador

Las corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador de potencia no son iguales en magnitud, es por ello que no se puede calcular directamente la corriente diferencial ya que esto llevaría a una corriente diferencial errónea (I_{diff_as}), tal como se muestra en la figura 2.2, la cual debe ser cero según la ley de Kirchhoff, ya que en el transformador de potencia la corriente que entra (devanado primario) debe ser igual a la suma de las corrientes que salen (suma de los devanados secundario y terciario), pero esta operación se hace reflejando las corrientes de los devanados secundario y terciario al primario.

Esta corriente diferencial en operación normal debe ser cero, pero debido a una pequeña corriente que circula por el núcleo magnético del transformador de potencia (corriente de magnetización) no es cero.

El transformador de la subestación de Trujillo Nor-Oeste tiene conexión YNyd11, esto nos indica que las corrientes del devanado de alta (CT_HV) y media (CT_MV) están desfasados 180° , pero las corrientes de alta y baja (CT LV) están desfasadas 330° , tal como se muestra en la figura 2.2.

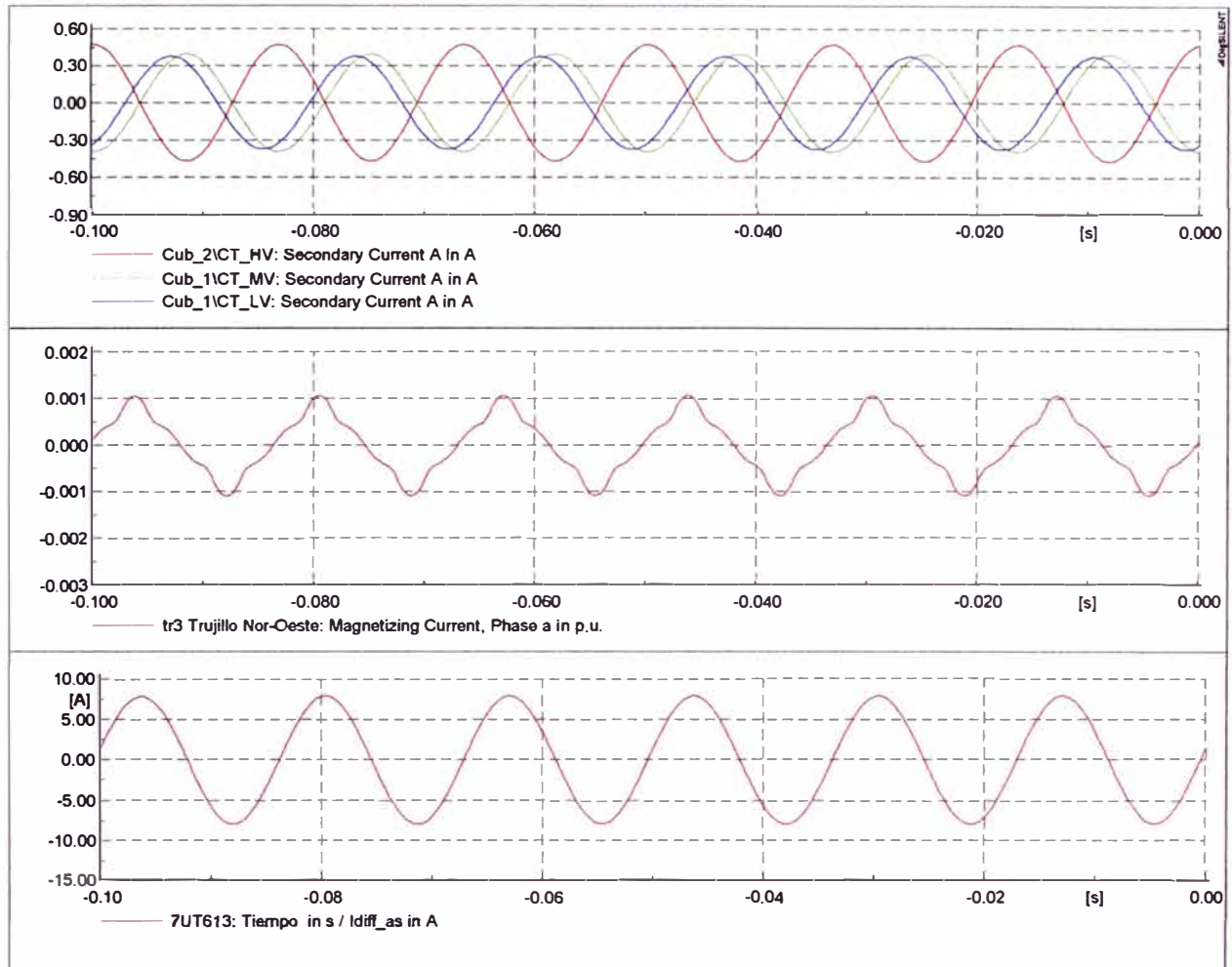


Fig. 2.2 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y la corriente diferencial calculada sin compensación

En la figura 2.3, se muestra como el relé 7UT613 realiza la adaptación de las corrientes del devanado primario y secundario del transformador de potencia, a continuación se explica los procesos por lo que pasan dichas corrientes:

- Los bloques NORM,, convierten las corrientes secundarias a por unidad y también elimina la relación de transformación de los transformadores de corriente.
- Los bloques I0 ELIM., Elimina la corriente homopolar que se presenta en fallas a tierras externas, para así evitar que opere erróneamente el relé diferencial.
- El bloque VECTOR GROUP ADAPT., corrige el desfase de la conexión del transformador de potencia en este caso la conexión YNyd11, lo realiza en el devanado de conexión delta.

- El bloque COM_PARISON ΔI , compara y calcula las corrientes diferenciales y restricción.

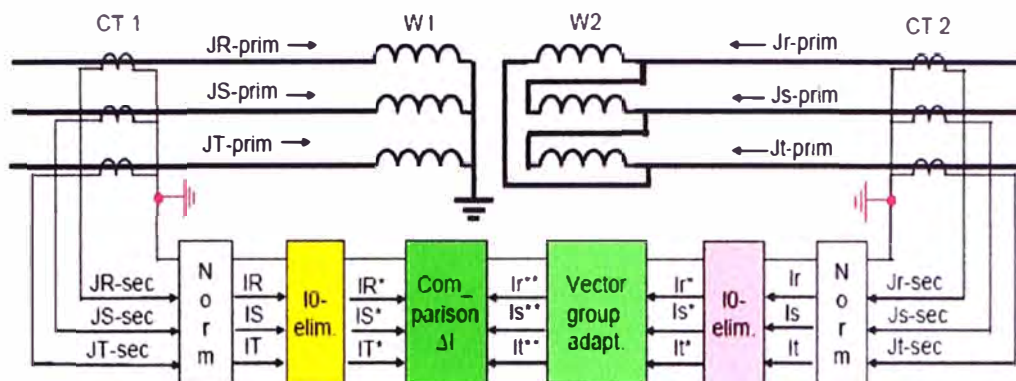


Fig. 2.3 Adaptación de las corrientes para compararlas

En la figura 2.4, se puede observar las corrientes del lado de alta, media y baja del transformador de potencia después de la adaptación que realiza el relé 7UT613 para una operación normal, también se puede observar la corriente diferencial de la fase A (I_{diff_ac}), el cual no es cero debido a la corriente de magnetización del transformador de potencia y también a los errores de medida de los transformadores de corriente.

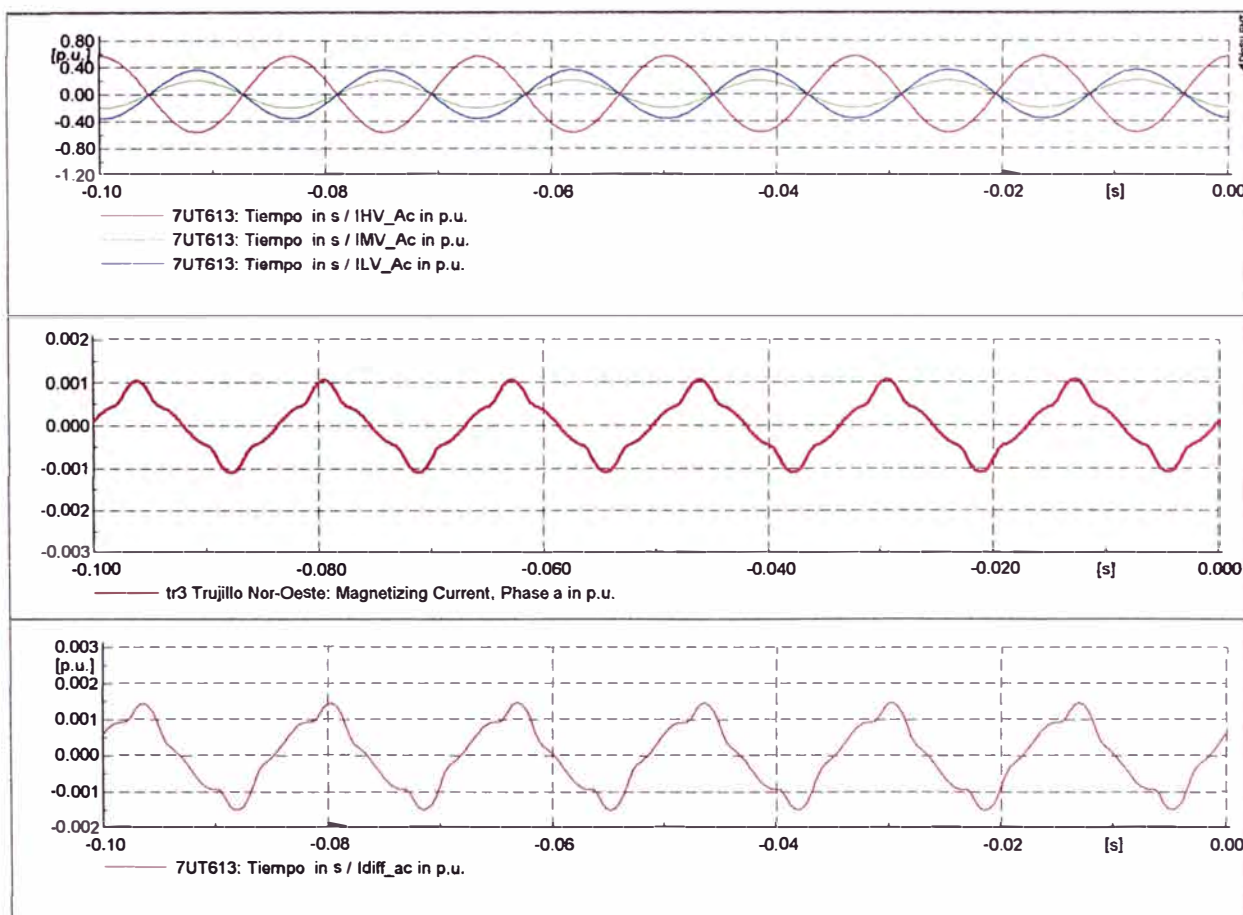


Fig. 2.4 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial, en operación normal y con adaptación de las corrientes que realiza el relé

2.2.2 Conexión estrella–delta del transformador provoca una corriente diferencial

La conexión estrella – delta, que tienen los transformadores de potencia es un inconveniente que se presenta para la protección diferencial ya que este hecho ocasiona una corriente diferencial errónea.

El transformador de la subestación de Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV, tiene conexión YNyn0d11, el cual produce una diferencia angular de corrientes entre los devanados del lado de alta y baja tensión, y si el relé no corrige esta diferencia angular de corrientes, se producirá una corriente diferencial (I_{diff_ac}), tal como se muestra en la figura 2.5

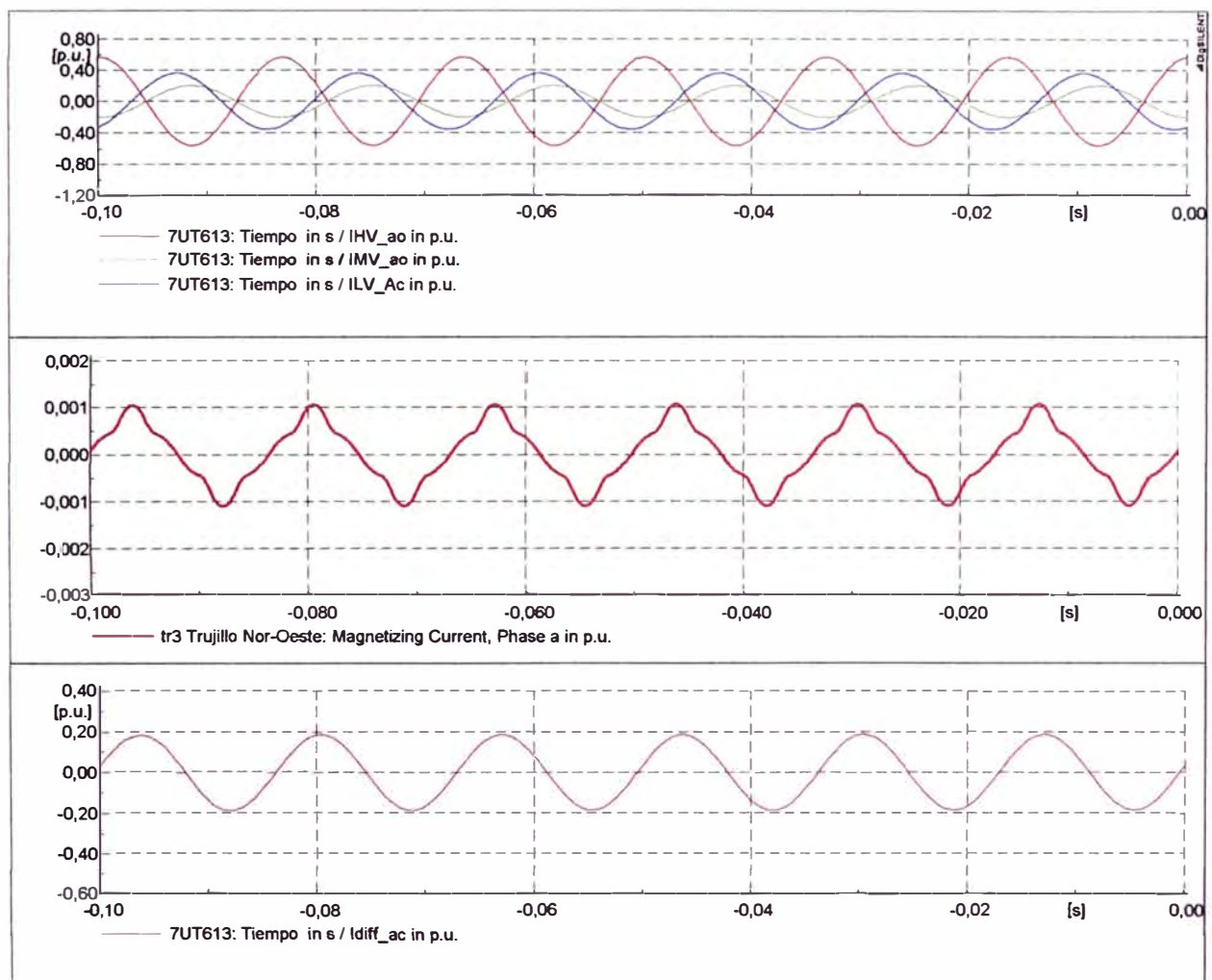


Fig. 2.5 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial, en operación normal y sin adaptación del desfases de corrientes.

En la figura 2.6, se muestra como el relé 7UT613 corrige esta diferencia angular de corrientes, que se produce entre los devanados del lado de alta y baja tensión del transformador de potencia, mediante su algoritmo matemático interno.

La corriente diferencial (I_{diff_ac}), que se muestra en la figura 2.6 es igual a la corriente de magnetización más los errores de medida de los transformadores de corriente.

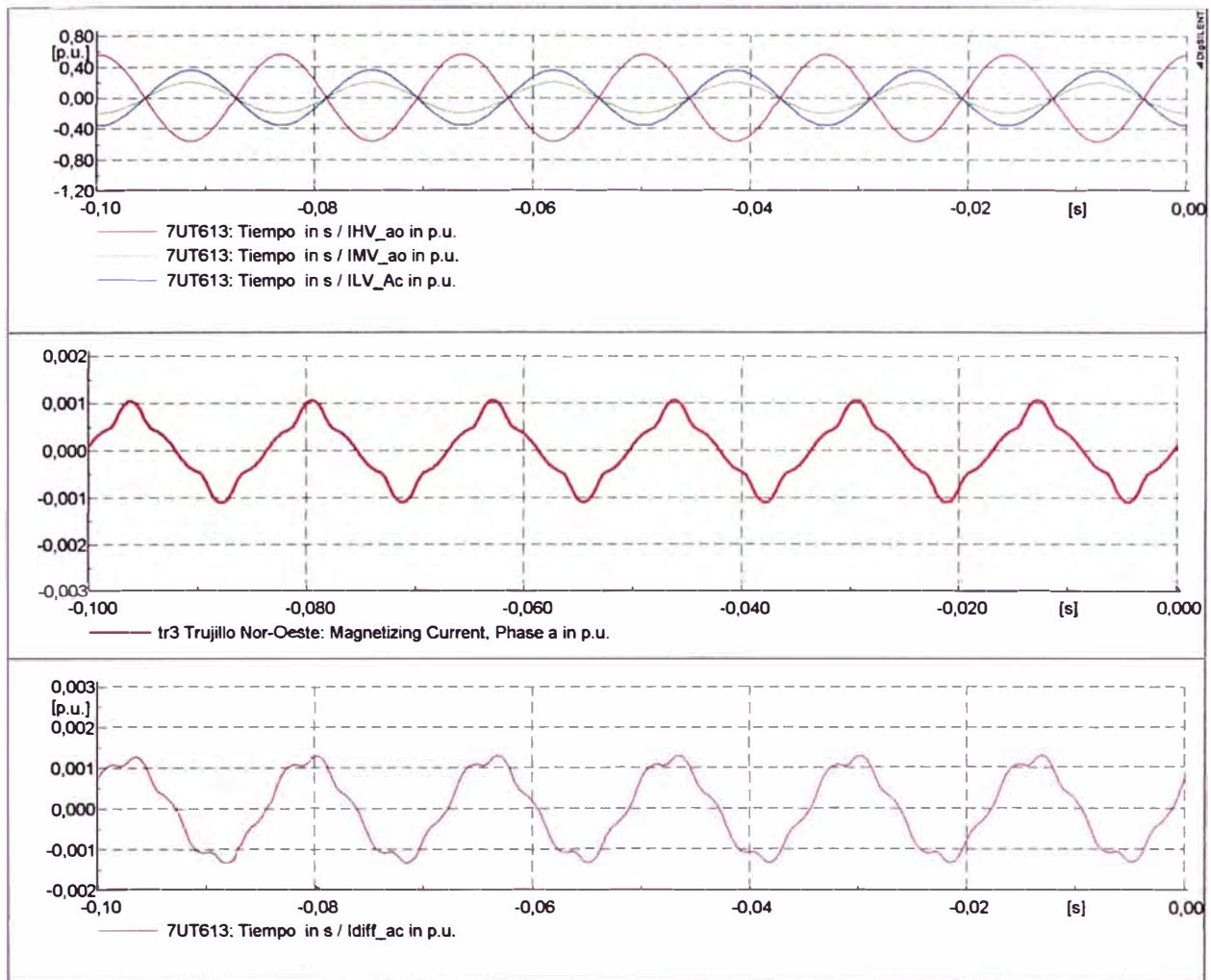


Fig. 2.6 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial, en operación normal y con adaptación del desfases de corrientes que realiza el relé 7UT613

2.2.3 Desigualdad de las corrientes secundarias de los transformadores de corriente

La desigualdad de las corrientes nominales en secundarios de los transformadores de corriente produce corrientes diferenciales erróneas, ya que las corrientes primarios serían reflejados a valores secundarios diferentes.

Para poder analizar este hecho usaremos los transformadores de corriente del transformador de la subestación. Trujillo Nor-Oeste, las cuales son:

- Transformador de corriente del lado de 138kV: 300/1A
- Transformador de corriente del lado de 23.8kV: 750/1A
- Transformador de corriente del lado de 10.5kV: 3150/5A

Como se puede ver el transformador de corriente de lado de 10.5kV, tiene una corriente nominal secundario de 5A y de los demás lados son de 1A, esta diferencia produce una corriente diferencial errónea (I_{diff_ac}), tal como se muestra en la figura 2.7.

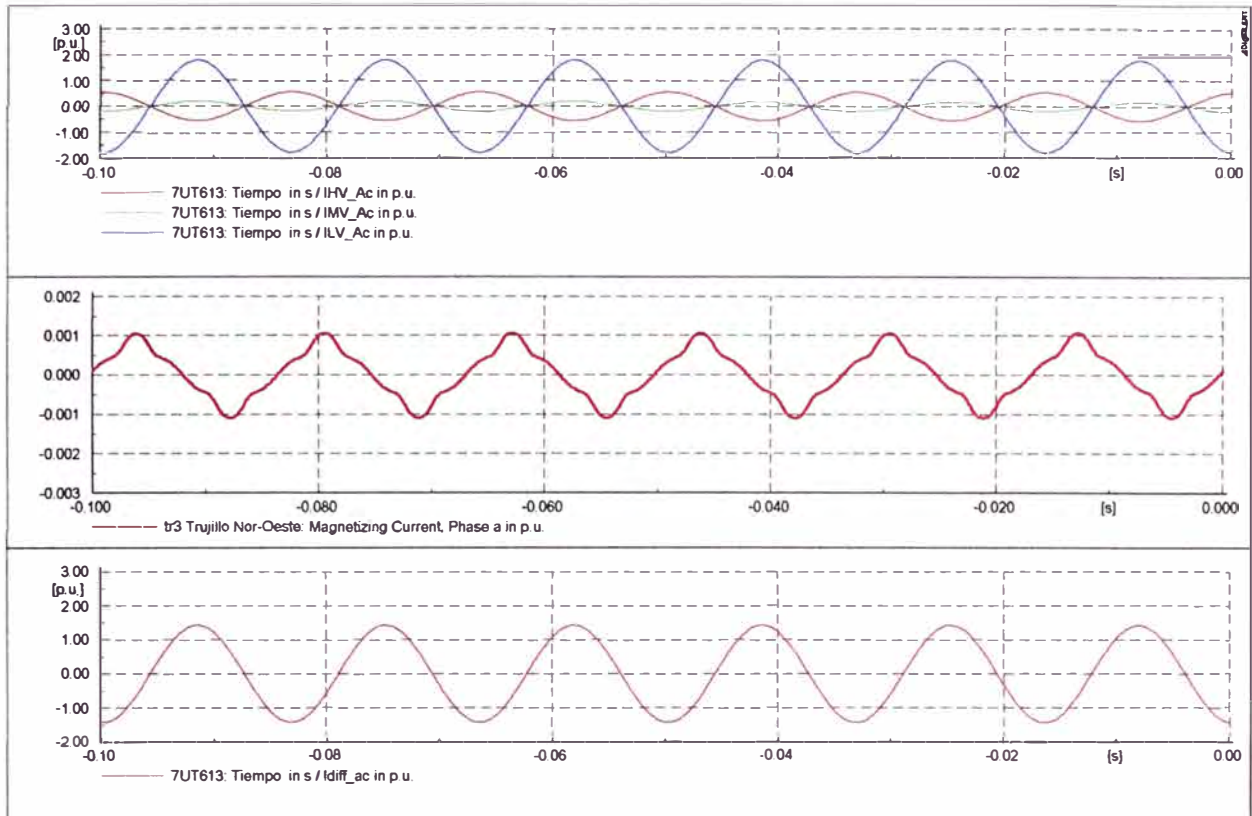


Fig. 2.7 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial, en operación normal y sin adaptación de los transformadores de corriente

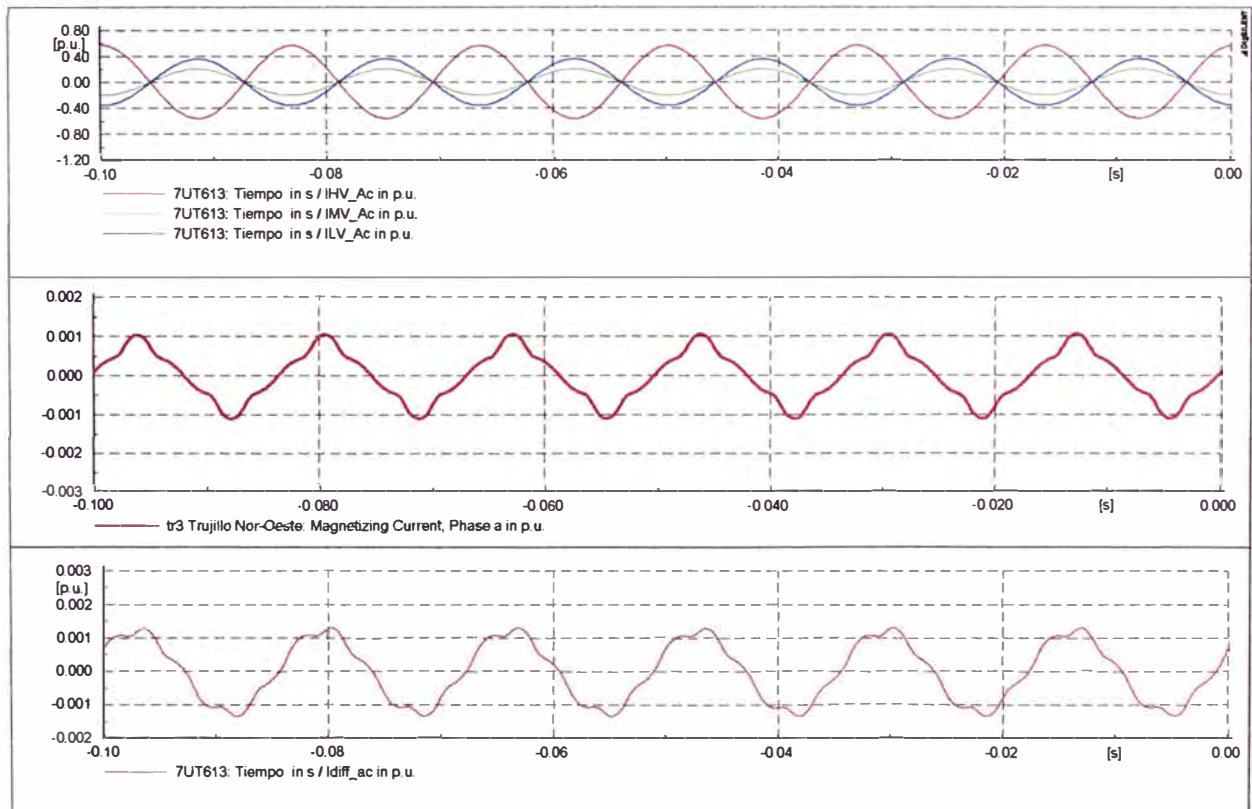


Fig. 2.8 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial, en operación normal y con adaptación de los transformadores de corriente que realiza el relé 7UT613

En la figura 2.8, se muestra como el relé 7UT613 elimina esta desigualdad de las corrientes secundarias de los transformadores de corriente, a través de su algoritmo matemático interno. Y de esa manera soluciona el problema que se puede presentar de usar transformadores de corriente con diferentes valores nominales secundarios (1A o 5A).

Como se puede observar la corriente diferencial (I_{diff_ac}) que calcula el relé 7UT613, son igual a la corriente de magnetización más los errores de medida de los transformadores de corriente.

2.2.4 Cambios de TAP automático del transformador de potencia

Los cambios de TAP automático del transformador de potencia provocan una corriente diferencial porque el relé toma como corrientes bases del tap central para pasar a valores por unidad las corrientes, entonces cuando el relé opera con un tap diferente al del central se provoca una corriente diferencial mayor al del tap central (porque calcula otra corriente por unidad) y para evitar que el relé opere en una operación estable del sistema, el relé 7UT613 tienen un ajuste del I_{diff} que considera este efecto. Como se puede observar en las figuras 2.9, 2.10 y 2.11, se produce mayor corriente diferencial cuando el tap está en la posición 21, esto sería cuando con el tiempo se conectan mas cargas en la barra de 10.5 kV, ya que la regulación de tensión solo se realiza al lado de baja tensión.

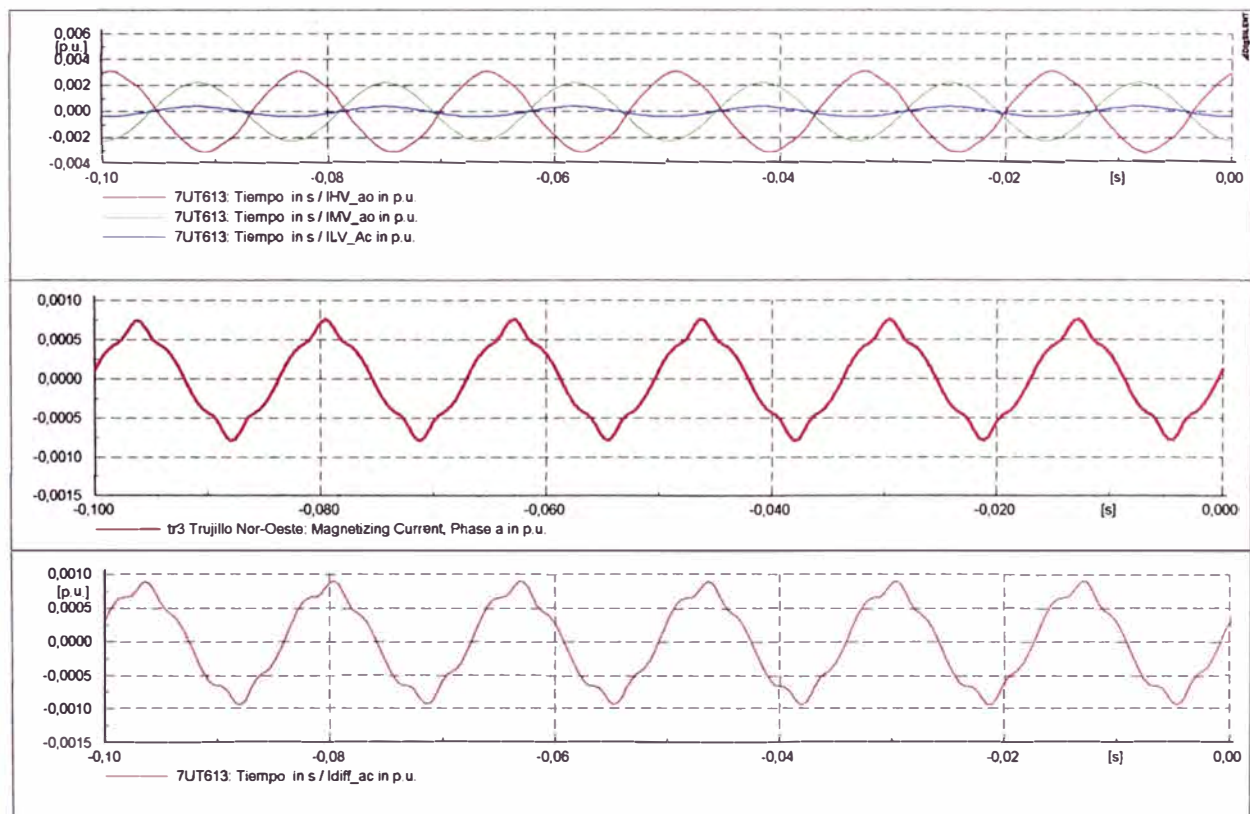


Fig. 2.9 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial calculado por relé 7UT613, en operación normal y con tap en la posición 1

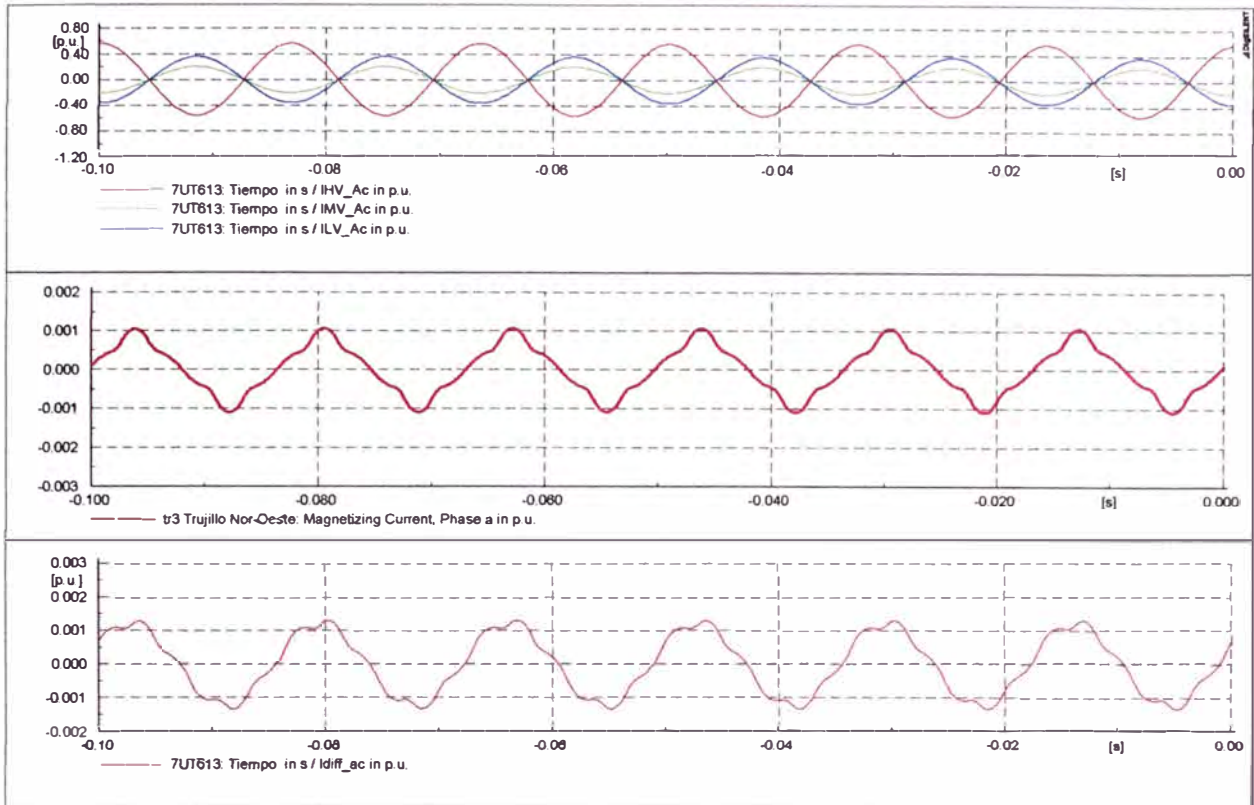


Fig. 2.10 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial calculado por relé 7UT613, en operación normal y con tap en la posición 11

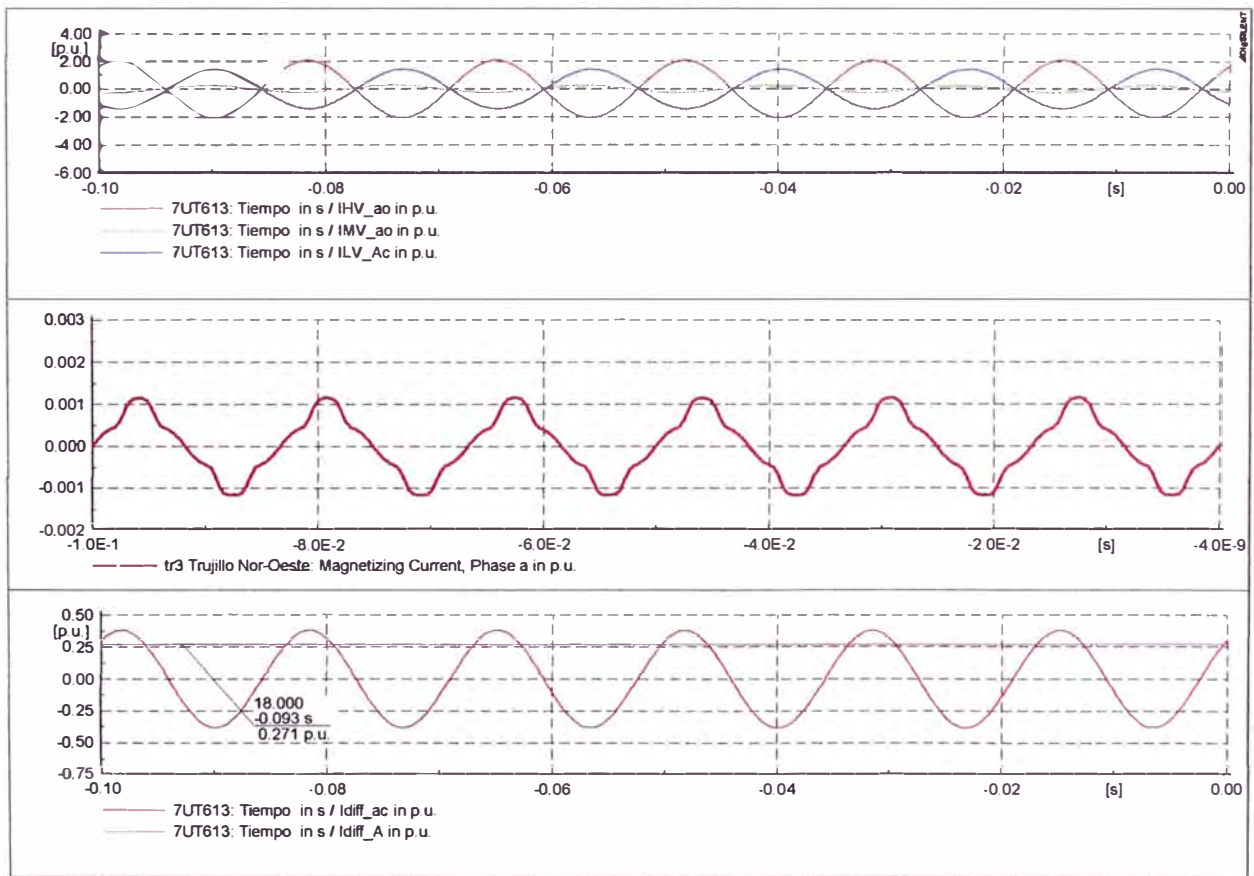


Fig. 2.11 Corrientes del lado de alta, media y baja de la fase A, corriente de magnetización y corriente diferencial calculado por relé 7UT613, en operación normal y con tap en la posición 21

En la figura 2.11, se muestra la corriente diferencial de la fase A que se produce cuando el tap este en la posición 21, para una operación normal del sistema, tanto en onda senoidal (I_{diff_ac}) y valor RMS (I_{diff_A}) que el relé calcula.

En el capítulo III, se realiza el cálculo para ajuste del I_{diff} y se verá este efecto de cambios automáticos del tap de los transformadores de potencia para regular la tensión.

2.2.5 Corriente diferencial ante fallas externas a tierra

Una falla externa a tierra puede provocar la operación del relé diferencial porque se presenta corriente homopolar en los devanados que tienen conexión estrella aterrada.

Para poder explicar la operación errónea del relé diferencial ante una falla a tierra externa, se simulara una falla monofásica en la fase A y en la barra de 23.8 kV (T-OEST23.8) de la subestación Trujillo Nor-Oeste, tal como se muestra en la figura 2.12.

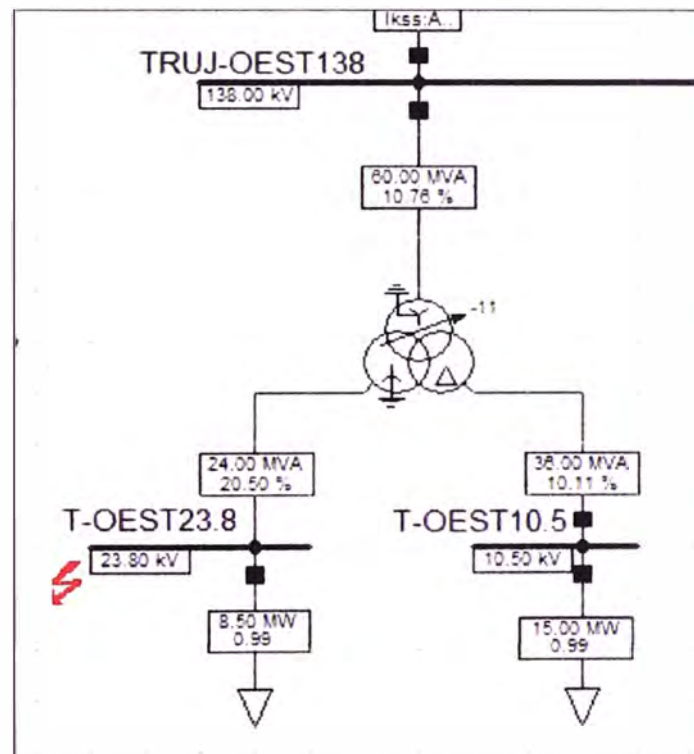


Fig. 2.12 Falla monofásica en la barra Trujillo Nor-Oeste 23.8 Kv

En la figura 2.13, se muestra la corriente diferencial que ocasionaría una falla a tierra externa en caso el relé no elimina la corriente homopolar, como se puede observar la corriente diferencial de la fase C entra a la zona de operación y esto llevaría a que el relé diferencial opere.

En la figura 2.14, se muestra la corriente diferencial después que el relé elimina la corriente homopolar para una falla a tierra externa, y también se observa que ninguna de las fases entra a la zona de operación y de esa manera se evita que el relé opere erróneamente.

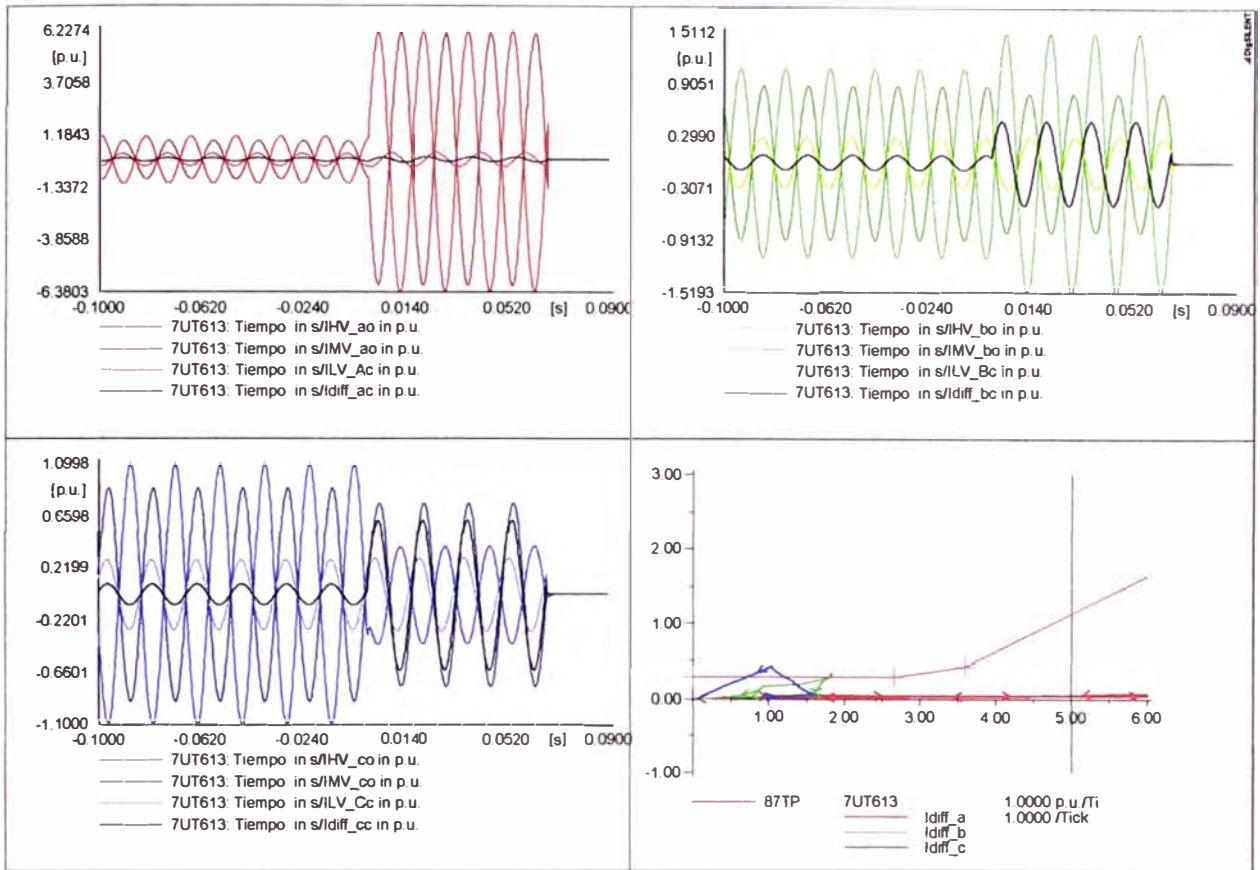


Fig. 2.13 Corrientes del lado de alta, media y baja, corriente diferencial calculado por relé 7UT613, sin eliminación de corriente homopolar ante una falla a tierra externa

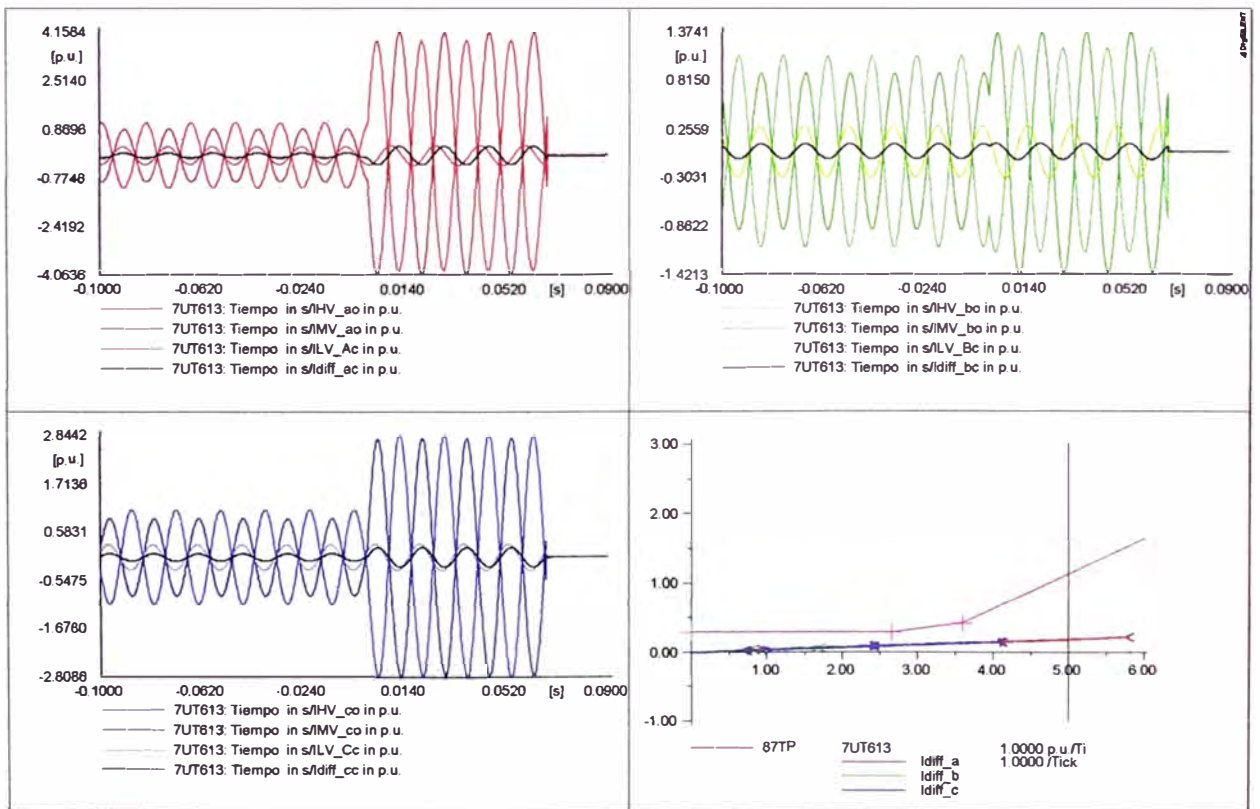


Fig. 2.14 Corrientes del lado de alta, media y baja, corriente diferencial calculado por relé 7UT613, con eliminación de corriente homopolar ante una falla a tierra externa

2.3 Características de operación del relé diferencial Siemens 7UT613

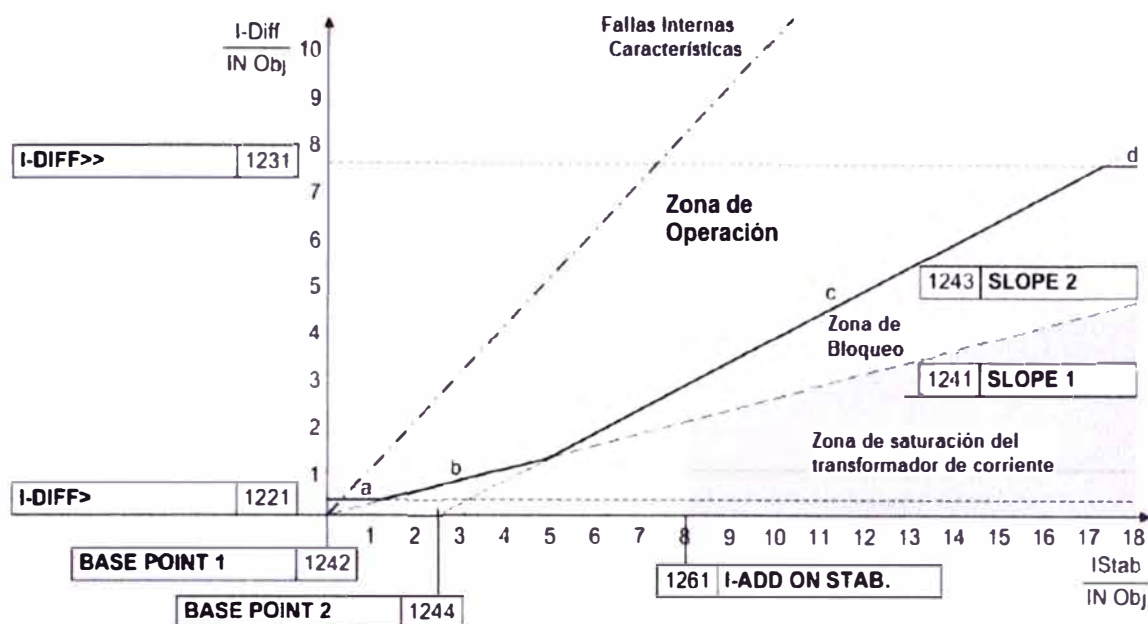


Fig. 2.15 Característica de operación de la protección diferencial del relé 7UT613

En la figura 2.15, se muestra las características de operación del relé Siemens 7UT613, las cuales se detallan a continuación:

El tramo “a” representa la sensibilidad del umbral de la protección diferencial ($I_{diff} >$), y se debe calcular la máxima corriente diferencial esperada en condiciones normales de operación y para evitar una actuación indebida de la protección se considera los siguientes efectos:

- Corriente de magnetización del transformador de potencia.
- Cambiador automático de taps en los transformadores de potencia para el control de tensión.
- Los máximos errores de medidas de los transformadores de corriente.

El tramo “b” está representada por la pendiente 1 (% slope), y se ajusta para asegurar la sensibilidad para fallas internas del transformador en condiciones normales de operación. En este tramo también se considera la corriente de magnetización del transformador, cambiador de taps de los transformadores y los errores de medida de los transformadores de corriente.

El tramo “c” se ajusta para asegurar que no existan disparos indeseados durante fallas externas a la zona de la protección diferencial, las cuales están limitadas por la posición de los transformadores de corriente.

El área “Zona de saturación del transformador de corriente” es el área operacional del indicador de la saturación de los transformadores de corriente ante fallas externas al

transformador de potencia, ya que el recorrido que realizan las corrientes diferencial y de restricción esta dado primero por el ingreso a esta zona y después entra a la zona de operación del relé diferencial, y de esa manera el relé detecta que la falla es externa y bloquea el disparo indeseados.

El tramo “d” ofrece un rápido despeje de fallas internas y no es bloqueado por la corriente de restricción ni para condiciones de magnetización ni de sobreflujo transitorio, por lo tanto, su ajuste debe ser superior al valor pico estimado de la corriente de inserción ante la energización del transformador.

2.3.1 Bloqueo por 2da armónica

Con el propósito de evitar disparos indeseados ante corrientes transitorias de energización del transformador, el relé siemens 7UT613 cuenta con la función de bloqueo por segunda armónica, ya que es el amónico con mayor porcentaje que se presenta en la corriente de inserción. En una falla interna, solo se presenta la segunda armónica en el primer ciclo y después decae a cero esto se debe a la componente DC de la corriente de falla es transitoria.

El bloqueo por segunda armónica cuenta con dos ajustes, las cuales son:

- Contenido de la 2da armónica en porcentaje (I_{2diff}/I_{diff})
- Tiempo para bloqueo de la 2da armónica (Cross-blocking 2da Harm)

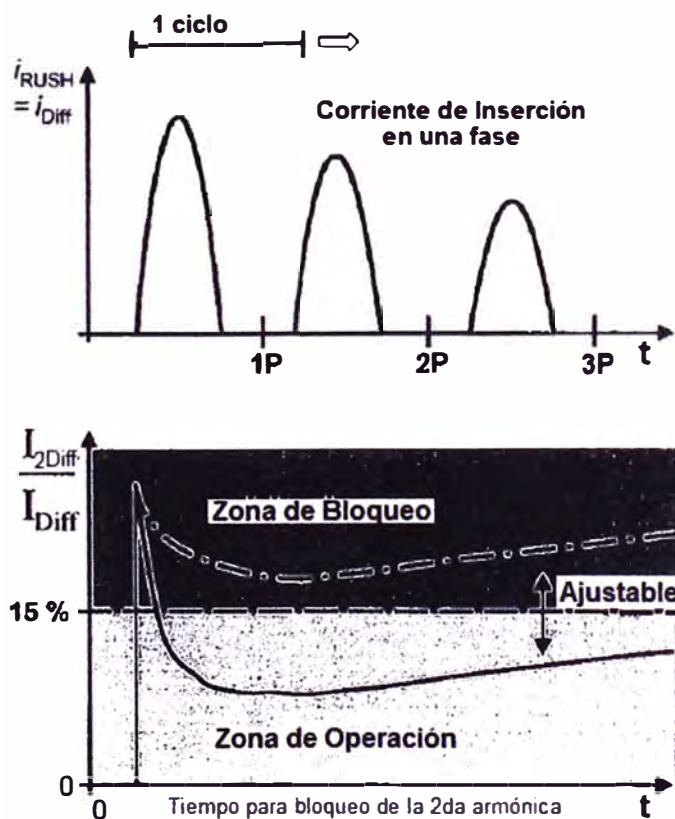


Fig. 2.16 Bloqueo del 2da armónica del relé 7UT613

En la figura 2.16, se muestra el algoritmo del relé 7UT613 para el bloqueo en la energización del transformador con el contenido de la segunda armónica. Solo basta que una fase pase el ajuste del contenido de la 2da armónica y el relé bloquea todas las fases hasta un tiempo ajustable (cross-blocking 2da Harm) y si después de ese tiempo una de las fases tiene menor porcentaje de 2da armónica de lo ajustado el relé envía disparo.

El tiempo de cross blocking 2da Harm, es ajustable porque en las energizaciones del transformador en el caso donde se presenta un bajo porcentaje de la corriente diferencial de la segunda armónica es en el caso donde se energiza con flujo remanente positivo y la tensión pasa por cero y en aumento, tal como se muestra en la figura 2.17.

En la figura 2.18, se muestra las corrientes que se producirían en la energización con falla a tierra en la fase A con una impedancia de 10 ohm, y el relé envía disparo instantáneo ya que las corrientes diferenciales son mayores al ajuste del I_{diff} ya que este ajuste no es bloqueado por la corriente de restricción, ni por la corriente diferencial de la segunda armónica.

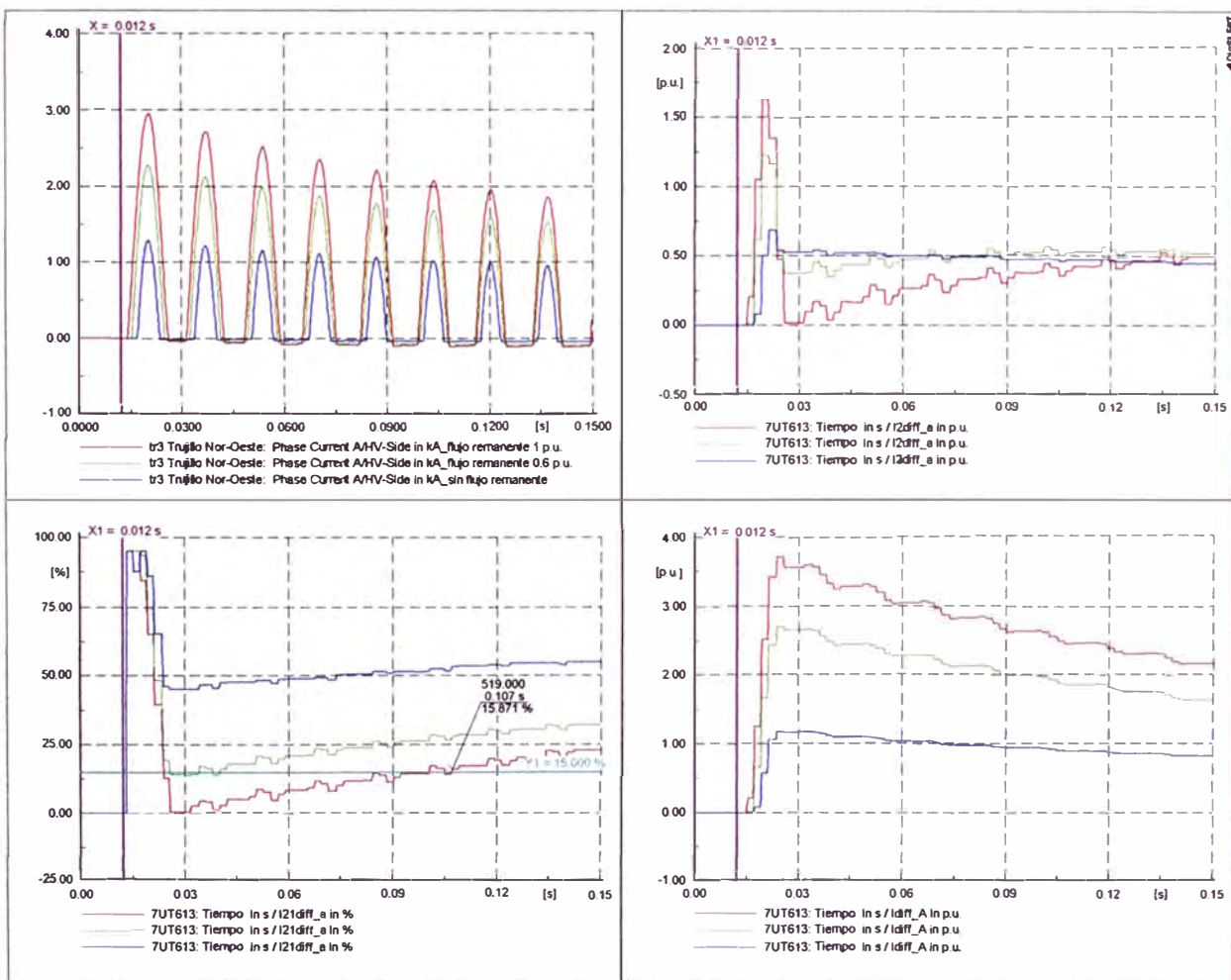


Fig. 2.17 Corrientes del lado de alta de la fase A, corrientes diferenciales para la primera y segunda armónica calculado por el relé 7UT613, en la energización del transformador

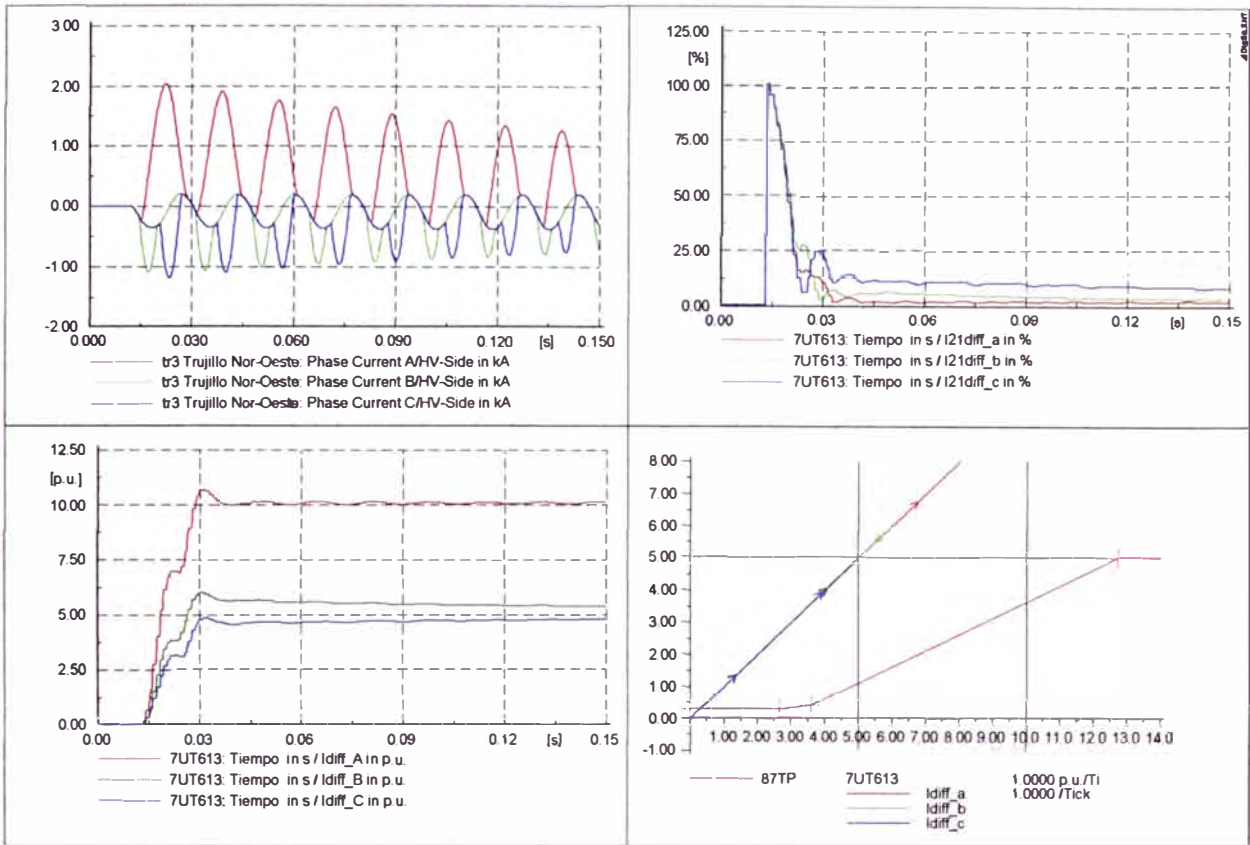


Fig. 2.18 Energización con falla a tierra con una impedancia de 10 ohm, corrientes diferenciales, contenido del segundo armónico y zona de operación, calculados por el relé 7UT613

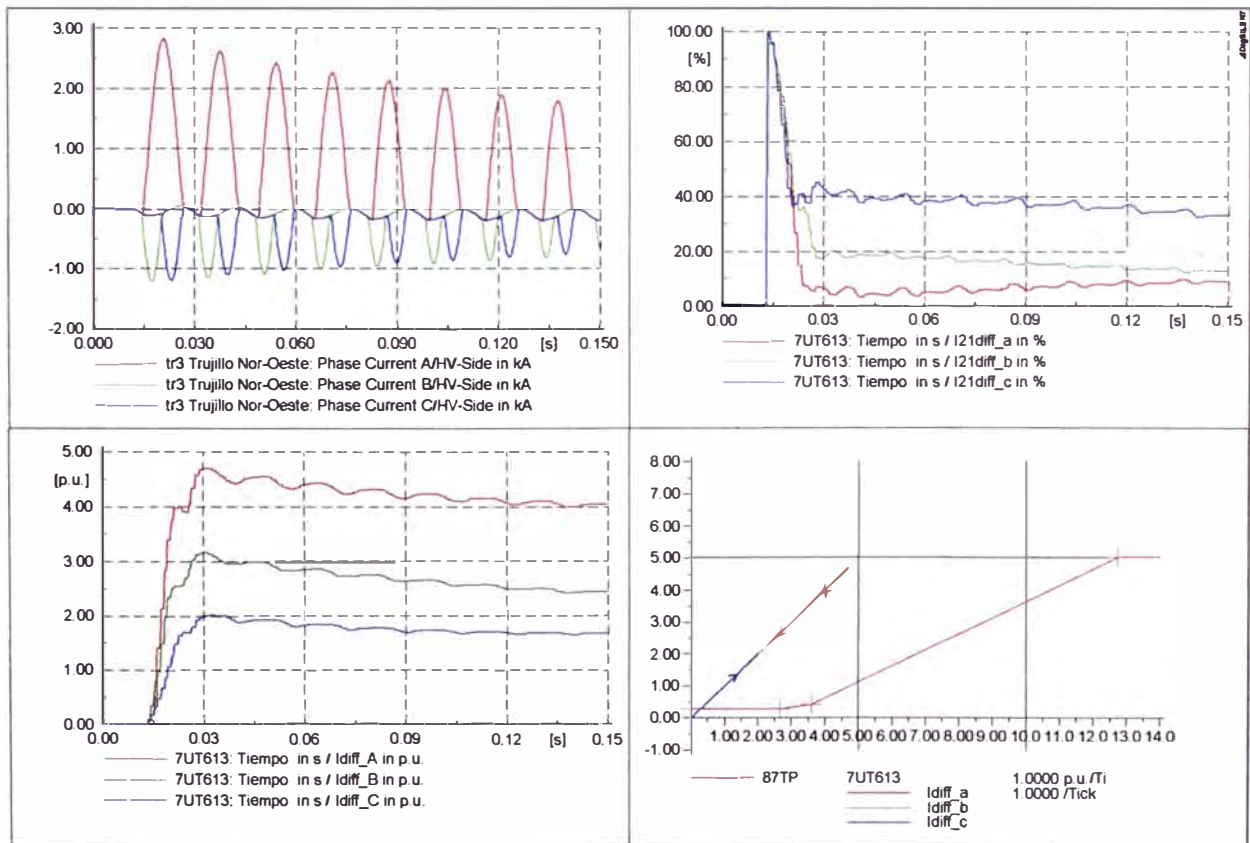


Fig. 2.19 Energización con falla a tierra con una impedancia de 50 ohm, corrientes diferenciales, contenido del segundo armónico y zona de operación, calculados por el relé 7UT613

En la figura 2.19, se muestra las corrientes que se producirían en la energización con falla a tierra en la fase A con una impedancia de 50 ohm, en este caso las corrientes diferenciales ya no son mayores al ajuste de $I_{diff} >>$, por lo tanto el relé haría bloqueo por la segunda armónica ya que después de un ciclo el porcentaje de la corriente diferencial de la segunda armónica en la fase C es mayor al 15% y el lo bloqueara por el tiempo de ajuste del cross blocking 2da Harm.

2.3.2 Protección de falla a tierra restringida

Una falla a tierra en una de las fases del devanado conectado en Y-tierra en un transformador, produce la circulación de una corriente relativamente pequeña por las fases que depende de la posición de la falla en el devanado, tal como se muestra en la figura 2.20.

Esta corriente tan pequeña, imposibilita la detección de la falla utilizando un relé de sobrecorriente común, por otro lado la protección diferencial puede volverse insensible ante fallas a tierra muy cercanas al neutro, dependiendo de la pendiente de restricción.

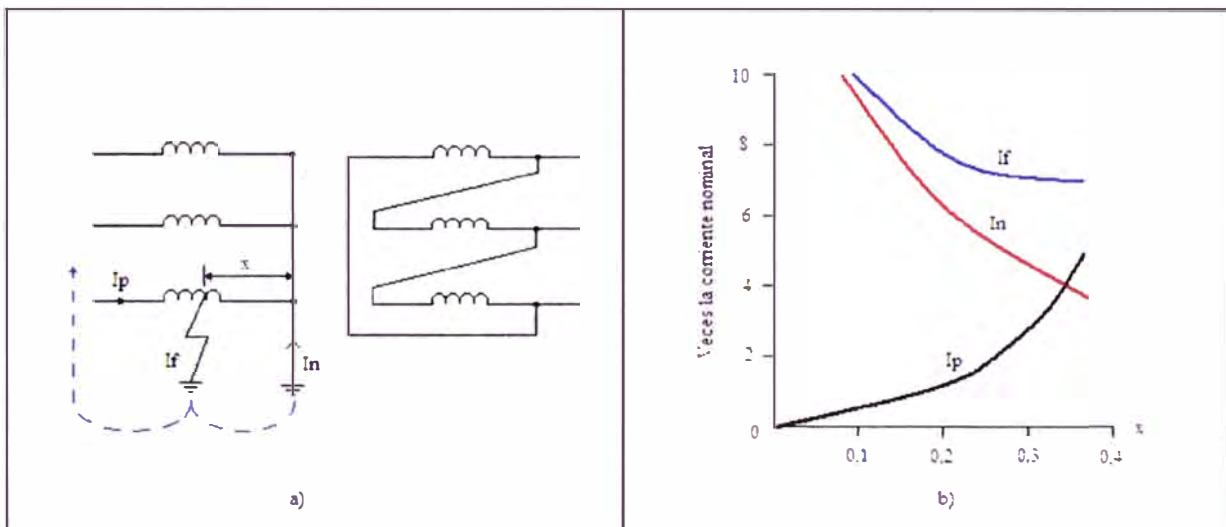


Fig. 2.20 a) Distribución de la Corriente de Falla en un Transformador con Conexión Y
b) Corriente por el Neutro, por las Fases, para una Falla a Tierra a Distintas Posiciones Relativas en el Devanado

Se observa en la figura 2.20, que mientras más cercana sea la falla al neutro, menor es la corriente que circula por las fases y por tanto más difícil de detectar por los relés de sobrecorriente y diferencial; de aquí la importancia de la aplicación de la protección de tierra restringida que es mucho más sensible contra fallas a tierra en los devanados.

CAPITULO III

CÁLCULOS PARA EL AJUSTE DEL RELÉ DIFERENCIAL 7UT613 DEL TRANSFORMADOR DE LA S.E. TRUJILLO NOR-OESTE

3.1 Introducción

En el presente capítulo se explica los cálculos justificativos que se deben de realizar para el ajuste del relé diferencial 7UT613 del transformador de potencia y como ejemplo se toma el transformador de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV, también se dan algunas recomendaciones que se deben de tener en cuenta para el correcto funcionamiento del relé diferencial.

3.2 Cálculos para el ajuste del relé diferencial 7UT613

Para realizar el ajuste del relé diferencial del transformador de potencia de La Subestación Trujillo Nor-Oeste, se debe tener los siguientes datos:

- Datos de placa del transformador de potencia.
- Datos de placa de los transformadores de corriente.
- Ubicación del punto estrella de los transformadores de corriente.

3.2.1 Datos del transformador de potencia

Los datos de placa del transformador de potencia de la subestación de Trujillo Nor-Oeste, presenta las siguientes características:

Potencia Nominal (ONAN/ONAF):

- Devanado HV : 50 / 60 MVA
- Devanado MV : 20 / 24 MVA
- Devanado LV : 30 / 36 MVA

Tensión Nominal:

- Devanado HV : $138 \pm 1 \times 10\%$ kV
- Devanado MV : 23.8 kV
- Devanado LV : 10.5 kV

Corriente Nominal (ONAN/ONAF)

- Devanado HV : 209.19 / 251.02 A
- Devanado MV : 485.17 / 582.20 A
- Devanado LV : 1649.57 / 1979.49 A

Tensión de cortocircuito

- HV-MV : 10.76% (20 MVA)
- MV-LV : 20.50% (20 MVA)
- LV-HV : 10.11% (30 MVA)

Conexión : YNyn0d11

3.2.2 Datos de los transformadores de corriente

Los transformadores de corriente asociados a la protección diferencial, presentan las siguientes características:

Devanado HV

- Burden Nominal : 20 VA
- Clase :5P20
- Relación transformación :300/1 A

Devanado MV

- Burden Nominal : 20 VA
- Clase :5P20
- Relación transformación :750/1 A

Devanado MV

- Burden Nominal : 20 VA
- Clase :5P20
- Relación transformación :3150/5 A

3.2.3 Ajuste del relé diferencial 7UT613

a) Transformador de potencia

De los datos del transformador de potencia se recomienda los ajustes que se muestra en la tabla 3.1.

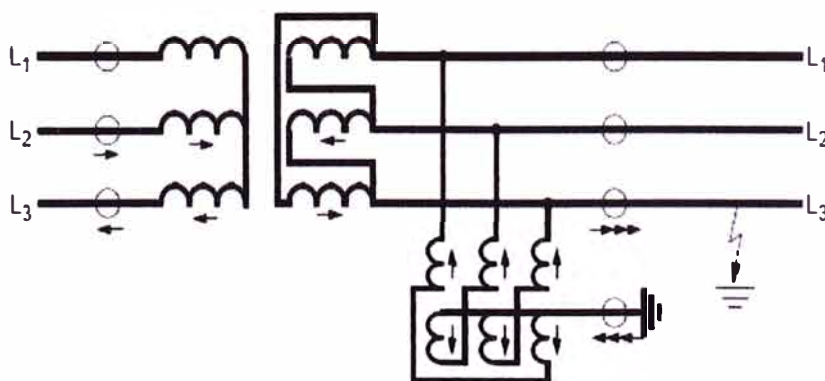
Es muy importante verificar en campo si las conexiones del neutro del estrella del transformador de potencia se encuentran aterradas o no, ya que de esto va a depender los ajustes de STARPOINT OF SIDE, ya que mediante este ajuste se le dice al relé que elimine la corriente homopolar que se presenta en una falla a tierra externa, y así evitar la operación errónea del relé diferencial.

Tabla N° 3.1 Ajustes de los parámetros del transformador de potencia en el relé 7UT613

Dir.	Parametros	Rango de Ajustes	Ajustes	Comentarios
0311	UN-PRI SIDE 1	0,4.....800,0 kV	138 kV	Tensión nominal del lado 1
0312	SN SIDE 1	0,2.....5000,0 MVA	60,00 MVA	Potencia aparente nominal del Transf. lado 1
0313	STARPNT SIDE 1	aislado aterrado	aterrado	Punto estrella del lado 1 es
0314	CONNECTION S1	D Y	Y (Wye)	Conexión del Transf. Para el lado 1
0321	UN-PRI SIDE 2	0,4.....800,0 kV	23,8 kV	Tensión nominal del lado 2
0322	SN SIDE 2	0,2.....5000,0 MVA	24,00 MVA	Potencia aparente nominal del Transf. lado 2
0323	STARPNT SIDE 2	aislado aterrado	aterrado	Punto estrella del lado 2 es
0324	CONNECTION S2	D Y	Y (Wye)	Conexión del Transf. Para el lado 2
0325	VECTOR GRP S2	0.....11	0	Vector Grupo del lado 2
0331	UN-PRI SIDE 3	0,4.....800,0 kV	10,5 kV	Tensión nominal del lado 3
0332	SN SIDE 3	0,2.....5000,0 MVA	36,00MVA	Potencia aparente nominal del Transf. lado 3
0333	STARPNT SIDE 3	aislado aterrado	aislado	Punto estrella del lado 3 es
0334	CONNECTION S3	D Y	D (Delta)	Conexión del Transf. Para el lado 3
0335	VECTOR GRP S3	0.....11	11	Vector Grupo del lado 3

También es importante verificar si entre el lado delta del transformador de potencia y los transformadores de corriente se encuentra un transformador ZIGZAG que se utiliza para aterrar sistemas aislados, tal como se muestra en la figura 3.1, se recomienda cambiar el siguiente ajuste: **0333 STARPOINT OF SIDE 3 IS = Aterrado**

Y de esa manera se evita que el relé opere para fallas a tierra externas.

**Fig. 3.1** Transformador zigzag en el devanado delta del transformador de potencia

b) Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente son tomados del buje del transformador de potencia, en la figura 3.2 se muestra la placa de los transformadores de corriente.

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE TIPO BUJE				
CT	TERMINALES	RELACION	CLASE	APLICACION
TC01	S1-S2	300/5 A	0.5 (12.5VA)	IMAGEN TERMICA AT-MONITOR
TC02	S1-S2	600/5 A	0.5 (12.5VA)	IMAGEN TERMICA MT-MONITOR
TC03	S1-S2	2000/5 A	0.5 (12.5VA)	IMAGEN TERMICA BT-MONITOR
TC04	S1-S2	2000/5 A	0.5 (12.5VA)	REGULACION BT
TC10...TC15	S2-S3	50/1 A	SP20 (20VA)	PROTECCION AT
	S1-S2	100/1 A		
	S2-S4	200/1 A		
	S1-S4	300/1 A		
	S1-S5	400/1 A		
TC16...TC21	S4-S5	150/1 A	SP20 (20VA)	PROTECCION MT
	S3-S5	300/1 A		
	S1-S3	450/1 A		
	S1-S4	600/1 A		
	S1-S5	750/1 A		
TC22...TC27	S1-S2	500/1 A	SP20 (20VA)	PROTECCION BT
	S2-S3	1000/1 A		
	S1-S3	1500/1 A		
	S1-S4	2000/1 A		
	S1-S5	2500/1 A		
TC28...TC30	S2-S3	50/1 A	0.5 (20VA)	MEDIDA AT
	S1-S2	100/1 A		
	S2-S4	200/1 A		
	S1-S4	300/1 A		
	S1-S5	400/1 A		
TC31...TC33	S4-S5	150/1 A	0.5 (20VA)	MEDIDA MT
	S3-S5	300/1 A		
	S1-S3	450/1 A		
	S1-S4	600/1 A		
	S1-S5	750/1 A		
TC34...TC36	S1-S2	500/1 A	0.5 (20VA)	MEDIDA BT
	S2-S3	1000/1 A		
	S1-S3	1500/1 A		
	S1-S4	2000/1 A		
	S1-S5	2500/1 A		

Fig. 3.2 Placa de los Transformadores de corrientes

La polaridad de los transformadores de corriente esta dado por la posición del punto estrella de estos, en la figura 3.3, se muestra que mediante el parámetro STRPNT se ajusta como **SI** cuando el punto estrella está mirando al objeto protegido y **NO** cuando el punto estrella no mira al objeto protegido.

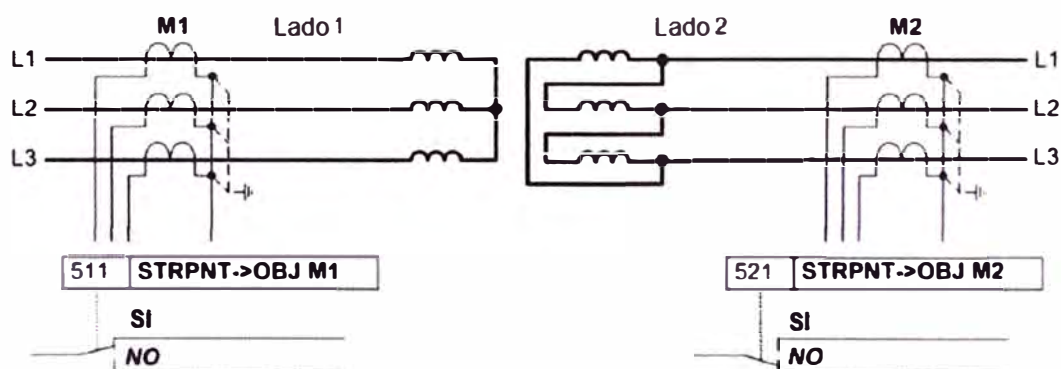


Fig. 3.3 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente

Para poder ver los puntos estrella de los transformadores de corriente se necesita ver los planos de ingeniería las cuales se muestran la conexión de los TC's y la placa del transformador de potencia donde se vea la orientación de los puntos S1 y S5.

En la figura 3.4, se muestra la ubicación de punto estrella de los transformadores de corriente del lado de 138 kV, y como se puede observar el punto estrella esta en el punto

S4, y verificando en la figura 3.5 se ve que el S4 está mirando al transformador de potencia, por lo tanto el ajuste **0511 STRPNT-Zobj M1** sería **SI**.

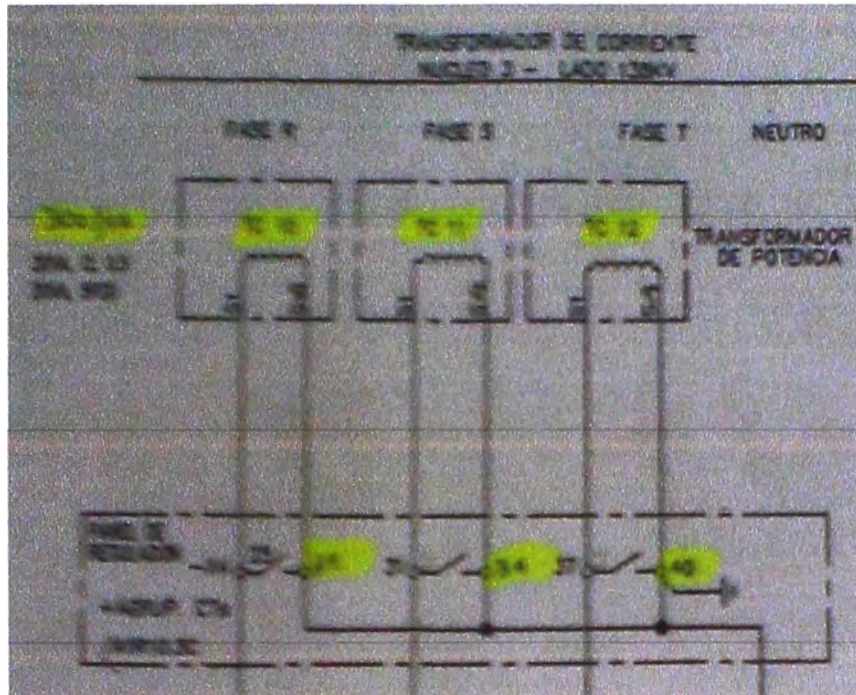


Fig. 3.4 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 138 kV
(ingeniería)

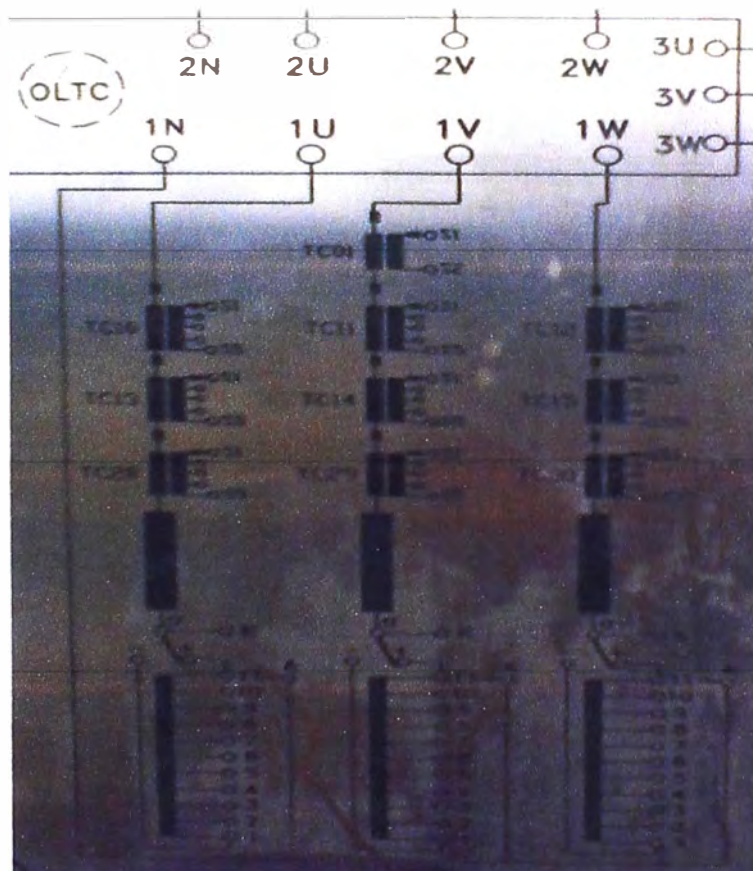


Fig. 3.5 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 138 kV
(placa del transformador de potencia)

En la figura 3.6, se muestra la ubicación de punto estrella de los transformadores de corriente del lado de 22.9 kV, y como se puede observar el punto estrella esta en el punto S1, y verificando en la figura 3.7 se ve que el S1 no mira al transformador de potencia, por lo tanto el ajuste **0511 STRPNT-Zobj M1** seria **NO**.

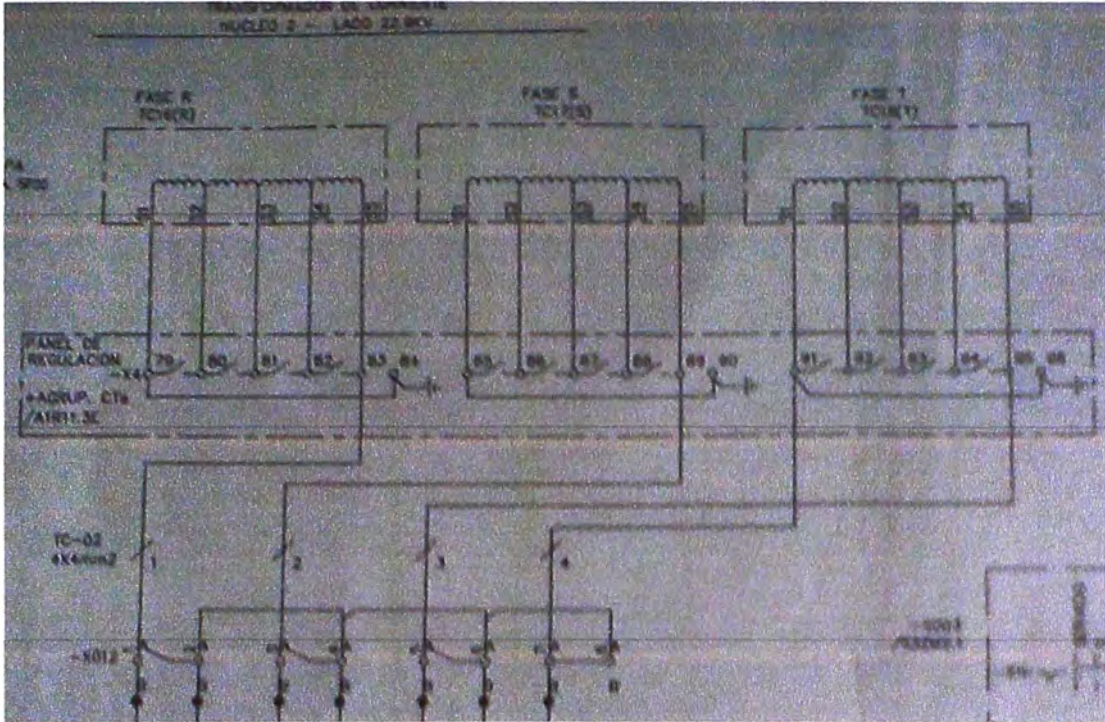
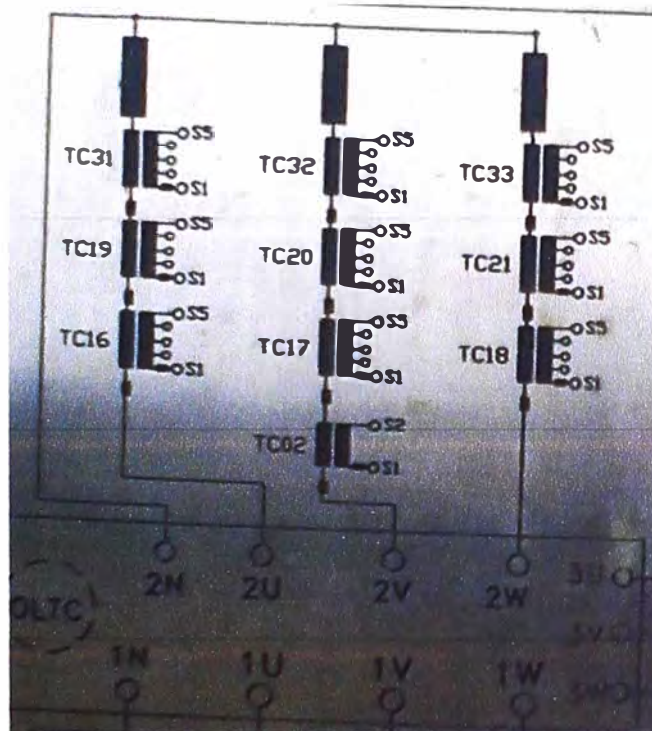


Fig. 3.6 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 22.9 kV
(ingeniería)



F . 3.7 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 22.9 kV
(placa del transformador de potencia)

En la figura 3.8, se muestra la ubicación de punto estrella de los transformadores de corriente del lado de 10.5 kV, y como se puede observar el punto estrella esta en el punto S1, y verificando en la figura 3.9 se ve que el S1 no mira al transformador de potencia, por lo tanto el ajuste **0511 STRPNT-Zobj M1** seria **NO**.

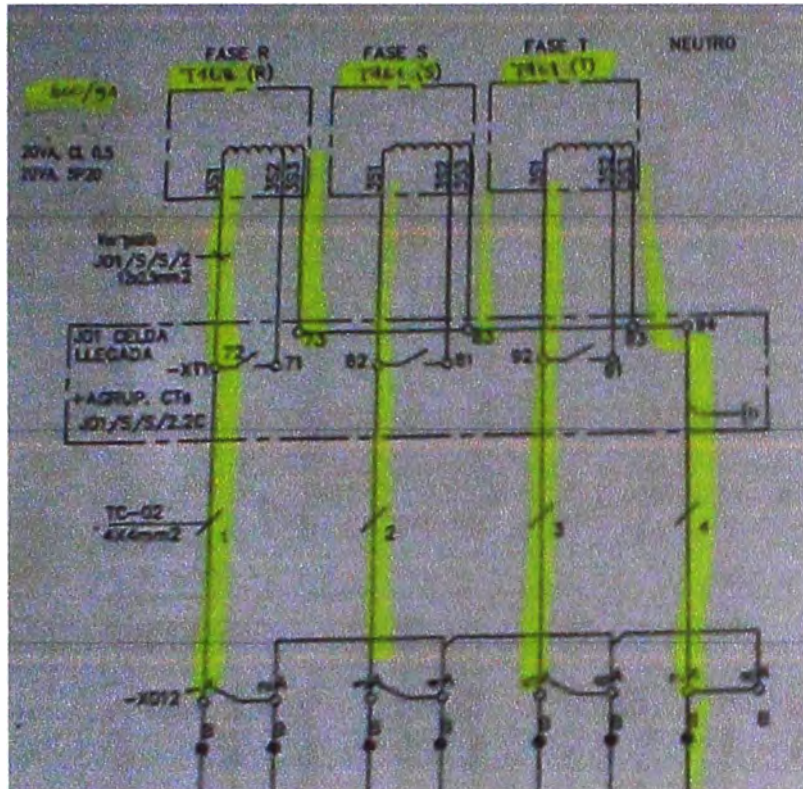


Fig. 3.8 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 10.5 kV (ingeniería)

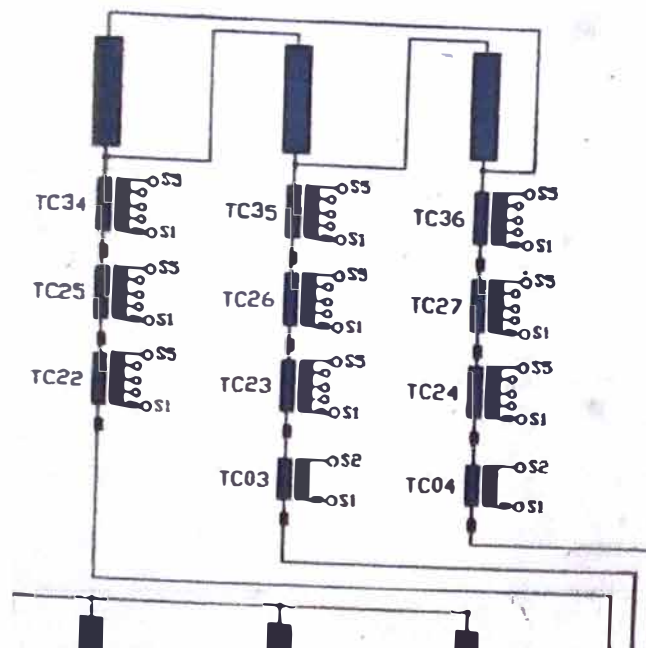


Fig. 3.9 Posición de puntos estrella de los transformadores de corriente del lado de 10.5 kV (placa del transformador de potencia)

En la tabla 3.2, se muestra los ajustes de los transformadores de corriente para la protección diferencial del transformador de potencia.

Tabla N° 3.2 Ajustes de los parámetros de los TC's en el relé 7UT613

Dir.	Parametros	Rango de Ajustes	Ajustes	Comentarios
0511	STRPNT-Zobj M1	SI	SI	CT-punto estrella Meas.Loc.1 in Dir. de Objeto
		NO		
0512	IN-PRIC T M1	1.....100000	300	CT Corriente primario nominal Meas.Loc. 1
		A		
0513	IN-SEC CT M1	1	1	CT Corriente secundario nominal Meas.Loc. 1
		5		
0521	STRPNT-Zobj M2	SI	NO	CT-punto estrella Meas.Loc.2 in Dir. de Objeto
		NO		
0522	IN-PRIC T M2	1.....100000	750	CT Corriente primario nominal Meas.Loc. 2
		A		
0523	IN-SEC CT M2	1	1	CT Corriente secundario nominal Meas.Loc. 2
		5		
0531	STRPNT-Zobj M3	SI	NO	CT-punto estrella Meas.Loc.3 in Dir. de Objeto
		NO		
0532	IN-PRIC T M3	1.....100000	3150	CT Corriente primario nominal Meas.Loc. 3
		A		
0533	IN-SEC CT M3	1	5	CT Corriente secundario nominal Meas.Loc. 3
		5		

c) Ajuste de I-diff>

Para hallar la corriente diferencial I-diff>, se realizan los siguientes cálculos:

Primero se calculan las corrientes nominales de cada lado del transformador y para cada posición de los taps del transformador mediante las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3).

$$I_{HV} = \frac{S_n}{V_{HVtap} * \sqrt{3}} \quad (3.1)$$

$$I_{MV} = \frac{S_{max}}{V_{MVtap} * \sqrt{3}} \quad (3.2)$$

$$I_{LV} = \frac{S_{max}}{V_{LVtap} * \sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Para el cálculo de las corrientes secundarias es necesario incluir en la medida el error introducido por la transformación de los transformadores de corriente. Los máximos errores asociados a los transformadores de corriente son del 5 %, y se calculan mediante las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6).

$$I_{HVsec} = I_{HVprim} * CT_{HV} * 1.05 \quad (3.4)$$

$$I_{MVsec} = I_{MVprim} * CT_{MV} * 0.95 \quad (3.5)$$

$$I_{LVsec} = I_{LVprim} * CT_{LV} * 0.95 \quad (3.6)$$

Con estos porcentajes de error se calcula la máxima corriente diferencial, mediante la ecuación (3.7).

$$I_{dif} = |I_{HVsec} + I_{MVsec} + I_{LVsec}| \quad (3.7)$$

Es importante considerar que los transformadores de corriente, al emplear relaciones de transformación distintas, no compensan la diferencia que se presenta entre las corrientes del lado de alta, media y baja del transformador, es decir, puede presentarse un posible desequilibrio de relación de transformación en los diferentes transformadores de corriente. Esto se compensa con los factores de “Matching” que el relé calcula de acuerdo a datos de los transformadores de corriente y al transformador de potencia, ya que este factor no solo elimina la relación de transformación de los TC’s sino que también pasa a por unidad las corrientes circulantes en los devanados del transformador de potencia.

Para realizar el cálculo de la corriente diferencial considerando el factor Matching se tienen las ecuaciones (3.8), (3.9), (3.10) y (3.11):

$$I_{mH} = k_{HV} * I_{HVsec} \quad (3.8)$$

$$I_{mM} = k_{MV} * I_{MVsec} \quad (3.9)$$

$$I_{mL} = k_{LV} * I_{LVsec} \quad (3.10)$$

$$I_{dif} = |I_{mH} + I_{mM} + I_{mL}| \quad (3.11)$$

El factor matching se calcula con las ecuaciones (3.12), (3.13) y (3.14).

$$k_{HV} = \frac{CT_{HV}}{I_{HV}} \quad (3.12)$$

$$k_{MV} = \frac{CT_{MV}}{I_{MV}} \quad (3.13)$$

$$k_{LV} = \frac{CT_{LV}}{I_{LV}} \quad (3.14)$$

Donde: k_{HV} = matching para el devanado de alta
 k_{MV} = matching para el devanado de media
 k_{LV} = matching para el devanado de baja

Para realizar el cálculo de la corriente restricción se emplea la ecuación (3.15):

$$I_{restr} = |I_{mH}| + |I_{mM}| + |I_{mL}| \quad (3.15)$$

Reemplazando los parámetros del transformador de potencia y de los transformadores de corriente asociados a la protección diferencial en las anteriores ecuaciones, se tiene la tabla 3.3:

Tabla N° 3.3 Resumen de corrientes diferenciales y de restricción para el transformador de la S.E. Trujillo Nor-Oeste

Tap	Tensión (kV) HV	Tensión (kV) MV	Tensión (kV) LV	CT _{HV}	CT _{MV}	CT _{LV}	I _{HV prim.}	I _{MV prim.}	I _{LV prim.}	I _{HV sec.}	I _{MV sec.}	I _{LV sec.}	I _{mH}	I _{mM}	I _{mL}	I _{diff}	I _{rest}
1 (+11%)	151.8	23.8	10.5	300	750	630	228.202	485.168	2199.43	0.799	0.615	3.317	0.955	0.317	0.633	0.005	1.905
11 (+0%)	138	23.8	10.5	300	750	630	251.022	485.168	2199.43	0.879	0.615	3.317	1.050	0.317	0.633	0.100	2.000
21 (-11%)	124.2	23.8	10.5	300	750	630	278.913	485.168	2199.43	0.976	0.615	3.317	1.167	0.317	0.633	0.217	2.117

Con factores k (matching)

$$k_{HV}=1.195$$

$$k_{MV}=0.515$$

$$k_{L.V}=0.191$$

En la tabla 3.3 anterior se puede observar que la máxima corriente diferencial máxima es de 0.217 I/In para la posición del tap 21 (-11%), por lo tanto el ajuste del umbral de arranque:

$$I-DIFF \geq 0.29 I/NO$$

El I-DIFF > no se ajusta a 0.25 I/INO, ya que a operación de sobrecarga del 25% es mayor e igual a 0.27 I/INO, tal como se explica en el capítulo 2, figura 2.11 ahí se observa la corriente diferencial rms de 0.271 p.u.

d) Ajuste de la pendiente 1 (%Slope 1)

De la tabla 8 se tiene una corriente diferencial de 0.217 I/In y una corriente de restricción de 2.117 I/In, por lo tanto se tiene de la ecuación (3.16):

$$\%slope = \frac{I_{diff}}{I_{rest}} * 100\% \quad (3.16)$$

$$\%slope = \frac{0.217}{2.117} * 100\% = 10.24\%$$

La pendiente 1 se ajusta en un 15% para garantizar que la protección diferencial no opere ante condiciones normales de carga y sobrecarga, para ello se tiene en cuenta los errores de los transformadores de corriente.

El punto de transición entre la corriente de pickup y la pendiente 1 (slope 1), se puede seleccionar calculando el valor de corriente en condiciones de sobrecarga del transformador (emergencia). Así, se considerará que el transformador trabaja con una sobrecarga máxima del 25 % sobre la condición actual, de su capacidad nominal. Los resultados del cálculo de las corrientes de sobrecarga de los lados de alta, media y baja tensión, para el transformador operando en TAP 21 (-11%) y las respectivas corrientes diferenciales y de restricción, se presentan en la tabla 3.4:

Tabla N° 3.4 Resumen de corrientes diferenciales y de restricción para el transformador de la S.E. Trujillo Nor-Oeste en condiciones de sobrecarga

Tap	Tensión (kV) HV	Tensión (kV) MV	Tensión (kV) LV	CTHV	CTMV	CTLV	I _{HV prim.}	I _{MV prim.}	I _{LV prim.}	I _{HV sec}	I _{MV sec}	I _{LV sec}	I _{mH}	I _{mM}	I _{mL}	I _{diff}	I _{rest}
1 (+11%)	151.8	23.8	10.5	300	750	630	285.252	1212.92	1374.64	0.998	1.536	2.073	1.193	0.792	0.396	0.006	2.381
11 (+0%)	138	23.8	10.5	300	750	630	313.777	1212.92	1374.64	1.098	1.536	2.073	1.312	0.792	0.396	0.125	2.500
21 (-11%)	124.2	23.8	10.5	300	750	630	348.641	1212.92	1374.64	1.220	1.536	2.073	1.458	0.792	0.396	0.271	2.646

El parámetro BASEPOINT1, es decir la intersección de la recta b con el eje de las abscisas (I_{rest}) se obtiene aplicando la ecuación de la recta con una pendiente del 15%. De esta manera se obtienen los siguientes ajustes:

BASE POINT 1 : 0.72 I/INO

KNEEPOINT 1 : 2.65 I/INO

Slope 1 : 15%

e) Ajuste de la pendiente 2 (%Slope 2)

La pendiente 2 se ajusta en 50% para garantizar que el relé no opere de manera errónea ante una condición de falla externa y el KNEEPOINT2 se obtiene para el 50% del aporte ante una falla externa máxima en el secundario del transformador, que se asume como la corriente que corresponde a la impedancia de cortocircuito del transformador, en base a la potencia ONAF:

En tabla 3.5, se muestra el comportamiento de las corrientes diferenciales y de restricción ante una falla máxima externa al transformador, en el lado de 23 kV.

Tabla N° 3.5 Resumen de corrientes diferenciales y de restricción para el transformador de la S.E. Trujillo Nor-Oeste ante una falla externa (23.8 kV)

Tap	Tensión (kV) HV	Tensión (kV) MV	Tensión (kV) LV	CTHV	CTMV	CTLV	I _{HV prim.}	I _{MV prim.}	I _{LV prim.}	I _{HV sec}	I _{MV sec}	I _{LV sec}	I _{mH}	I _{mM}	I _{mL}	I _{diff}	I _{rest}
1 (+11%)	151.8	23.8	10.5	300	750	630	860.489	5488.33	0	3.012	6.952	0.000	3.599	3.582	0.000	0.017	7.182
11 (+0%)	138	23.8	10.5	300	750	630	777.639	4509.00	0	2.722	5.711	0.000	3.253	2.943	0.000	0.310	6.196
21 (-11%)	124.2	23.8	10.5	300	750	630	681.606	3556.95	0	2.386	4.505	0.000	2.851	2.322	0.000	0.529	5.173

De esta manera se obtiene los siguientes ajustes:

BASE POINT 2 : 2.73 I/INO

KNEEPOINT 2 : 3.59 I/INO

Slope 2 : 50%

f) Ajuste de I_{diff}>>

El relé 7UT613 incorpora un elemento diferencial de ajuste alto (I-DIFF>>) para complementar la protección provista por el elemento diferencial de ajuste bajo (I_{diff}>). Dicho elemento (I_{diff}>>) ofrece un rápido despeje de fallas internas y no es bloqueado por

la corriente de restricción ni para condiciones de magnetización ni de sobreflujo transitorio, por lo tanto, su ajuste debe ser superior al valor pico estimado de la máxima corriente de Inserción ante energización del transformador, esto se analiza en el capítulo 5. Según el fabricante este ajuste para un transformador de potencia debe ser la máxima corriente de cortocircuito esta dado por la ecuación (3.17):

$$I_{-DIFF}>>=I_{cc\ max}=\frac{\left(\frac{1}{V_{CC}}\right)*I_N}{I_N} \quad (3.17)$$

$$I_{-DIFF}>>=5 I/I_{NO}$$

En la figura 3.10, se muestra la curva característica de operación de la protección diferencial con el ajuste propuesto para el transformador de potencia de la S.E. de Trujillo Nor-Oeste.

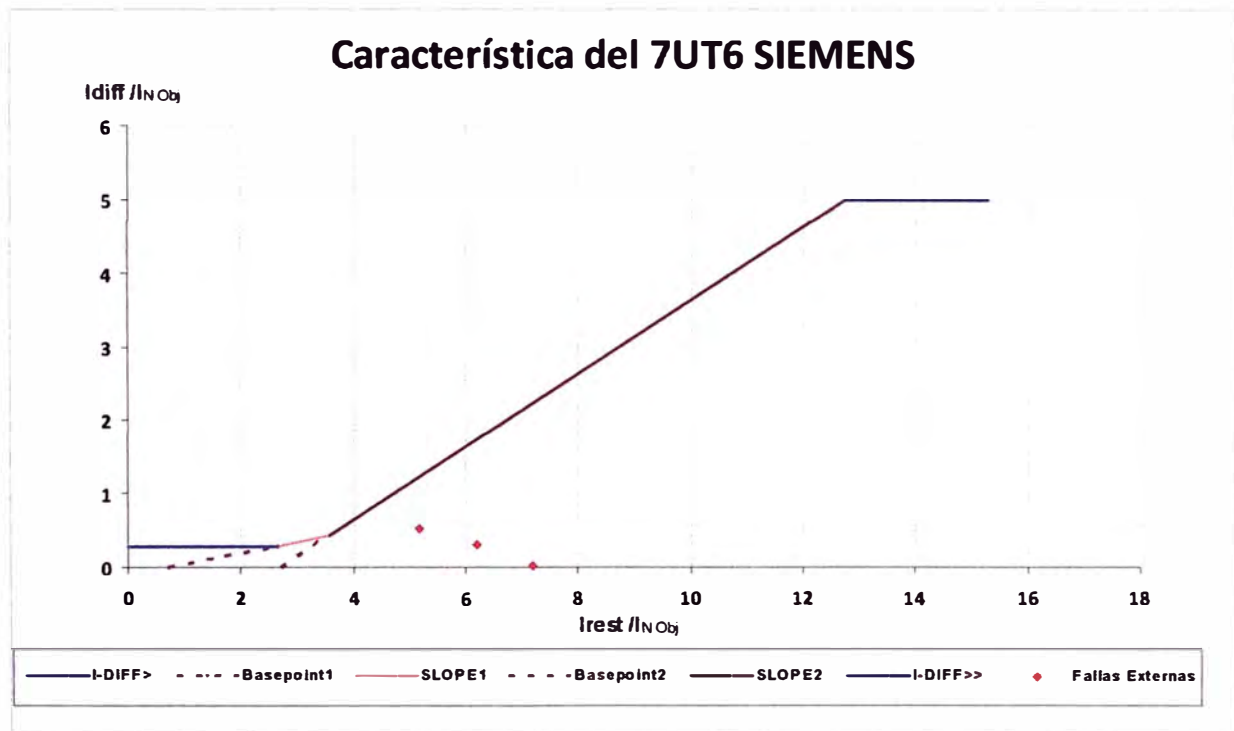


Fig. 3.10 Características de operación de la protección diferencial con el ajuste propuesto

g) Ajuste de inrush 2do Armónico.

Para evitar disparos indeseados ante corrientes transitorias de energización del transformador, se habilitara la función de bloqueo de la segunda armónica a 15%. Sobre el valor de la fundamental.

En la figura 3.11, se muestra las corrientes de la fase A en el devanado de alta del transformador en la energización en el mismo tiempo pero para diferentes valores de flujo remanente, y como se puede apreciar cuanto más es el flujo residual mayor es la corriente de inserción y por lo tanto mayor corriente diferencial de segunda armónica en un primer

ciclo y de ahí decae a cero y se va restableciendo con el tiempo. El ajuste del tiempo para cross blocking 2da Harm., se toma el peor caso es cuando el flujo residual es 1 p.u. teórico y según las simulaciones realizadas y que se muestra en la figura 3.11. Después de 7 ciclos se restablece el porcentaje de la segunda armónica.

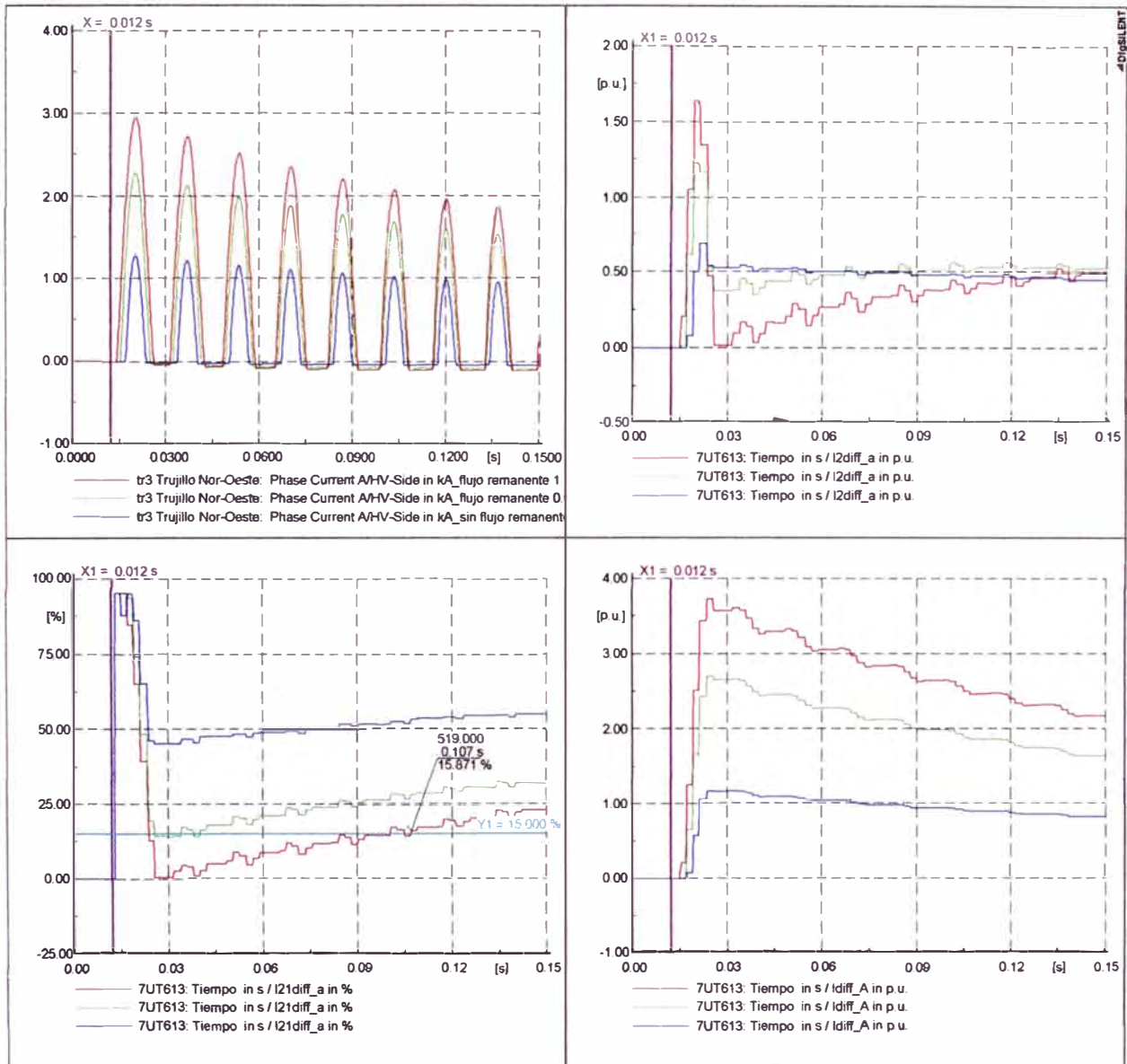


Fig. 3.11 Corrientes del lado de alta de la fase A, corriente diferencial para la primera y segunda armónica calculado por relé 7UT613, en la energización del transformador

h) Ajuste de la protección falla a tierra restringida.

El ajuste para la protección de falla a tierra restringida, esta dado por dos parámetros las cuales son los siguientes:

- IREF>, este ajuste representa la corriente diferencial pickup de arranque de la protección falla a tierra restringida.
- SLOPE, es la pendiente ajustable, tal como se muestra en la figura 3.12.

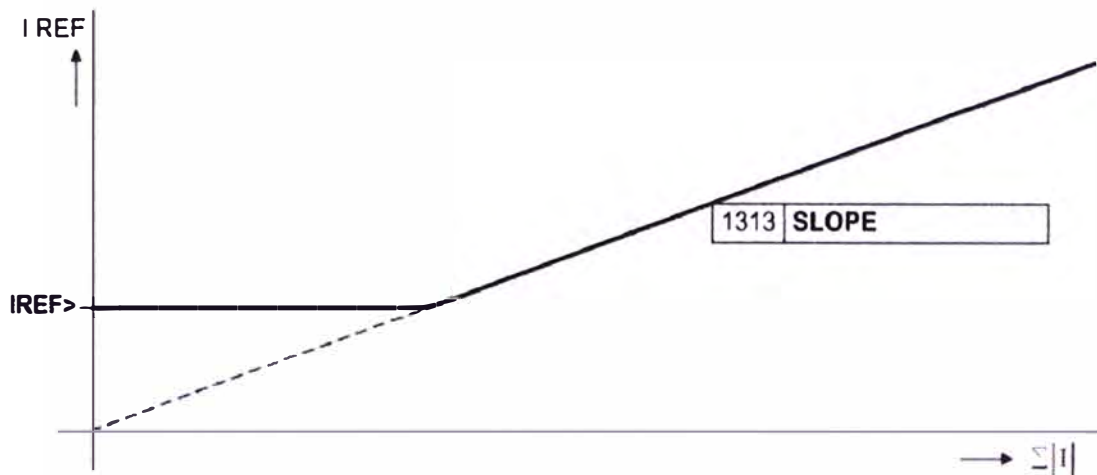


Fig. 3.12 Características de operación de la protección falla a tierra restringida

En el caso del transformador de la subestación de Trujillo Nor-Oeste, tiene dos devanados con conexión estrella aterrada y por lo tanto se recomienda tener la función de falla a tierra restringida para cada lado, los cuales detectarían fallas a tierra de alta impedancia ya que no serán detectadas por la protección diferencial 87T.

Los ajustes de la protección de falla a tierra restringida se realizarán de la siguiente manera:

Para el devanado de 138 kV:

- Se calcula la corriente nominal del devanado de alta mediante la ecuación (3.18).

$$I_{HV} = \frac{S_{nHV}}{V_{HV} \cdot \sqrt{3}} \quad (3.18)$$

- Se calcula $I_{REF>}$ mediante la ecuación (3.19).

$$I_{REF>} = 0.05 \cdot \frac{I_{CTm\acute{a}x}}{I_{HV}} \quad (3.19)$$

Donde:

$I_{CTm\acute{a}x}$, está dado por el mayor valor de la corriente primaria del transformador de corriente entre las fases y el neutro.

- La pendiente (SLOPE), se calcula con la fórmula (3.20).

$$SLOPE = \frac{I_{REF>}}{I_{resREF}} \quad (3.20)$$

La recomendación del fabricante para el ajuste de I_{resREF} es de 3 p.u., ya que cuando el transformador opere a la potencia nominal la corriente de restricción de la protección de falla a tierra restringida será la suma de módulos de las corrientes de las tres fases ($|I_A| + |I_B| + |I_C|$) y esto es 3p.u.

En la tabla 3.6, se muestra el ajuste para la función falla a tierra restringida para el lado de 138 kV.

Tabla N° 3.6 Ajuste para la función de falla a tierra restringida para el lado de 138 kV

Recomendación del fabricante				
IHV	IREF>	SLOPE	IREF>	SLOPE
251.02	0.06	0.02	0.1	0.03

Para el devanado de 23.8 kV:

- Se calcula la corriente nominal del devanado de media mediante la ecuación (3.21).

$$I_{MV} = \frac{S_{nMV}}{V_{MV} * \sqrt{3}} \quad (3.21)$$

- Se calcula IREF> mediante la ecuación (3.22).

$$IREF> = 0.05 * \frac{I_{CTm\acute{a}x}}{I_{MV}} \quad (3.22)$$

Donde:

$I_{CTm\acute{a}x}$, esta dado por el mayor valor de la corriente primaria del transformador de corriente entre las fases y el neutro.

- La pendiente (SLOPE), se calcula con la formula (3.23).

$$SLOPE = \frac{IREF>}{I_{resREF}} \quad (3.23)$$

En la tabla 3.7, se muestra el ajuste para la función falla a tierra restringida para el lado de 23.8 kV.

Tabla N° 3.7 Ajuste para la función de falla a tierra restringida para el lado de 23.8 kV

Recomendación del fabricante				
IMV	IREF>	SLOPE	IREF>	SLOPE
582.20	0.03	0.01	0.1	0.03

CAPITULO IV

MODELAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN ESTUDIO

4.1 Introducción

En el presente capítulo se desarrolla el modelamiento de los dos elementos principales del sistema eléctrico en estudio, ya que son involucrados en las simulaciones los cuales son el transformador de potencia y los transformadores de corriente. Cuando los transformadores de corriente operan en la zona no lineal, por ejemplo ante fallas externas los valores secundarios no son reflejados exactamente de los valores primarios, ocasionando una corriente diferencial falsa lo cual puede provocar la operación indeseada del relé diferencial, y es por ello que es importante hacer un análisis en fenómenos electromagnéticos del sistema eléctricos en estudio.

4.2 Modelamiento del transformador de potencia de la subestación eléctrica Trujillo Nor-Oeste 138/22.9/10.5 kV

Su modelamiento depende del análisis que se realice ya que su modelo completo es muy complicado de realizar ya que requiere que sea representada cada vuelta del devanado, con todos los acoplamientos mutuos, inductivos y capacitivos que se producen entre cada par de vueltas del bobinado.

4.2.1 Modelo del transformador en estado estable

Para hacer un análisis en estado estable, el modelo del transformador es más sencillo y solo es representado como se muestra en la figura 4.1, el cual está representado por impedancias del lado primario y secundario, y para ello se necesita las pruebas de cortocircuito y de vacío del transformador, para calcular las resistencias e impedancias. En el anexo A se encuentra los datos de las pruebas de cortocircuito y vacío.

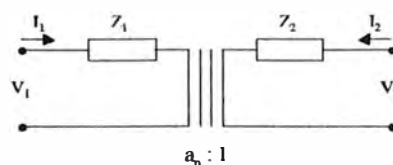


Fig. N° 4.1 Modelo del transformador de potencia

Cliente: HIDRANDINA	Máquina Ensayada:	N° de Serie: 200739
Dirección del Cliente:	Potencia Nominal :	Transformador Trifásico
Av. Camino Real N° 348	Tensión:	50/60 – 20/24 – 30/36 MVA
Edificio El Pilar piso 13.	Intensidad Nominal:	138 ± 10 x 1% / 23.8 / 10.5 kV
San Isidro - Lima.	BIL:	251.02 / 582.2 / 1979.5 A
	Conexión:	550 / 125 / 75 kV
	Grupo de Conexión:	Yo / yo / d
	Frecuencia:	YNyn0d11
	Refrigeración:	60 Hz
	Calentamiento Máx. del Aceite:	ONAN / ONAF
	Calentamiento Medio del Cobre:	60 °C
		65 °C

Fig. N° 4.2 Datos de placa del transformador de potencia de la S.E. Trujillo Nor-Oeste

4.2.2 Modelo del transformador para energización

Un estudio de energización, se debe de modelar el núcleo magnético del transformador de potencia adecuadamente ya que el transformador opera en la zona de saturación el cual se dice que esta sobreexcitado, en la práctica no es posible aplicar voltajes superiores al 110% de la tensión nominal en el devanado de la prueba del transformador durante las pruebas de vacío debido al riesgo de daño, es por ello que los fabricantes realizan mediciones en un rango típico de 90% - 110% de la tensión nominal, obteniéndose apenas cinco puntos de la curva de saturación.

Una curva de saturación con una tensión del 110% no representa la saturación extrema del transformador que se puede producir en la energización, y es por ello que se usara el programa ATP, el cual cuenta con un modelo “HIBRIDO” de transformador de potencia que con los datos del transformador y las mediciones de los cinco punto de la prueba de vacío empieza a iterar y comparar hasta que de un mejor ajuste.

a) Prueba de Vacío del Transformador de Potencia de la S.E. Trujillo Nor-Oeste

En la tabla 4.1, se muestra la prueba de vacío realizada al transformador de potencia, el cual fue proporcionado por Hidrandina.

Tabla N° 4.1 Prueba de vacío del transformador de potencia de la S.E. Trujillo Nor-Oeste

PROTOCOLO DE ENSAYOS										
Pérdidas e Intensidad de Vacío										
Terminales Alimentados:			3U-3V-3W			Posición:			-	
1° Terminales Abiertos:			2U-2V-2W-2N			Posición:			-	
2° Terminales Abiertos:			1U-1V-1W-1N			Posición:			11	
Potencia Base:			30 MVA			Potencia Nominal:			30 MVA	
Temperatura Media del Aceite:			27.7 °C			Frecuencia:			60 Hz	
Valores Medidos							Pérdidas ¹ (kW)	Intensidad ²	Valores Garantizados	
V	1.1IxV _{medida} (kV)	V _{base} (kV)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	Pérdidas (kW)			Pérdidas (kW)	Intensidad
110 %	11.54	12.37	6.508	6.202	5.972	29.94	27.79	0.38 %	-	-
105 %	11.01	11.44	3.446	3.062	2.944	24.05	23.11	0.19 %	-	-
100 %	10.50	10.71	2.105	1.688	1.689	20.09	19.68	0.11 %	25.30	1.00 %
95 %	9.966	10.06	1.511	1.103	1.175	17.24	17.08	0.077 %	-	-
90 %	9.442	9.473	1.245	0.8455	0.9637	15.01	14.96	0.062 %	-	-

En la figura 4.3, se muestra la curva de saturación calculado por el programa ATP, en valores de flujo magnético y corriente de excitación en valores picos.

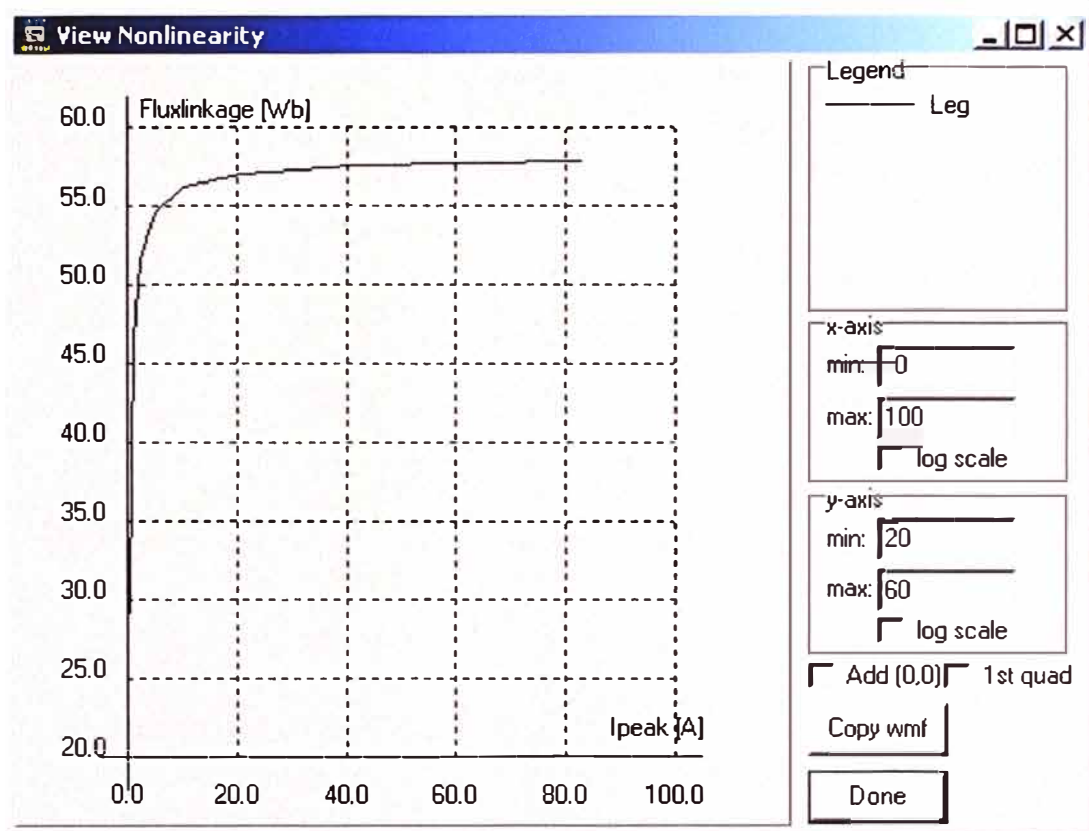


Fig. 4.3 Curva de saturación del transformador de potencia de la S.E. Trujillo Nor-Oeste
Los valores que se ingresa al programa DigSILENT son valores de flujo y corriente picos en por unidad, el cual se muestra en la tabla 4.2

Tabla N° 4.2 Flujo magnético y corriente de excitación calculado por ATP DRAW

Potencia base (MVA)	30	Voltaje base (V)	10500
Flujo (p.u.)	I0 (pu)	Flujo (Wb)	I0 (Peak)
0.6625	0.000438	29.15	0.5896
0.8813	0.000679	38.78	0.9139
1.0556	0.001160	46.45	1.5625
1.1715	0.002123	51.55	2.8598
1.2396	0.004050	54.54	5.4543
1.2768	0.007902	56.18	10.6434
1.2965	0.015608	57.05	21.0215
1.3070	0.030821	57.51	41.5125
1.3133	0.061643	57.79	83.0251

En la figura 4.4, se muestra la curva de saturación del transformador de potencia en valores por unidad.

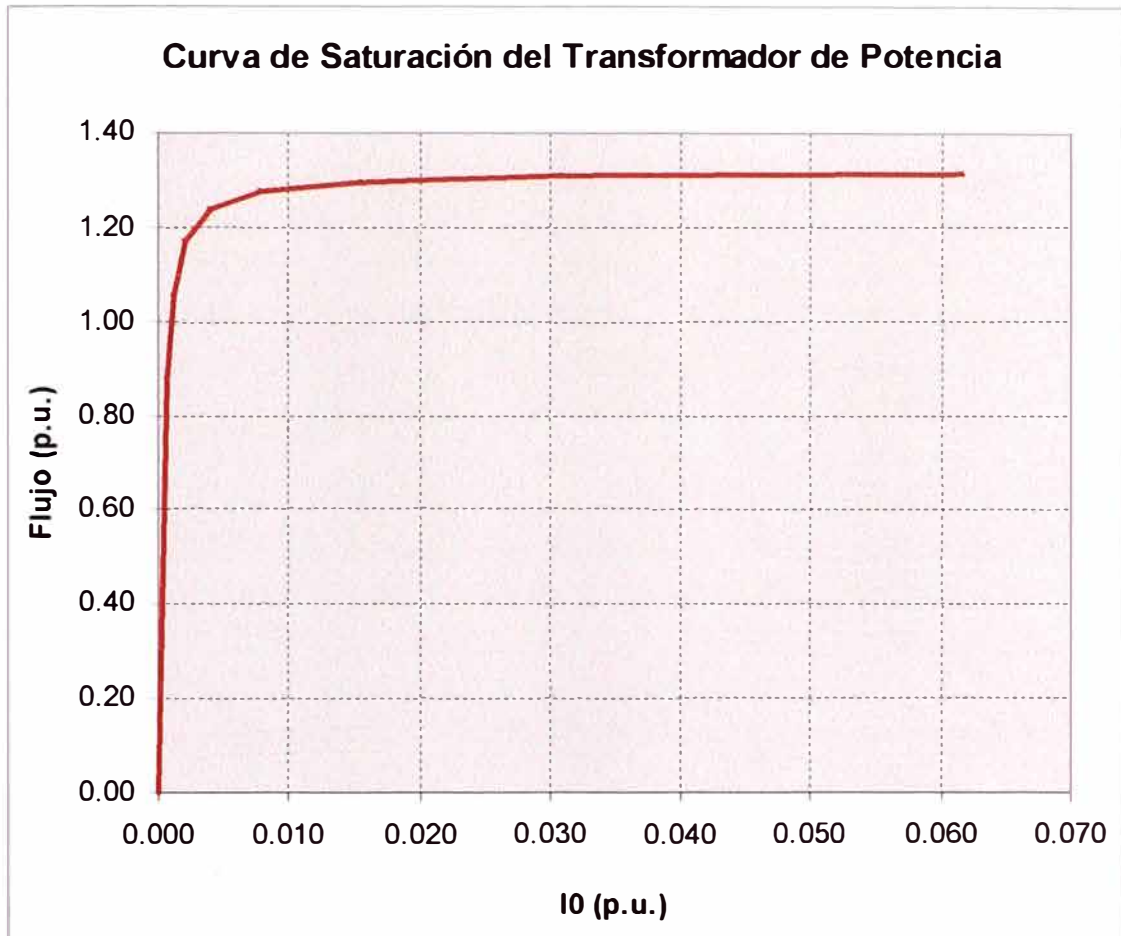


Fig. 4.4 Curva de saturación del transformador de potencia en valores por unidad

El aumento de la corriente durante la energización es debida a la saturación del núcleo magnético en el transformador de potencia. Cuando el flujo total en el núcleo sobrepasa el valor de saturación, el flujo restante es transportado a través del aire; en estas condiciones el núcleo se comporta como un núcleo de aire y la inductancia shunt equivalente vista por la fuente es mucho menor, ocasionando un aumento de la corriente.

La magnitud de la corriente de energización va a depender de los siguientes factores:

- El tiempo de cierre del interruptor.
- El valor de la tensión.
- Material usado para el núcleo del transformador.
- Flujo remanente en el núcleo magnético en el transformador de potencia.
- Tamaño del sistema de potencia.

Para poder entender las causas de las corrientes elevada en una energización, analizaremos al transformador de potencia de la siguiente manera:

a) Caso 1: Energización por primera vez (sin flujo remanente) y la tensión pasa por cero y en aumento

En operación normal el flujo magnético en el núcleo del transformador de potencia está desfasada 90° con respecto a la tensión y en atraso.

Se energizara el transformador en la condición mas critica ($t= 12.107 \text{ ms}$), en donde la tensión pasa por cero y en aumento y como el flujo magnético está desfasada 90° con respecto de la tensión tendrá un valor máximo negativo, dicho flujo parte de cero y siguiendo la onda senoidal (onda senoidal color rojo), tal como se muestra en la figura 4.5.

Como se puede observar el flujo magnético se desplaza hacia arriba en vez de seguir la onda senoidal punteado color rosado, este desplazamiento es lo que origina saturación del núcleo, el flujo resultante en el núcleo tendrá un valor máximo aproximado de dos veces ϕ_{max} inicial y a su vez este incremento origina una corriente de excitación elevada.

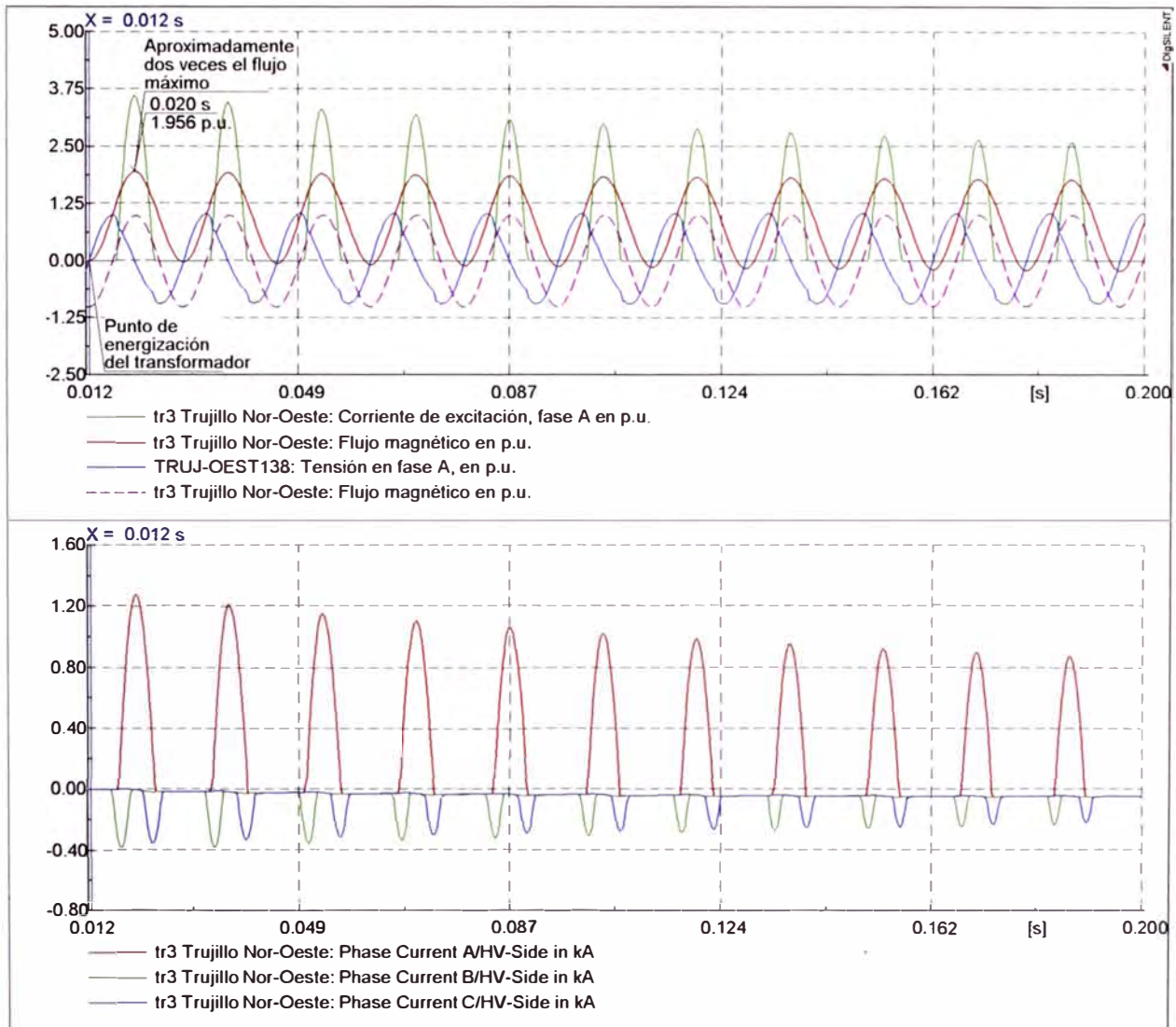


Fig. 4.5 Energización del transformador en el instante en que el flujo es máximo negativo y la tensión pasa por cero y en aumento, sin flujo residual

b) **Caso 2: Energización con flujo remanente máximo y la tensión pasa por cero y en aumento**

En la figura 4.6, se muestra la energización del transformador con flujo residual máximo positivo teórico (1 p.u.), ya que en la realidad es menor y el tiempo de cierre del interruptor es 12.107 ms, en ese instante la tensión pasa por cero y en aumento y el flujo magnético tendrá un valor máximo negativo.

El flujo resultante parte del flujo residual y siguiendo la onda senoidal (onda senoidal color rojo), tal como se muestra en la figura 4.6, este desplazamiento del flujo es lo que origina mayor saturación del núcleo que en el caso de energización sin flujo residual, el flujo resultante en el núcleo tendrá un valor máximo aproximado de tres veces ϕ_{max} inicial y a su vez este incremento origina una corriente de excitación más elevada.

Este es el caso donde se origina mayor corriente de inserción, más adelante se verá que el porcentaje de la segunda armónica será menor y por lo tanto, en este escenario se debe analizar el ajuste del porcentaje de segunda armónica, el cual es usado por los relés diferenciales para el bloquear la operación del relé.

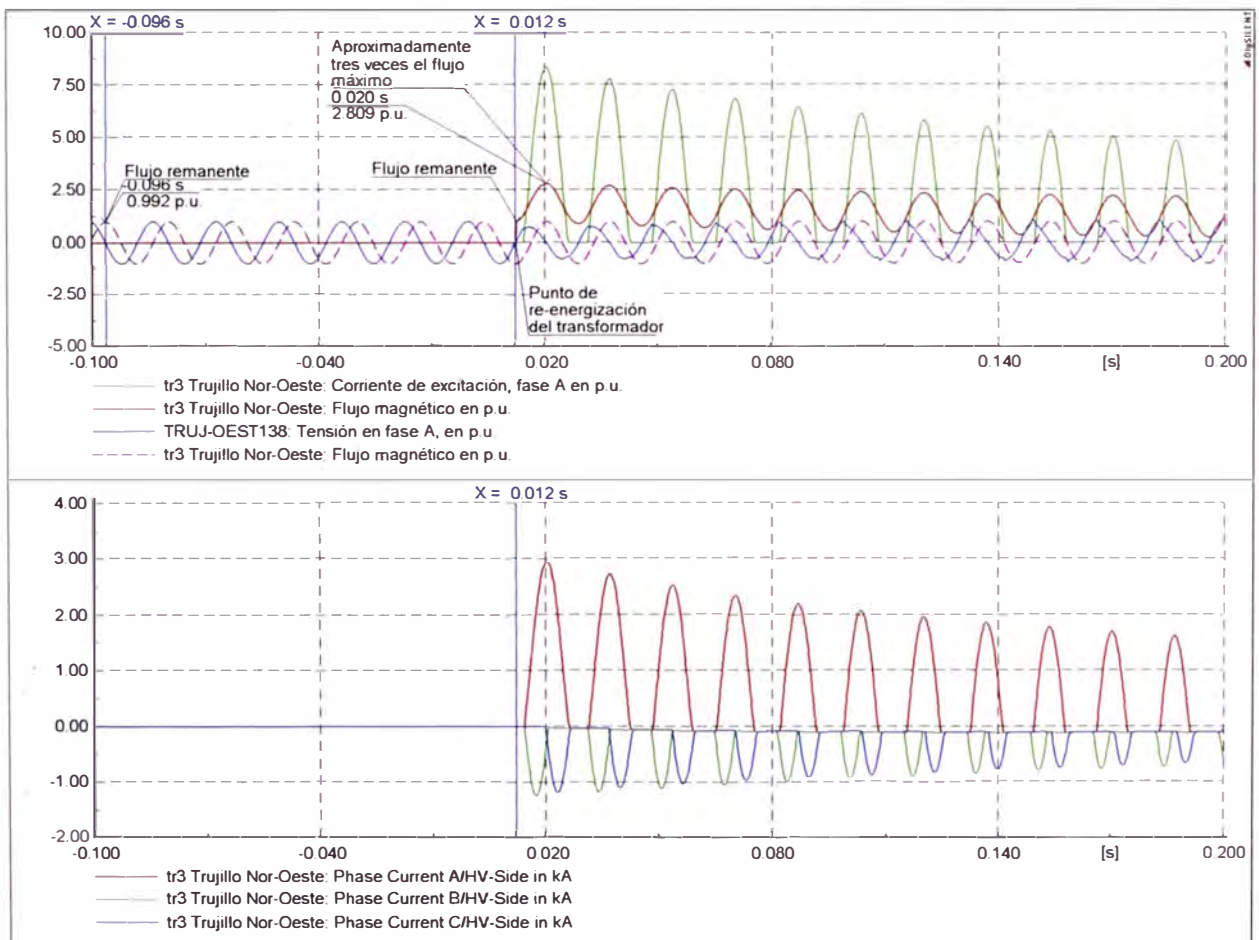


Fig. 4.6 Energización del transformador en el instante en que el flujo es máximo negativo y la tensión pasa por cero y en aumento, con flujo máximo residual

c) **Caso 3: Energización por primera vez (sin flujo remanente) y la tensión pasa por cero y en disminución**

Se energizara el transformador de potencia en la condición ($t= 4\text{ms}$), en donde la tensión pasa por cero y en disminución y como el flujo magnético está desfasada 90° con respecto de la tensión tendrá un valor máximo positivo, dicho flujo parte de cero y siguiendo la onda senoidal (onda senoidal color rojo), tal como se muestra en la figura 4.7.

Como se puede observar el flujo magnético se desplaza hacia abajo en vez de seguir la onda senoidal punteado color rosado, este desplazamiento es lo que origina saturación del núcleo, el flujo resultante en el núcleo tendrá un valor máximo negativo aproximado de dos veces ϕ_{max} inicial y a su vez este incremento origina una corriente de excitación elevada.

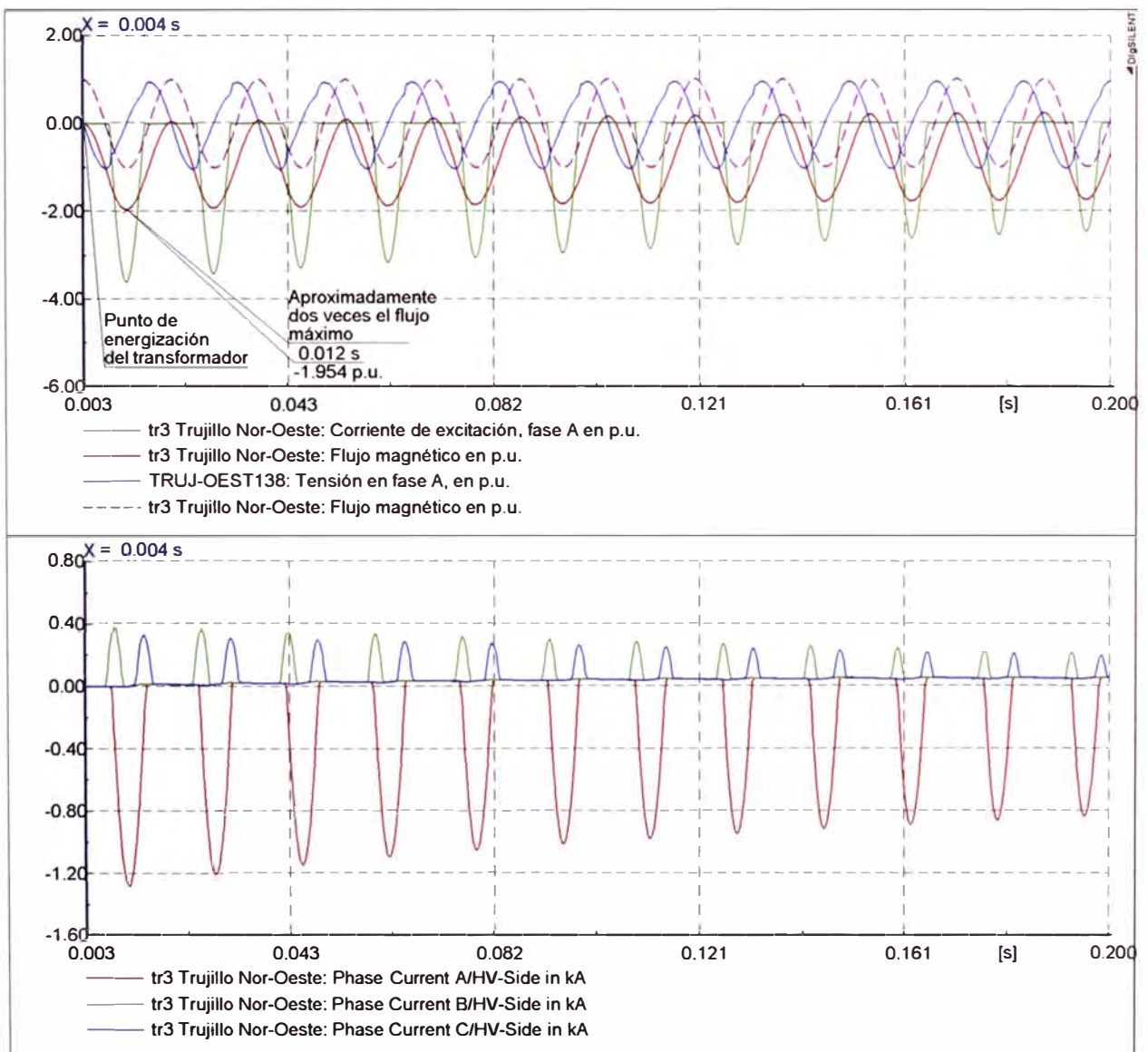


Fig. 4.7 Energización del transformador en el instante en que el flujo es máximo positivo y la tensión pasa por cero y en disminución, sin flujo residual

d) Caso 4: Energización con flujo remanente máximo y la tensión pasa por cero y en disminución

En la figura 4.8, se muestra la energización del transformador con flujo residual máximo positivo teórico (1 p.u.), ya que en la realidad es menor y el tiempo de cierre del interruptor es 4 ms, en ese instante la tensión pasa por cero y en disminución y el flujo magnético tendrá un valor máximo positivo.

El flujo resultante parte del flujo residual y siguiendo la onda senoidal (onda senoidal color rojo), tal como se muestra en la figura 4.8, como el flujo residual es positivo máximo 1 p.u. y en ese instante el flujo es máximo y positivo entonces no habrá desplazamiento del flujo y por lo tanto no habrá incremento en la corriente como se puede observar en la figura 4.8.

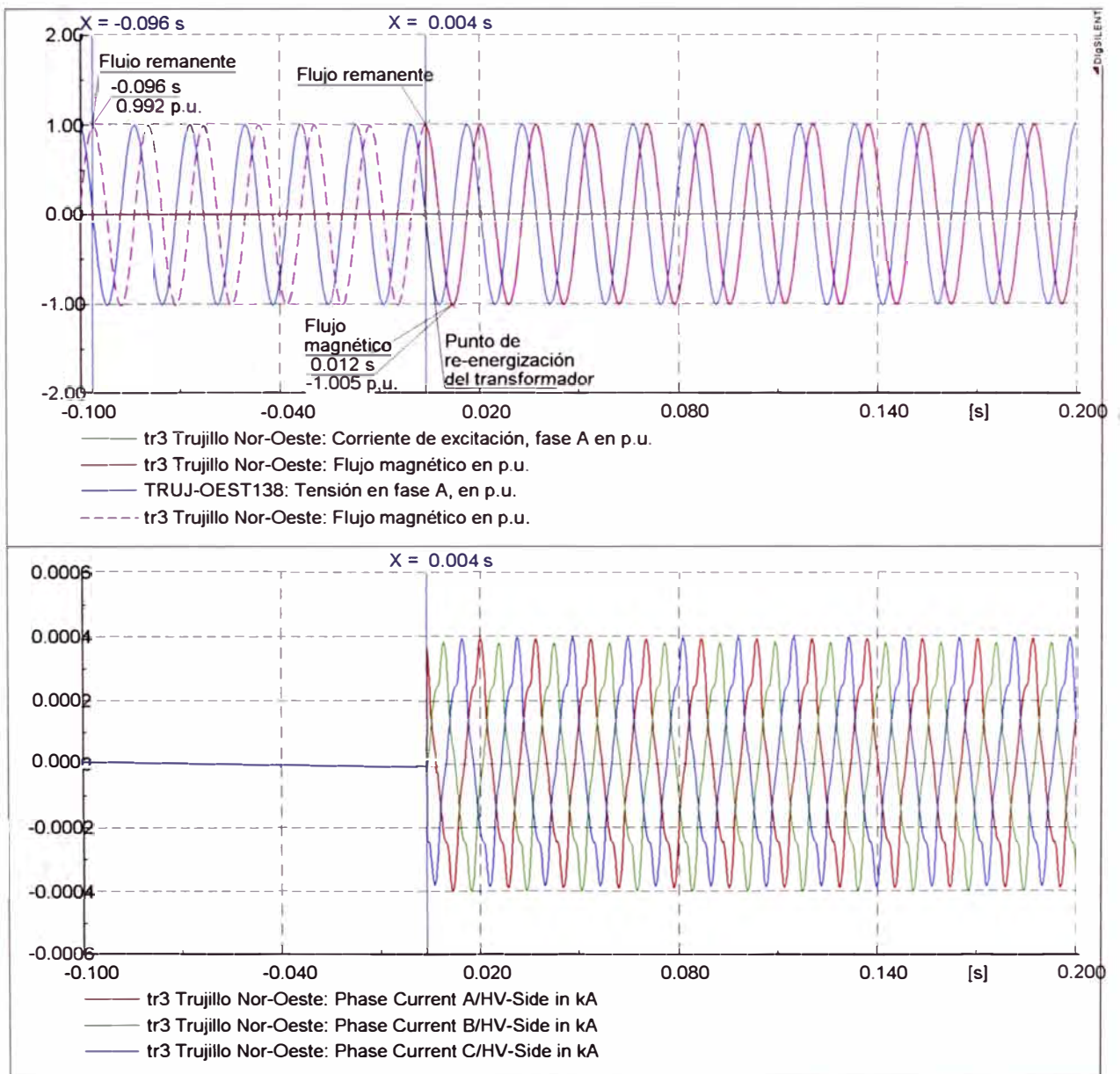


Fig. 4.8 Energización del transformador en el instante en que el flujo es máximo positivo y la tensión pasa por cero y en disminución, con flujo máximo residual

e) **Caso 5: Energización con flujo remanente de 0.26 p.u. y la tensión pasa por cero y en disminución**

En la figura 4.9, se muestra la energización del transformador con flujo residual positivo de 0.26 p.u., y el tiempo de cierre del interruptor es 4 ms, en ese instante la tensión pasa por cero y en disminución y el flujo magnético tendrá un valor máximo positivo.

El flujo resultante parte del flujo residual y siguiendo la onda senoidal (onda senoidal color rojo), tal como se muestra en la figura 4.9, este desplazamiento del flujo es lo que origina saturación del núcleo que en el caso de energización sin flujo residual, el flujo resultante en el núcleo tendrá un menor valor que en el caso 2, ya que el desplazamiento es hacia abajo y este hecho en vez de aumentar la corriente de inserción lo disminuye. Mientras más flujo remanente positivo será menor la corriente de inserción.

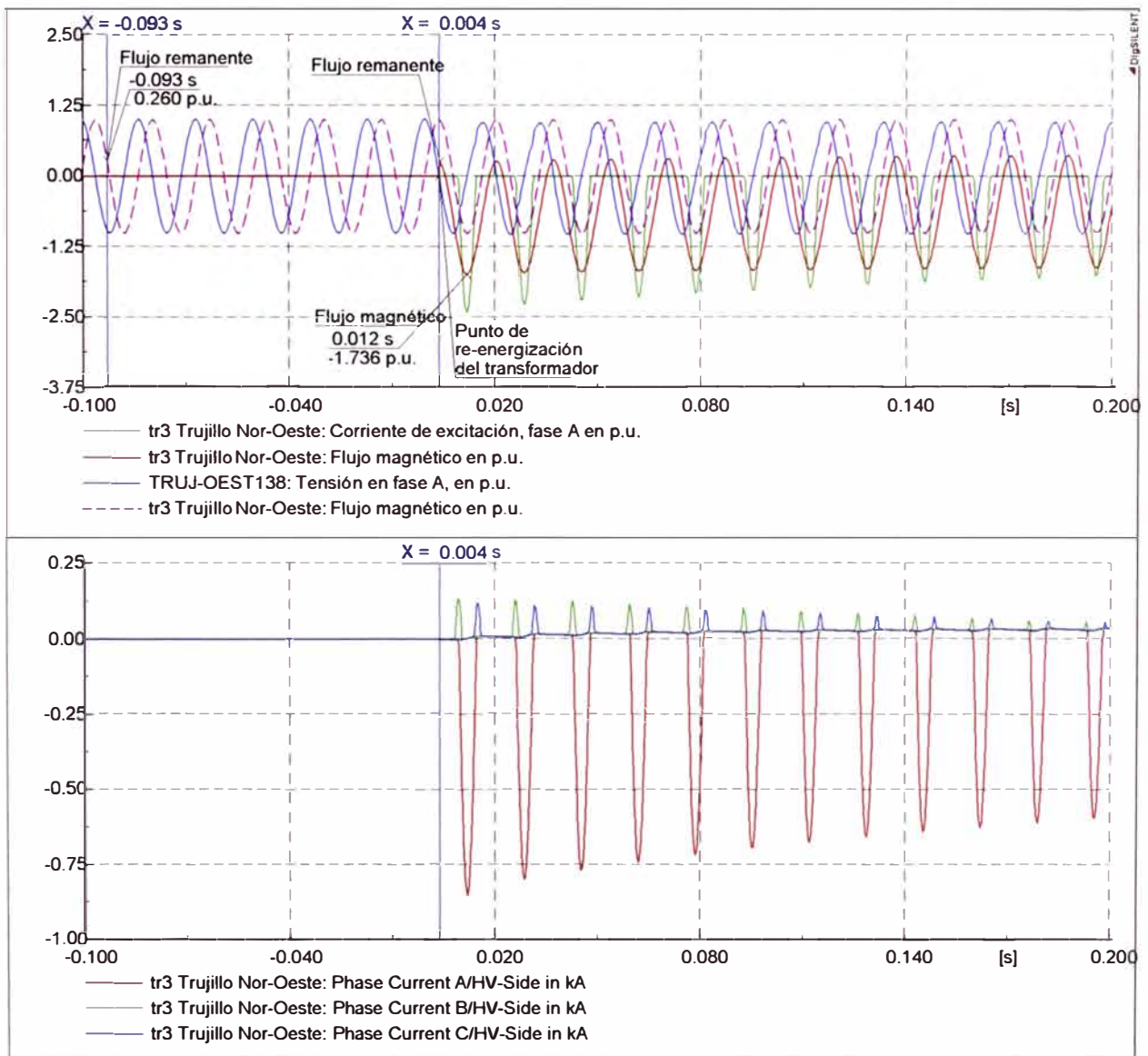


Fig. 4.9 Energización del transformador con flujo residual dc 0.26 p.u. y la tensión pasa por cero y en disminución, con flujo máximo residual

4.3 Modelamiento de los transformadores de corriente

Con la finalidad de obtener valores más reales de corrientes secundarias medidos por los transformadores de corriente, se realizó el modelamiento de los transformadores de corriente asociado al relé diferencial.

Para el modelamiento de los transformadores de corriente se utilizó las pruebas FAT, las cuales se muestra en el anexo B:

En la tabla 4.3 se muestran los datos ingresados al software DIGSILENT para el modelamiento de los transformadores de corriente, las cuales fueron obtenidas a partir de las pruebas FAT.

Tabla N° 4.3 Datos de los transformadores de corriente

	LADO DE 138 KV	LADO DE 23.8 KV	LADO DE 10.5 KV
Relación	300/1 A	750/1 A	3150/5 A
Burden Nominal	20 VA	20 VA	30 VA
Precisión	5P20	5P20	5P20
Burden Carga	0.78 VA	0.93 VA	1.11 VA
Resistencia	1 ohm	1 ohm	0.6 ohm
Vsat.	768.89 V	492.17 V	1185.22 V
Iext	0.002 p.u.	0.001 p.u.	0.00001 p.u.

CAPITULO V

SIMULACIONES DEL RELÉ DIFERENCIAL 7UT613 DEL TRANSFORMADOR DE LA S.E. TRUJILLO NOR-OESTE 138/23.8/10.5 KV

5.1 Introducción

En el presente capítulo se realizaron simulaciones en el software DIgSILENT PowerFactory, para diferentes estados del sistema como energizaciones, fallas externas e internas a la zona de protección del relé diferencial, falla externa con saturación de un transformador de corriente y operación normal del sistema con cambiadores de tap automático del transformador de potencia.

Para poder visualizar los cálculos que realiza el relé diferencial 7UT613, se implementó su algoritmo mediante el lenguaje de programación DPL (DIgSILENT Programming Language), que tiene incluido el software DIgSILENT PowerFactory, el cual no se entrará a detalle de la elaboración de dicho DPL.

5.2 Simulaciones

Los escenarios a analizar se detallan a continuación:

- a) Energización del transformador de potencia con tap central y sin flujo remanente.
- b) Energización del transformador de potencia con tap central y con flujo remanente.
- c) Estado estable.
- d) Falla externa a la zona de protección del relé diferencial.
- e) Falla interna a la zona de protección del relé diferencial.
- f) Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga.
- g) Falla interna a tierra en el lado de media tensión con resistencia de 21 ohm.
- h) Falla externa a tierra en el lado de alta tensión con resistencia de 700ohm.

Para las simulaciones de transitorios electromagnéticos se buscó reducir la red, debido a la complejidad y tamaño del sistema eléctrico nacional (SEIN) modelado por COES, se vio la necesidad de realizar una reducción matemática del sistema para que de esta manera el software pueda realizar las simulaciones transitorias requeridas. En este análisis se realizó la reducción del SEIN de la Zona Sur y para ello se utilizó la herramienta de reducción de

redes disponible en el software DlgSILENT PowerFactory 14.0.525, en el cual se adopto un equivalente de tipo Ward Extendido, en la figura 5.1 solo se muestra el área de influencia a la subestación Trujillo Norte.

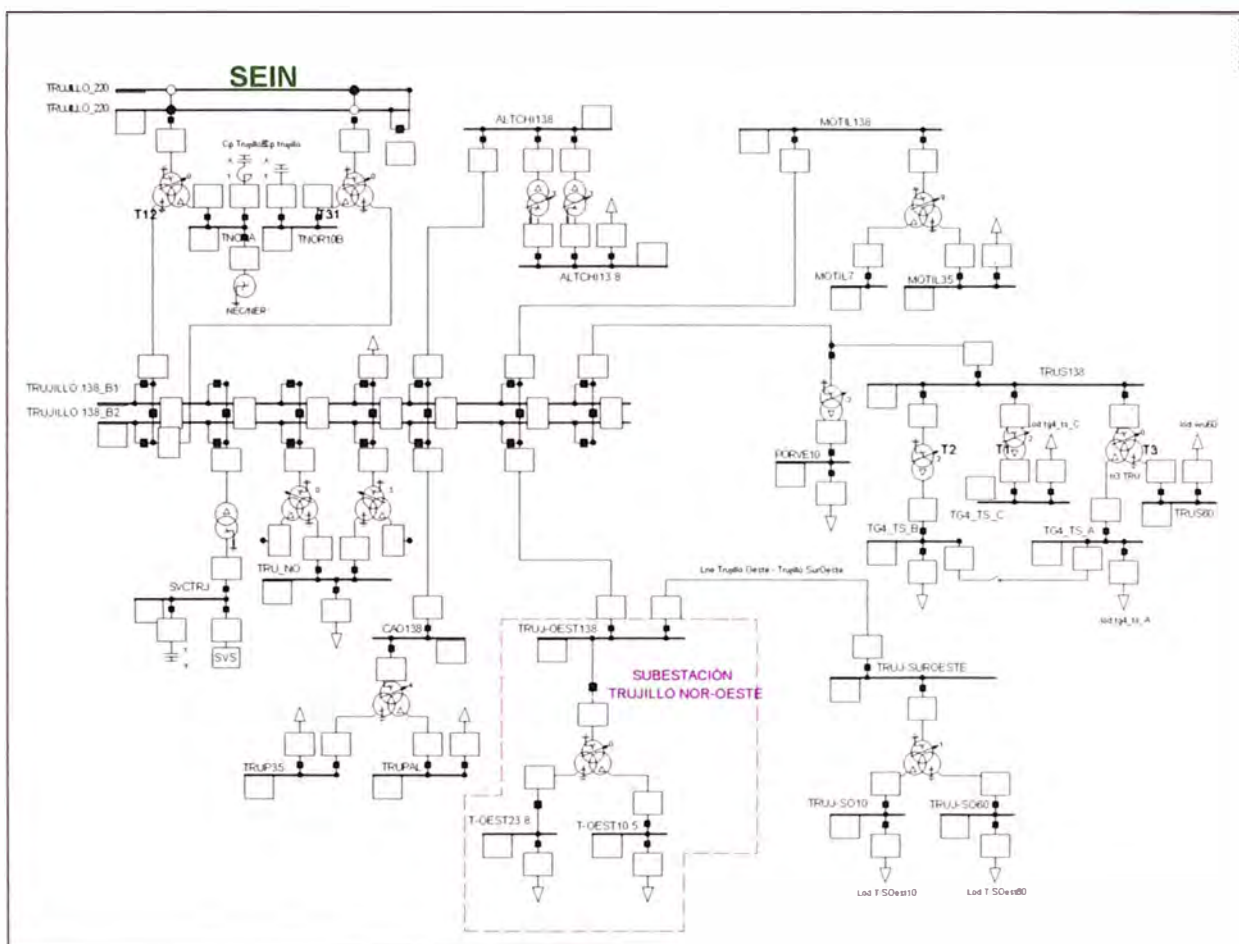


Fig. 5.1 Diagrama unifilar del sistema eléctrico en estudio.

5.2.1 Energización del transformador con tap central y sin flujo remanente

La energización del transformador se realiza en el caso más desfavorable, esto es cuando la tensión de una de las fases pasa por cero y en aumento. En la figura 5.2, se muestra el monitoreo de las corrientes de línea tanto del primario como el secundario y terciario que llegan al relé diferencial, después de pasar por los transformadores de corriente. Se observa que a pesar de que el transformador no tiene carga en el momento de la energización, se presenta una corriente en el devanado primario, llamada corriente de inserción, mientras que en el secundario y terciario las corrientes son ceros, puesto que el transformador se encuentra en vacío.

Las corrientes que se muestran en la figura 5.3, se procesan mediante un escrito DPL (DlgSILENT Programming Language), el cual fue implementado con el algoritmo del relé diferencial 7UT613 de marca SIEMENS, y para así poder obtener las corrientes diferenciales y restricción calculadas por dicho relé.

En la figura 5.3, también se muestra las corrientes diferenciales porcentuales de la componente de la segunda armónica de cada fase, el cual es empleado por el relé para bloquear en la energización, ya que la corriente diferencial entra a la zona de operación del relé como se muestra en la figura 5.3, como se puede observar todas las fases pasan el 15% del ajuste de la segunda armónica y por lo tanto el relé no opera.

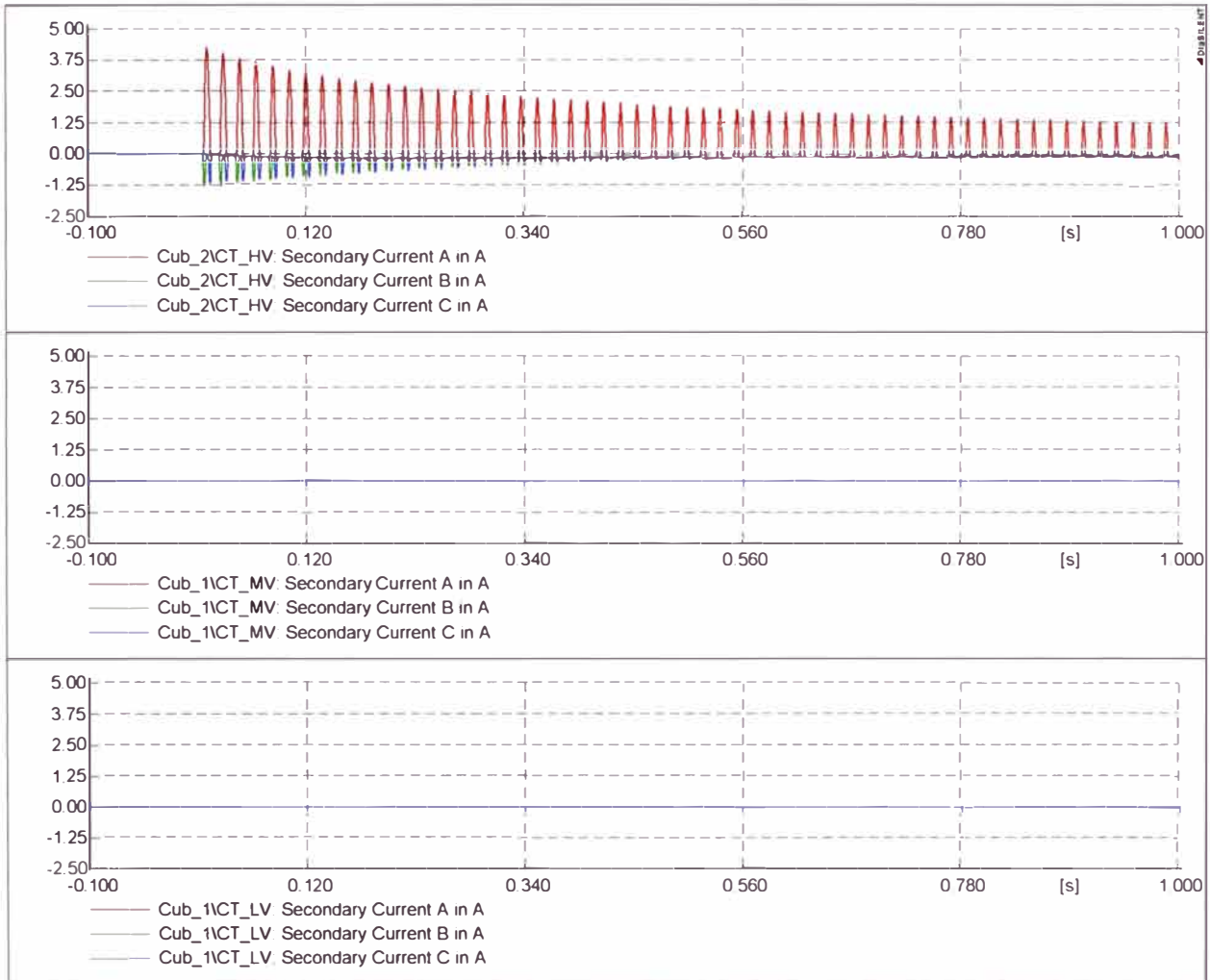


Fig. 5.2 Corrientes del transformador que llegan al relé diferencial.

Para poder analizar las caídas de tensiones que se producen en la energización del transformador de potencia, se implemento un programa DPL, y de esa manera poder mostrar en valores rms y en por unidad para que sea más visible la caída de tensiones que se producen.

En la figura 5.4, se muestra las tensiones de fases en valores rms y en por unidad de la barra Trujillo Nor-Oeste 138 kV, en la cual se puede observar la caída de tensión que se presenta en la fase A es mayor que en las fases B y C, y esto se debe a la corriente de inserción es mayor en dicha fase, pero conforme la corriente de inserción cae en el tiempo esta caída de tensión va disminuyendo.

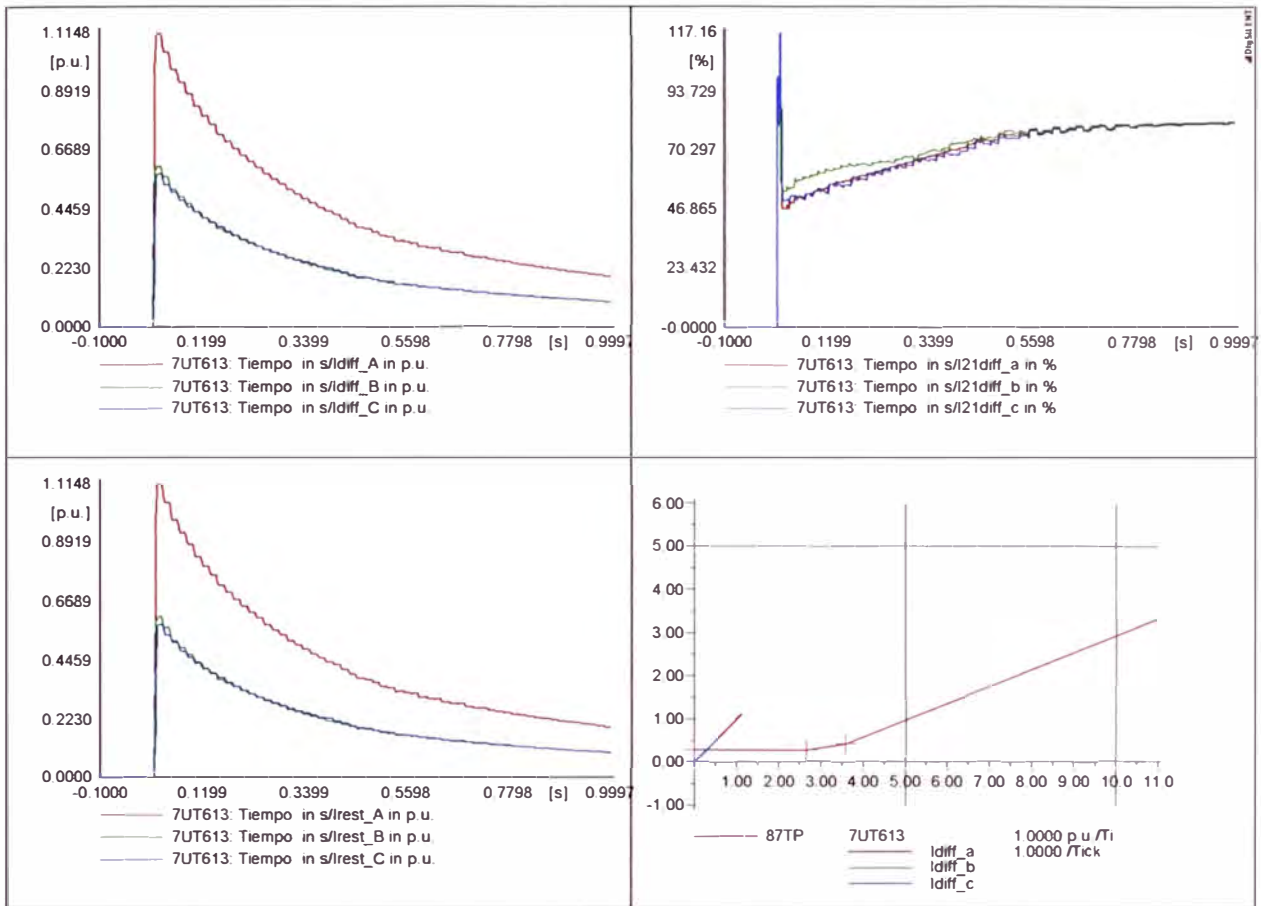


Fig. 5.3 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé.

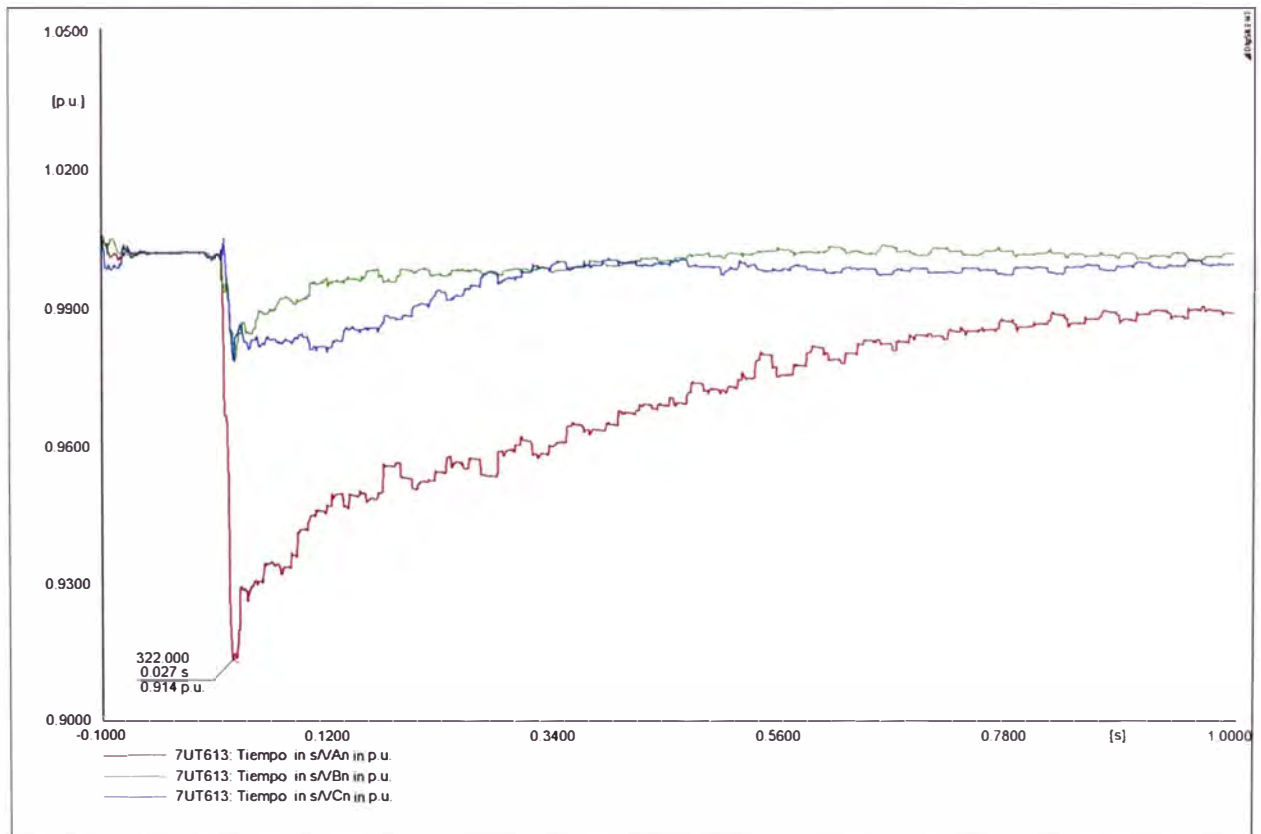


Fig. 5.4 Tensiones de fases rms en por unidad, en la barra Trujillo Nor-Oeste 138 kV.

5.2.2 Energización del transformador con tap central y con flujo remanente

En este caso se energizo el transformador bajo las mismas condiciones que en el caso anterior excepto en flujo residual se considera máximo teórico de 1 p.u.

En la figura 5.5, se muestra el monitoreo de las corrientes de línea tanto del primario como del secundario y terciario que llegan al relé diferencial, después de pasar por los TC's. se observa que este caso tiene mayor corriente inserción que en el caso anterior y como ya se explico en el capítulo IV esto se debe al flujo residual.

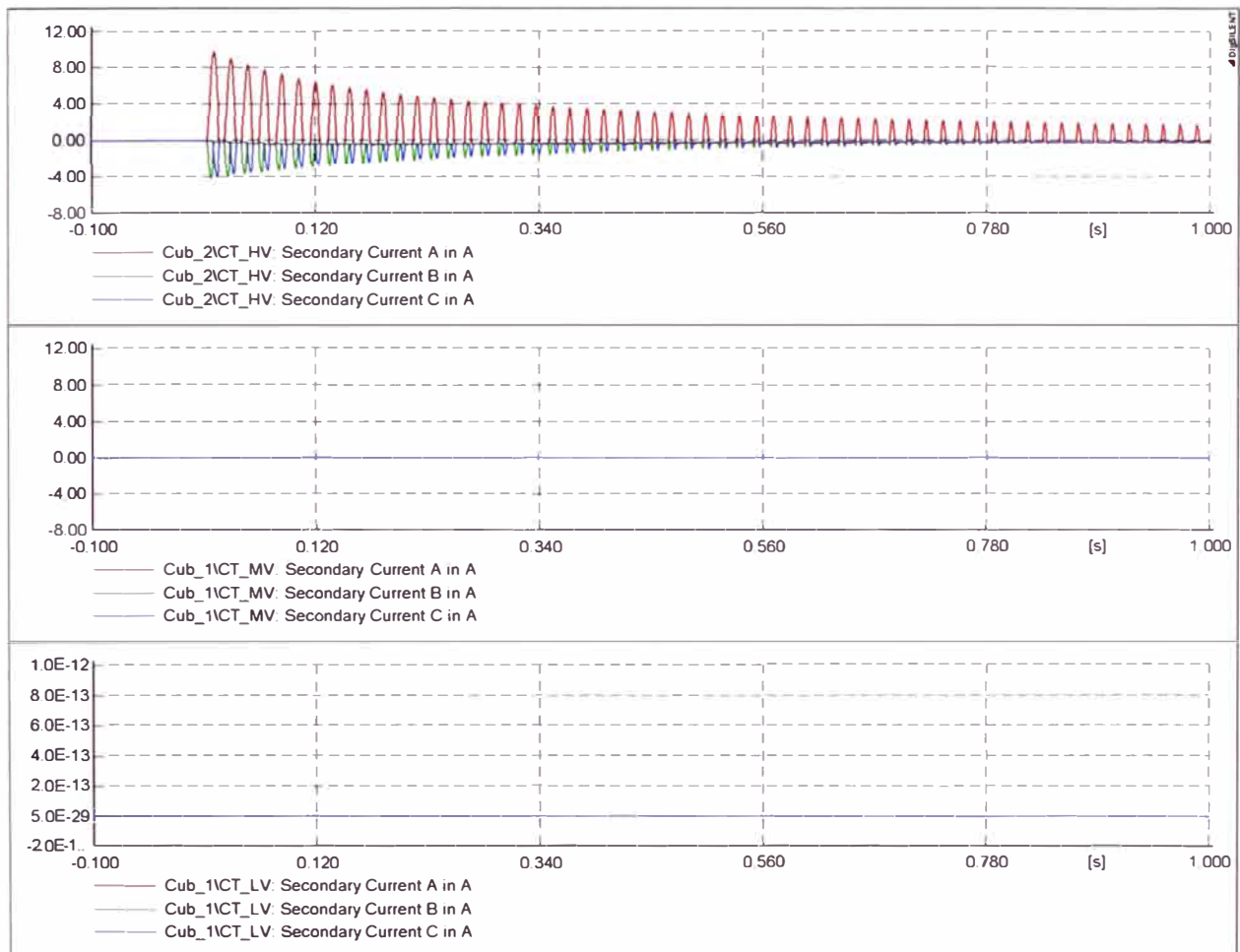


Fig. 5.5 Corrientes del transformador que llegan al relé diferencial.

En la figura 5.6, también se muestra las corrientes diferenciales porcentuales de la componente de la segunda armónica de cada fase, el cual es empleado por el relé para bloquear en la energización, ya que la corriente diferencial entra a la zona de operación del relé como se muestra en la figura 5.6, como se puede observar solo la fase A no pasa el 15% del ajuste de la segunda armónica pero las otras dos si pasan ese ajuste y como ya se explico en el capítulo II si solo una fase pasa el 15% del ajuste el relé mantiene bloqueado a todas las fases por un tiempo de ajuste de cross blocking que se recomendó que sea de 7 ciclos y así evitar que el relé opere.

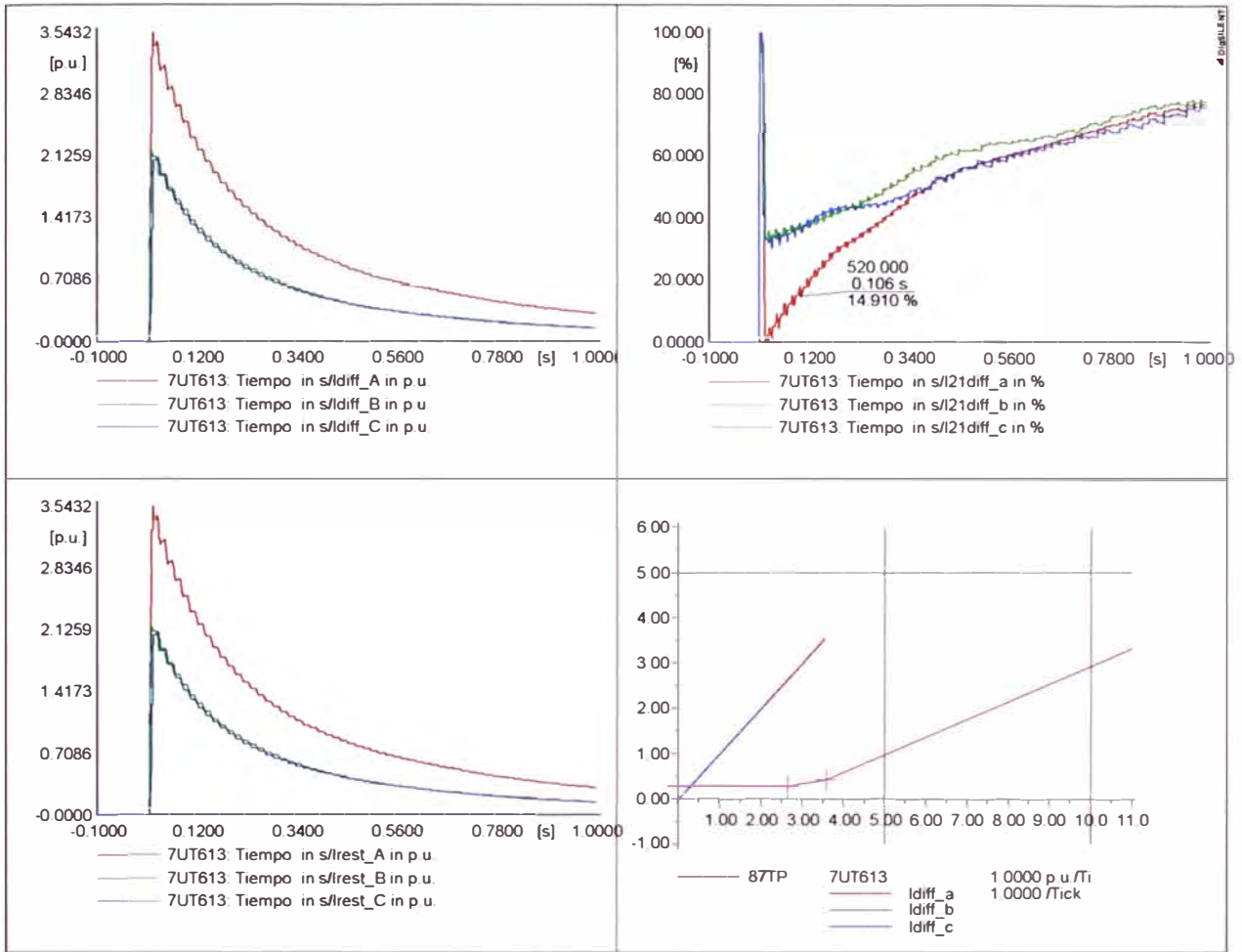


Fig. 5.6 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la caracteristica de operación del relé.

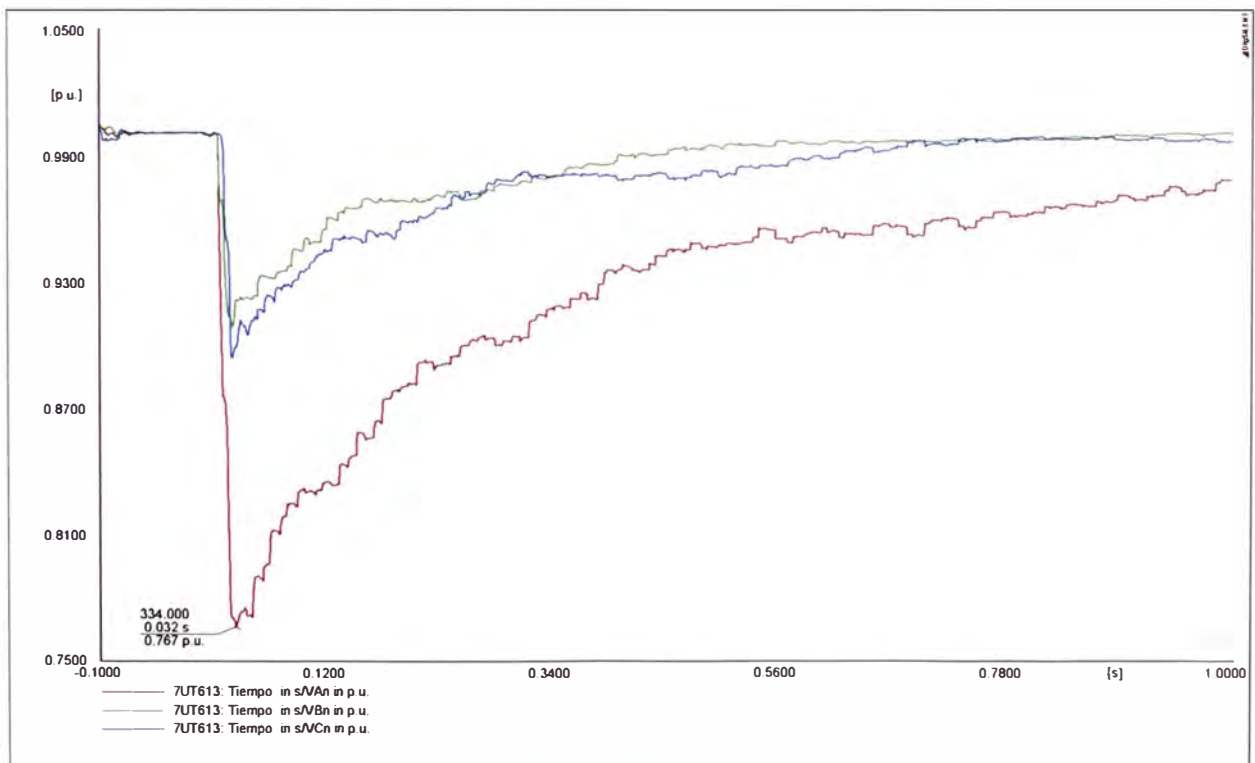


Fig. 5.7 Tensiones de fases rms en por unidad, en la barra Trujillo Nor-Oeste 138 kV.

En la figura 5.7 se muestra las tensiones de fases en valores rms y en por unidad de la barra Trujillo Nor-Oeste 138 kV, en la cual se puede observar que hay mas caída de tensión en la fase A que en el anterior caso de energización, que es sin flujo remanente y esto se debe a la corriente de inserción es mayor con respecto a la de sin flujo remanente, pero conforme la corriente de inserción cae en el tiempo esta caída de tensión va disminuyendo.

5.2.3 Operación en estado estable

Para la operación normal del sistema eléctrico, se realizó una simulación con cambiadores de tomas de TAP automático del transformador de potencia, para ello se hizo variar la carga en el lado de baja 10.5kV aumentando y disminuyendo en el tiempo, tal como se muestra en la figura 5.8.

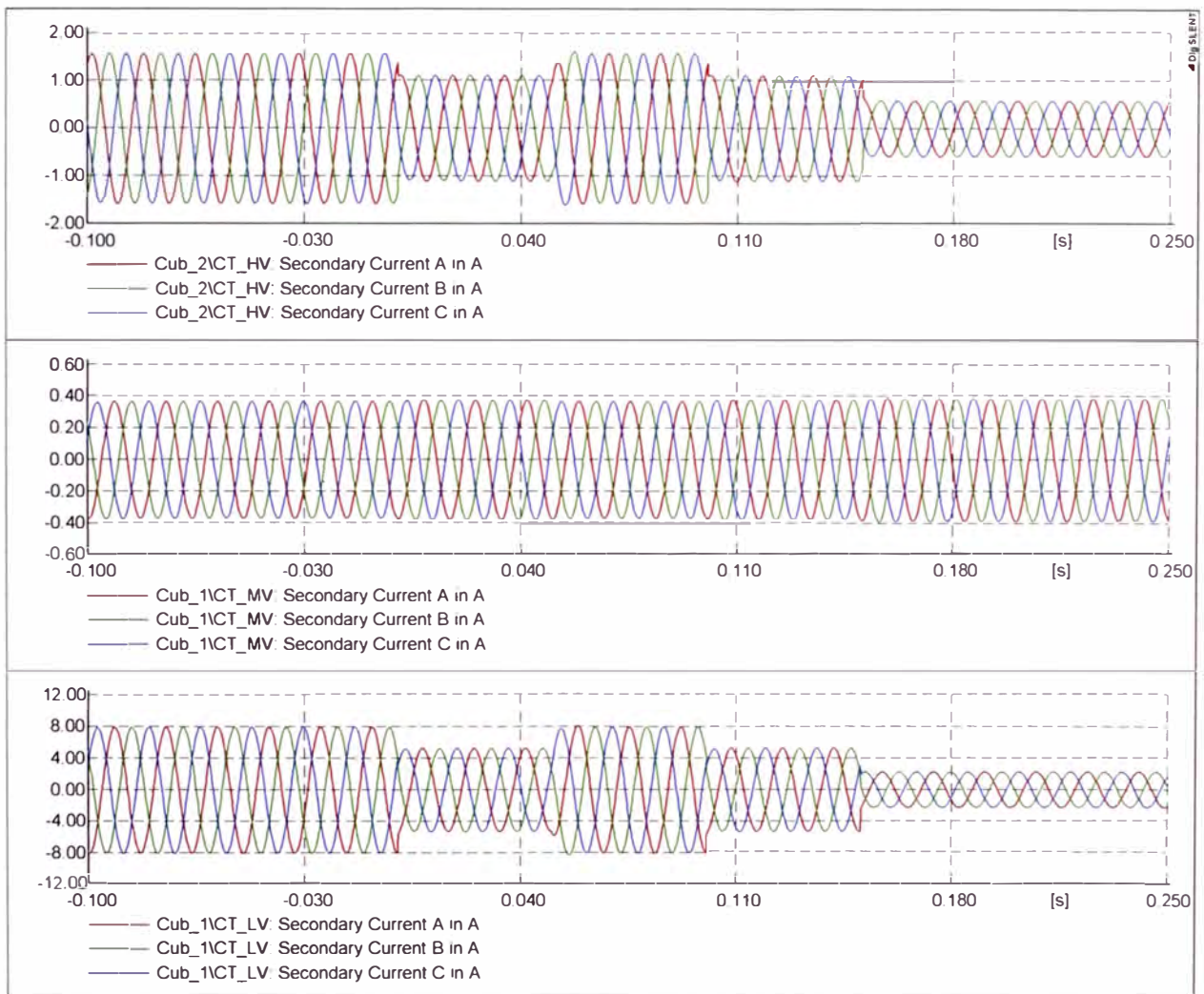


Fig. 5.8 Corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador que llegan al relé diferencial.

En la figura 5.9, se observa las corrientes diferenciales y de restricción calculada por el relé 7UT613, el cual me indica que cuando se desconectan cargas el tap baja ósea inicialmente está en la posición 11 pasaría a la posición 9, y cuando se conectan cargas el tap sube ósea de la posición 11 pasa a la posición 13.

También se observa en la curva característica del relé que las corrientes diferenciales no entran a la zona de operación, ya que el relé toma en cuenta este efecto de los tap para una operación normal del sistema.

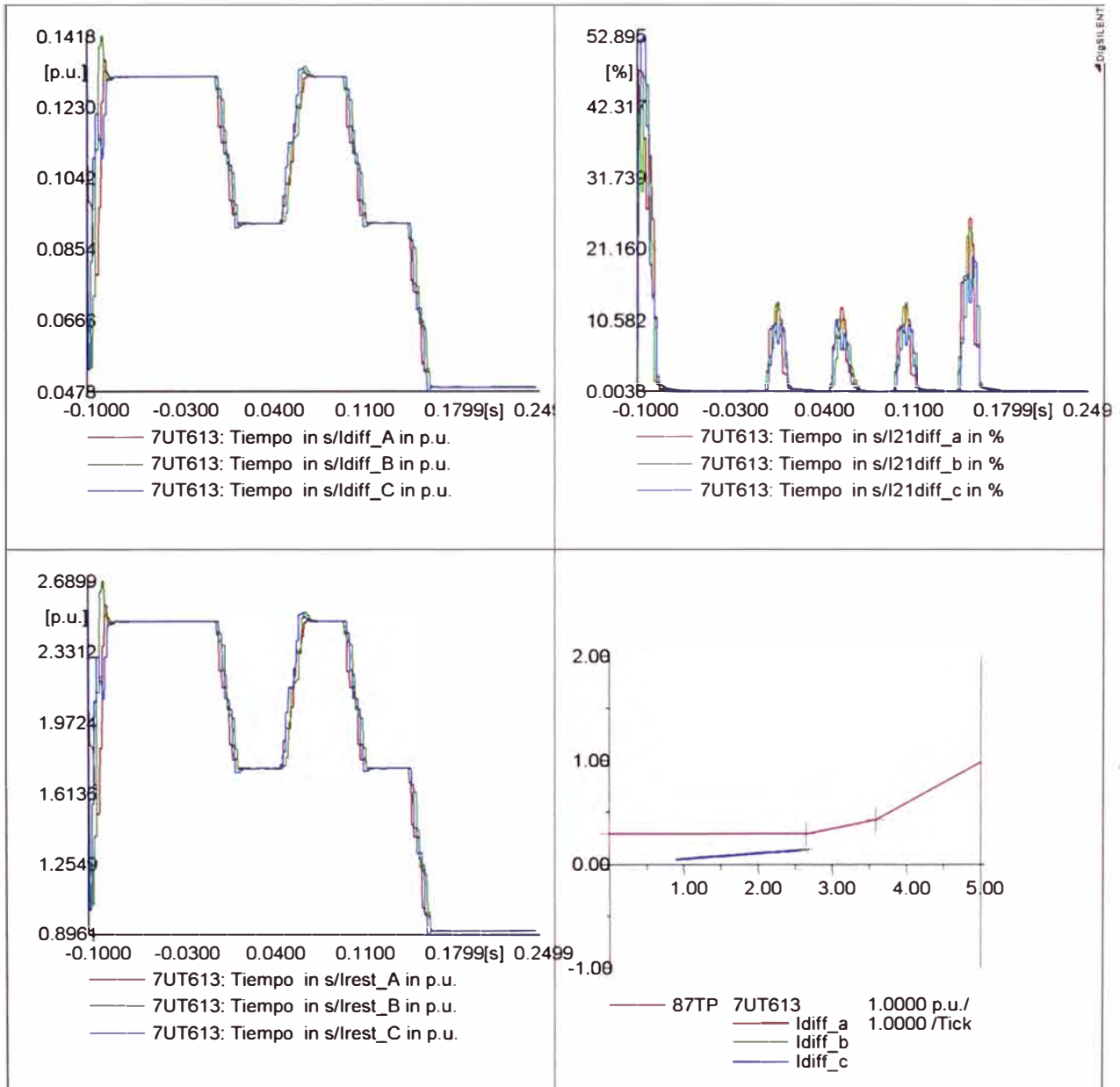


Fig. 5.9 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé para una operación en estado estable.

5.2.4 Falla externa a la zona de protección del relé diferencial

Para el caso de una falla externa se realizó una falla monofásica en la barra de Trujillo Nor-Oeste 23.8 kV., como se observa en la figura 5.10.

En la figura 5.11, se puede observar las corrientes diferenciales y de restricción a lo largo de la simulación. Como se ve en la curva característica del relé 7UT613 las corrientes diferenciales no entran a la zona de protección y por lo tanto el relé no opera.

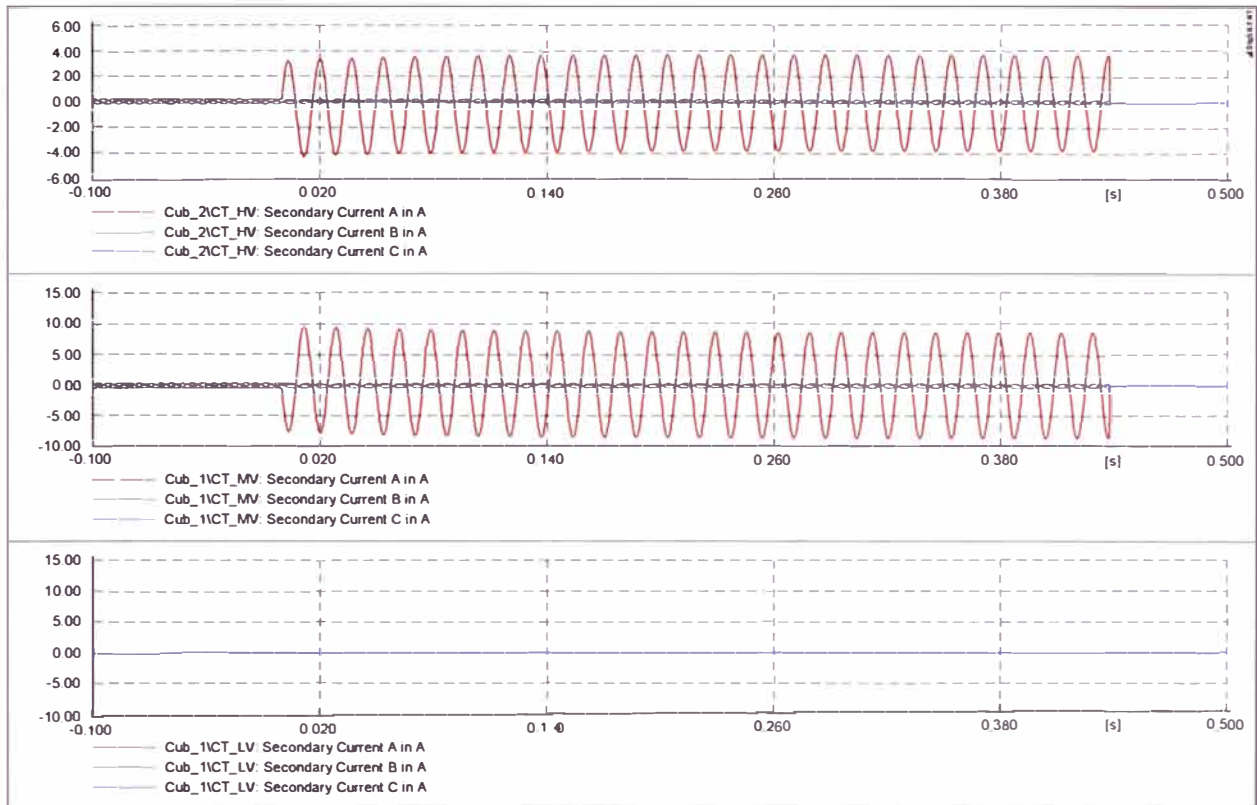


Fig. 5.10 Corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador que llegar al relé diferencial.

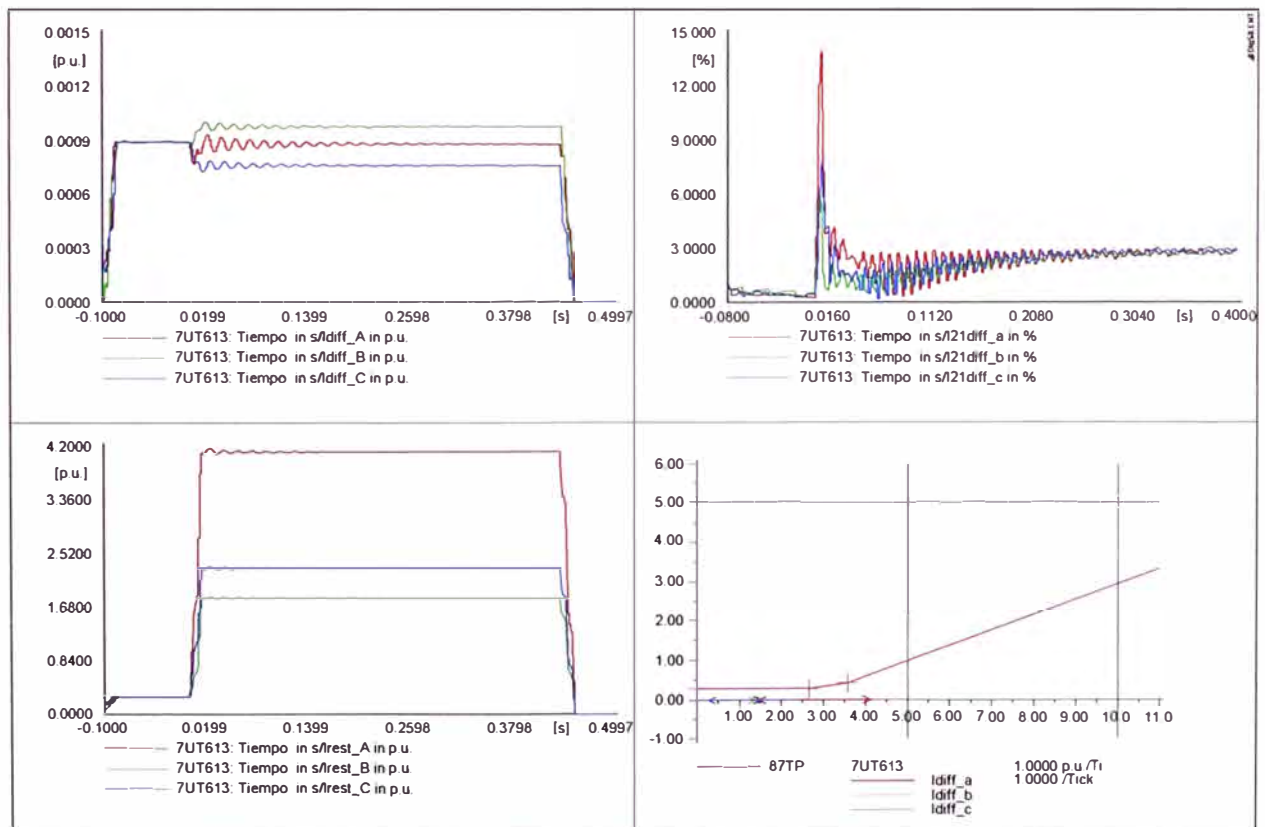


Fig. 5.11 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé para falla externa

5.2.5 Falla interna a la zona de protección del relé diferencial

Para el caso de una falla interna se realizó una falla monofásica entre la barra de Trujillo Nor-Oeste 23.8 kV. y el transformador de corriente, tal como se observa en la figura 5.12.

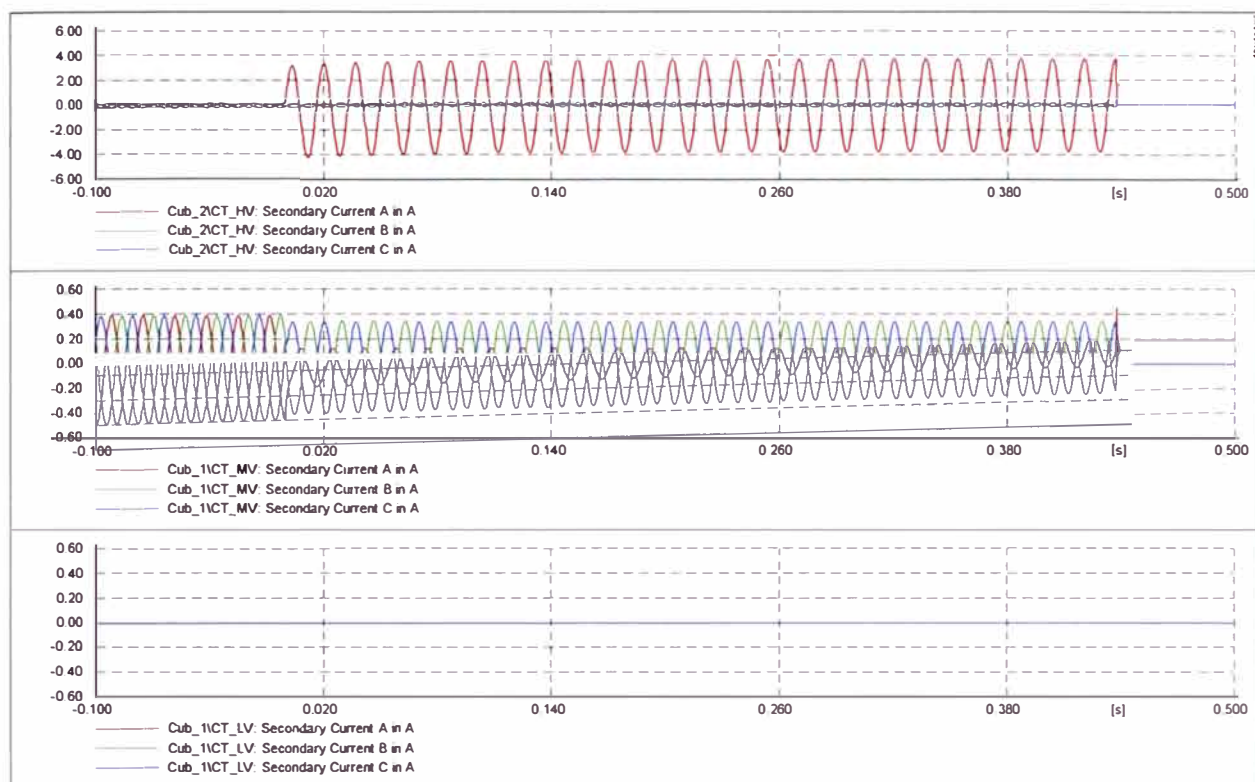


Fig. 5.12 Corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador que llegar al relé diferencial

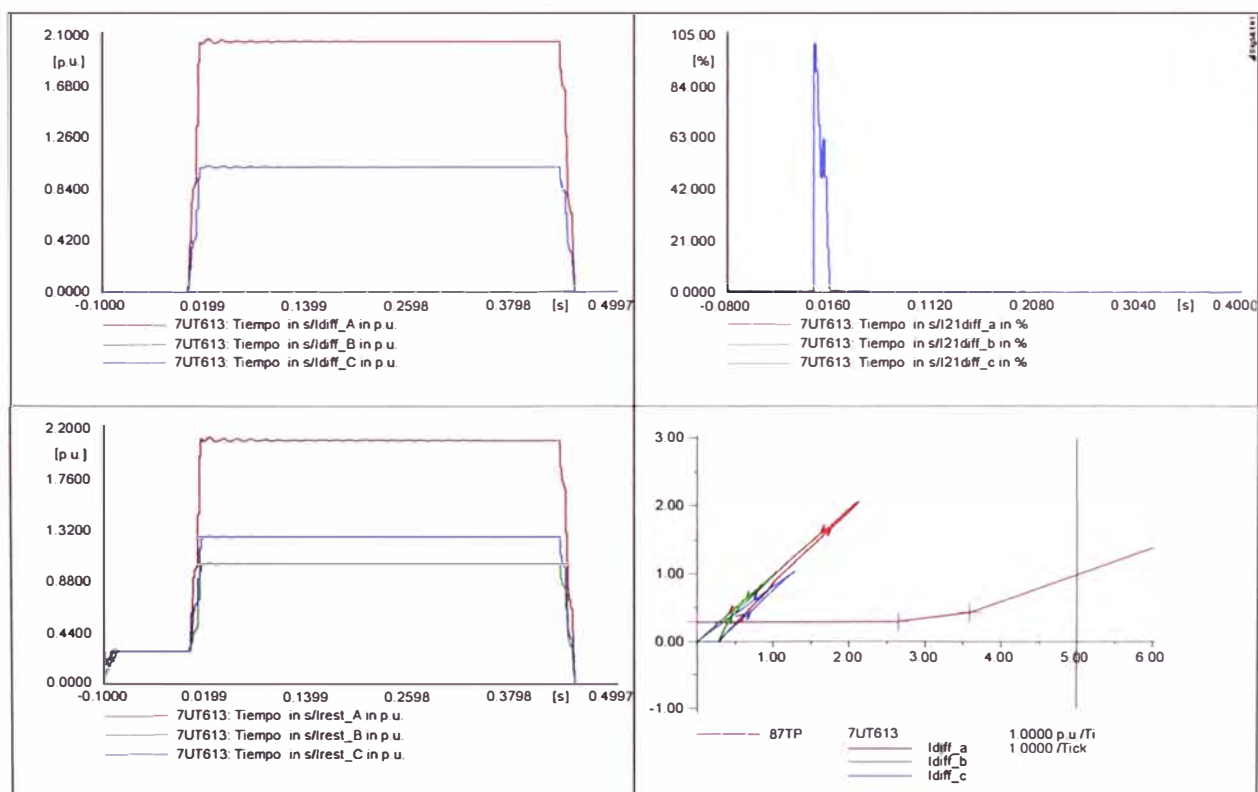


Fig. 5.13 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé.

En la figura 5.13, se puede observar las corrientes diferenciales y de restricción a lo largo de la simulación. Como se ve en la curva característica del relé 7UT613 las corrientes diferenciales entran a la zona de protección y por lo tanto el relé opera y no es bloqueado por la segunda armónica ya que solo aparecerá en el primer ciclo debido a la pequeña componente DC de la corriente de falla pero después es cero.

5.2.6 Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga

Para el caso de una falla externa con saturación de los transformadores de corrientes, se realizó una falla monofásica en la barra de Trujillo Nor-Oeste 23.8 kV. y aumentando la carga burden conectados al secundario de los transformadores de corriente del lado de 23.8 kV, ya que de esa manera se baja la curva de saturación de dichos TC's y por lo tanto se saturan con menor valor de corriente, tal como se observa en la figura 5.14.

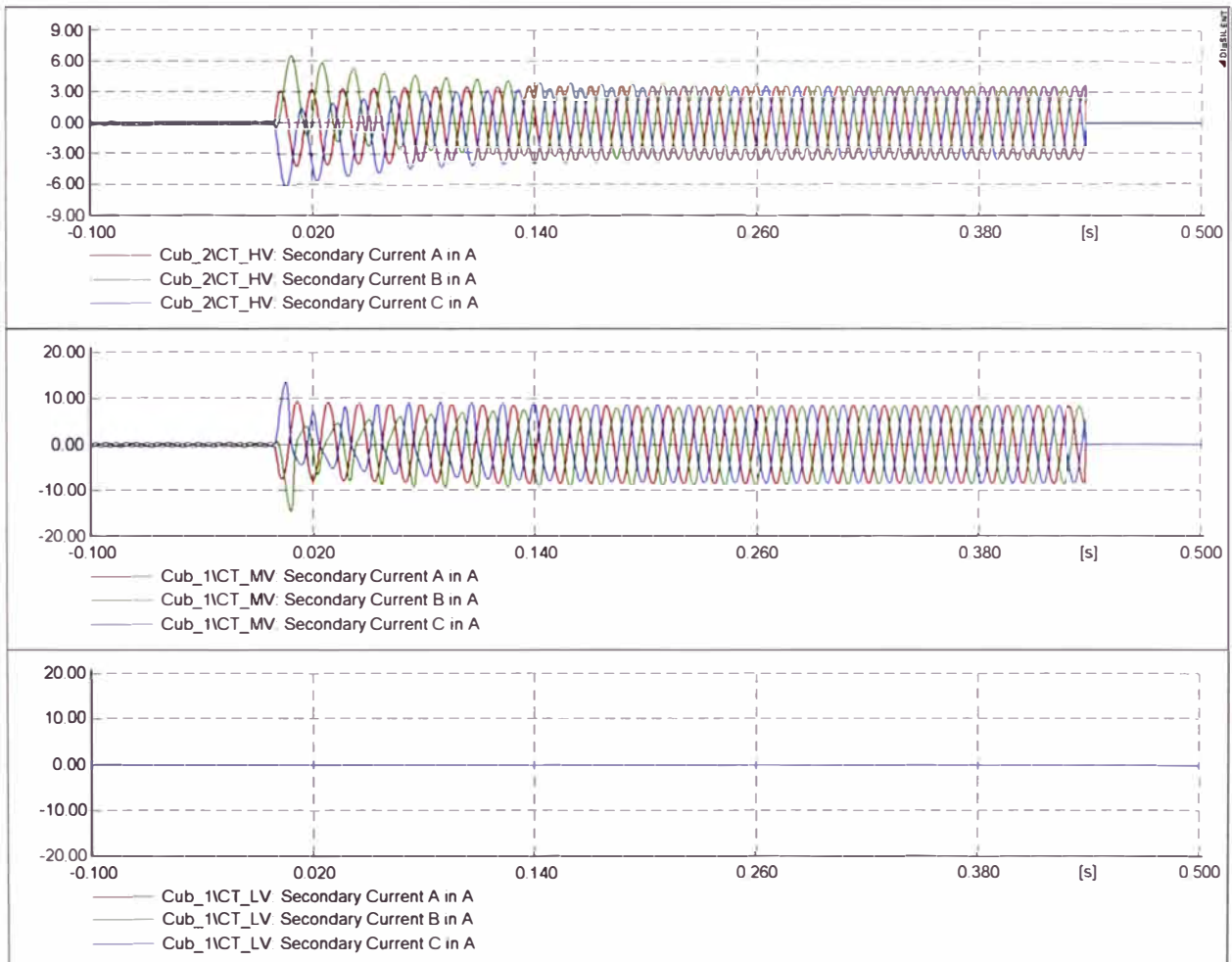


Fig. 5.14 Corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador que llegar al relé diferencial

En la figura 5.15, se puede observar las corrientes diferenciales y de restricción a lo largo de la simulación. Como se ve en la curva característica del relé 7UT613 las corrientes diferenciales primero entran a la zona de “saturación del transformador de corriente”, que es el área operacional del indicador de saturación de los transformadores de corrientes ante

fallas externas y después entran a la zona de operación pero el relé lo bloquea y así evita operar erróneamente ante este evento.

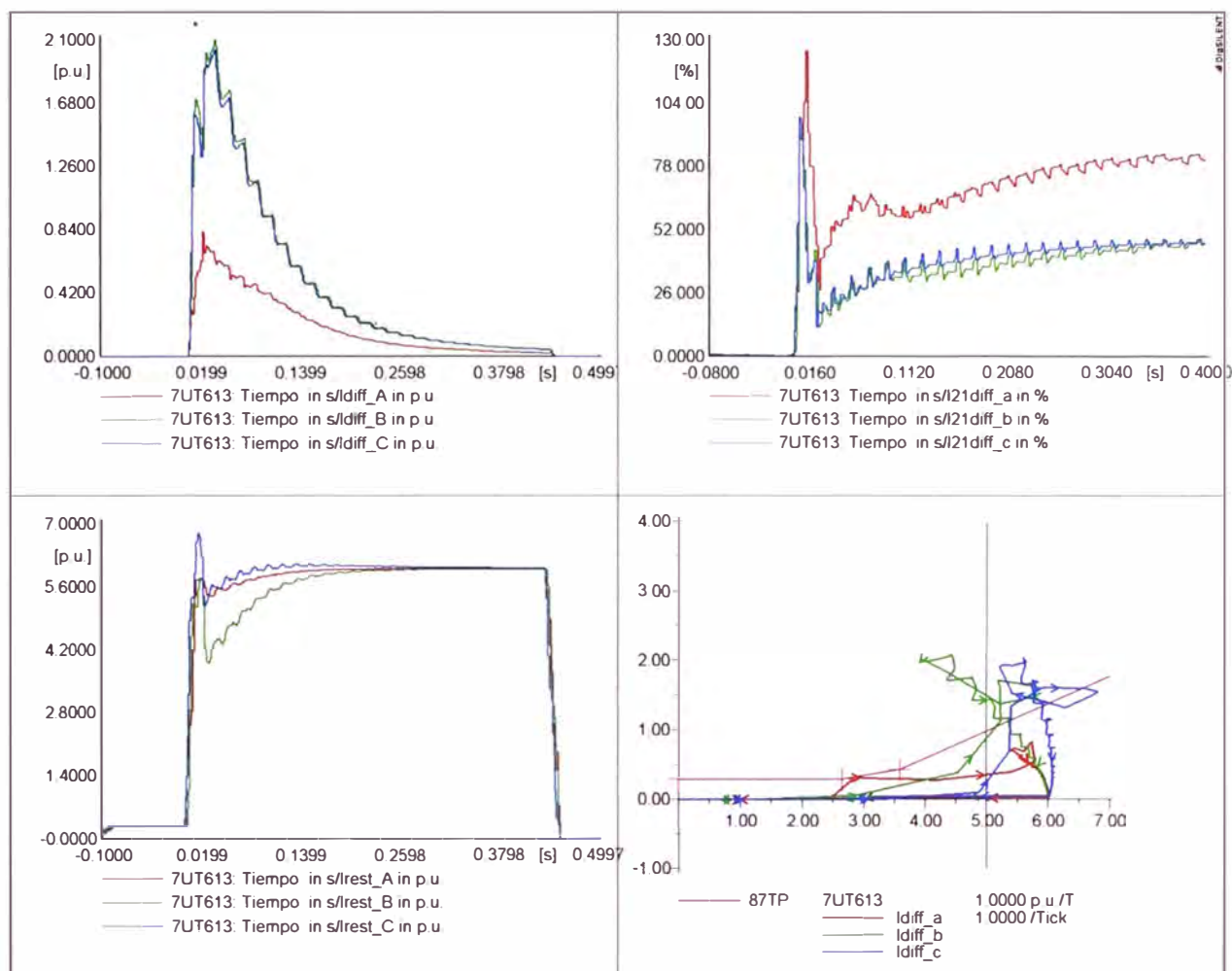


Fig. 5.15 Corrientes diferenciales tanto la fundamental como la segunda armónica esta ultima en porcentaje, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé.

5.2.7 Falla interna a tierra en el lado de media tensión con resistencia de 21 ohm

Como ya se explico en el capítulo 2, para fallas a tierra de alta impedancia el relé diferencial (87T) ya no podrá detectar dichas fallas y es por ello que se analizara la función 87N (protección de falla a tierra restringida), ya que esta función será el que detecte fallas a tierra de alta impedancia.

Se realizo simulaciones de fallas a tierra con diferentes valores de resistencias de fallas, y se llego a determinar que para resistencia de 21 ohm a más el relé diferencial (87T) ya no actuara, tal como se puede observar en la figura 5.17.

En la figura 5.16, se muestra el sentido de aporte de la corriente homopolar para una falla a tierra interna en el devanado de 23.8 kV, el valor de 310' indica la corriente homopolar que circula en el neutro del transformador de potencia y el valor de 310'' es la corriente homopolar calculado de la suma de las corrientes de fases ($310'' = I_A + I_B + I_C$).

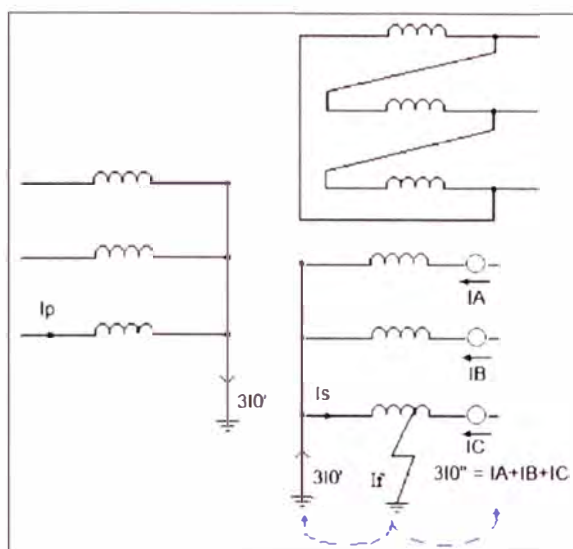


Fig. 5.16 Corrientes homopolares en el neutro del transformador de potencia y la suma de las corrientes de fases

Se puede observar en la figura 5.17, las corrientes homopolares, tanto en el neutro del transformador ($3I_0'$), así como la suma de las corrientes de fases ($3I_0''$). Como se puede ver la corriente $3I_0''$ es igual a cero, eso se debe a que la carga equivalente conectado en el lado de 23.8 kV es aislado (conexión delta), por lo tanto no hay aporte de corriente homopolar.

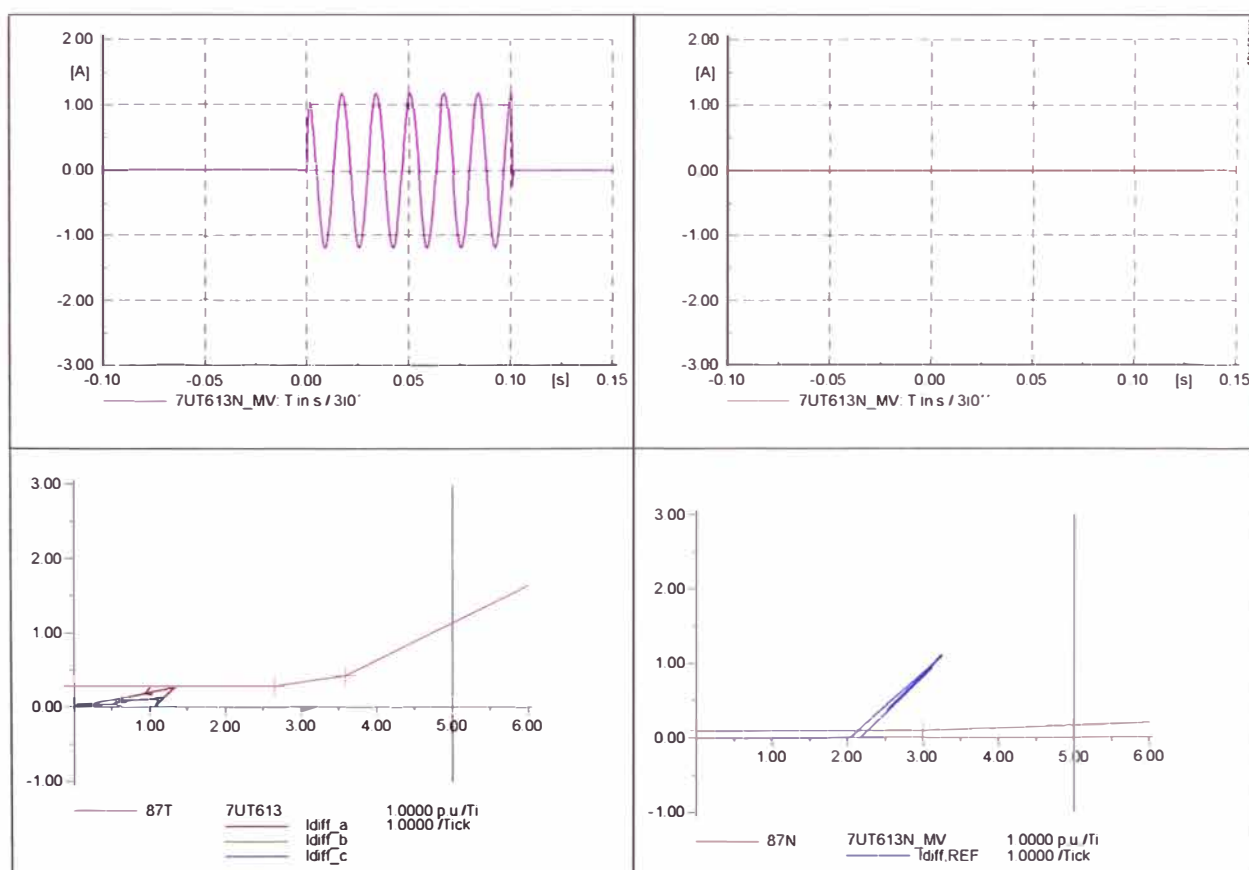


Fig. 5.17 Corrientes en secundarios de la homopolar, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé (87T y 87N), para el devanado de media tensión.

Como se puede observar en la figura 5.18, para una falla a tierra en el devanado de 23.8 kV, no actuara el 87N (conectado en el lado de alta tensión) con esto se verifica la selectividad de la protección 87N (solo actuara para falla dentro de su zona de protección el cual está limitado por los transformadores de corriente de fases y neutro).

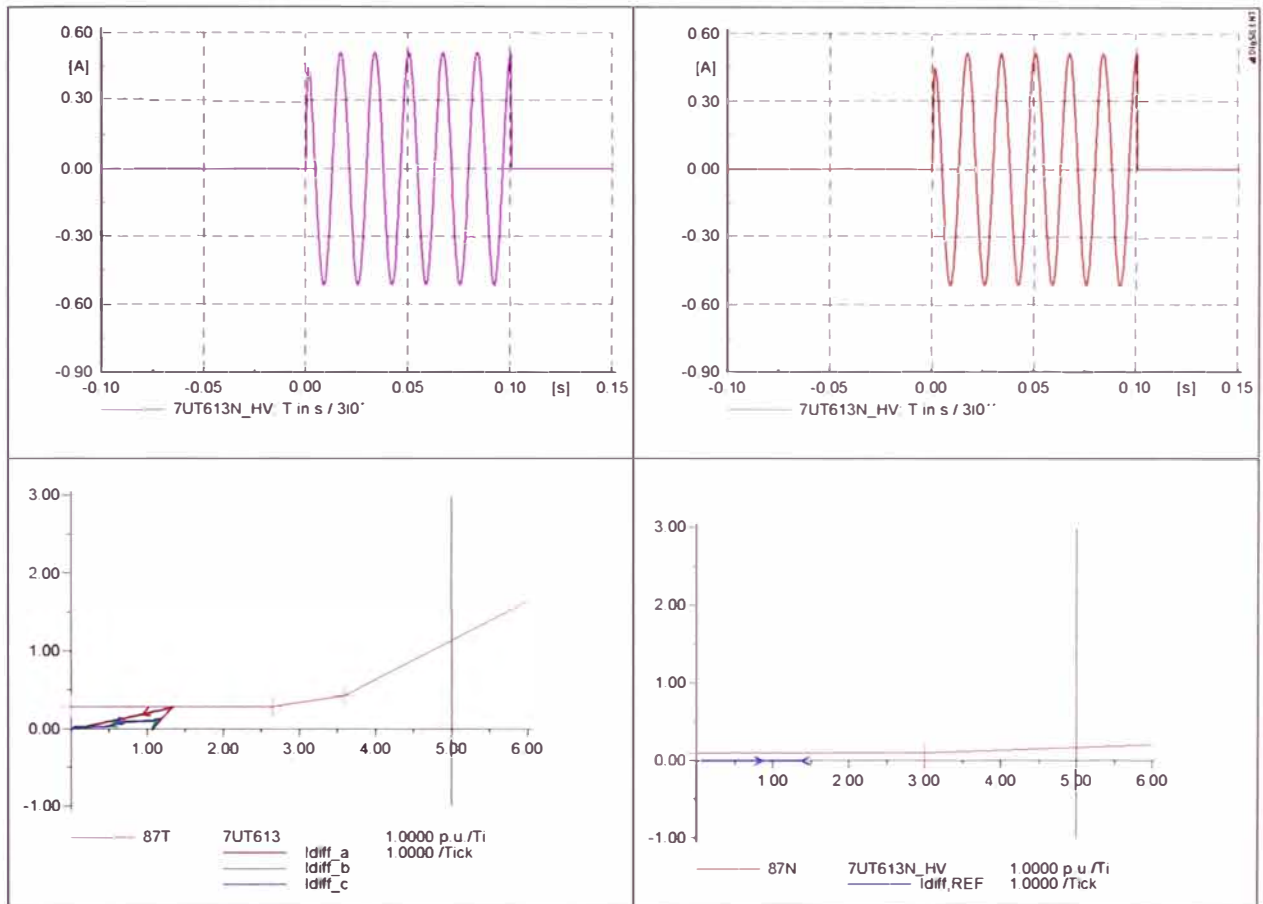


Fig. 5.18 Corrientes en secundarios de la homopolar, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé (87T y 87N), para el devanado de alta tensión.

5.2.8 Falla interna a tierra en el lado de alta tensión con resistencia de 700 ohm

Como la protección de falla a tierra restringida se utiliza a cada una de los devanados del transformador de potencia, siempre y cuando se encuentren aterrados los neutros de la conexión estrella. Es por ello que se analizara la función falla a tierra restringida para el devanado de 138 kV.

Se realizo simulaciones de fallas a tierra con diferentes valores de resistencias de fallas, y se llego a determinar que para resistencia de 700 ohm a más el relé diferencial (87T) ya no actuara, tal como se puede observar en la figura 5.20.

En la figura 5.19, se muestra el sentido de aporte de la corriente homopolar para una falla a tierra interna en el devanado de 138 kV, el valor de $3I_0'$ indica la corriente homopolar que circula en el neutro del transformador de potencia y el valor de $3I_0''$ es la corriente homopolar calculado de la suma de las corrientes de fases ($3I_0'' = I_A + I_B + I_C$).

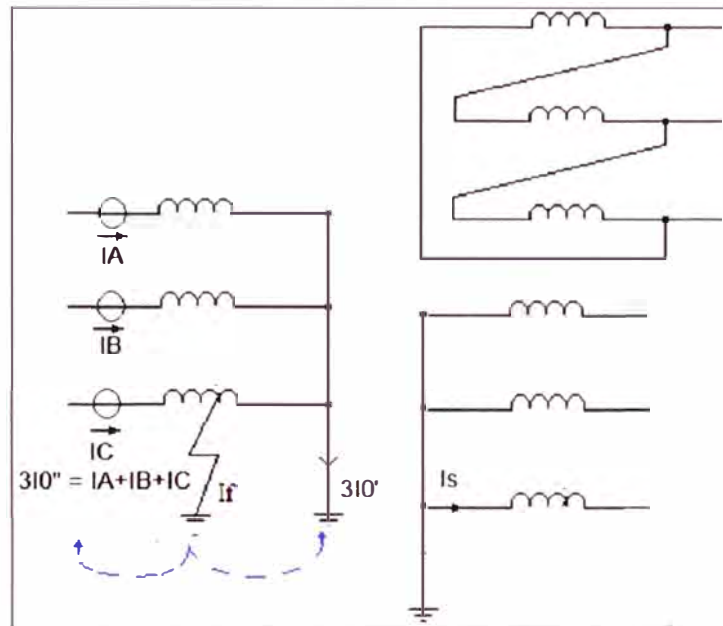


Fig. 5.19 Corrientes homopolares en el neutro del transformador de potencia y la suma de las corrientes de fases

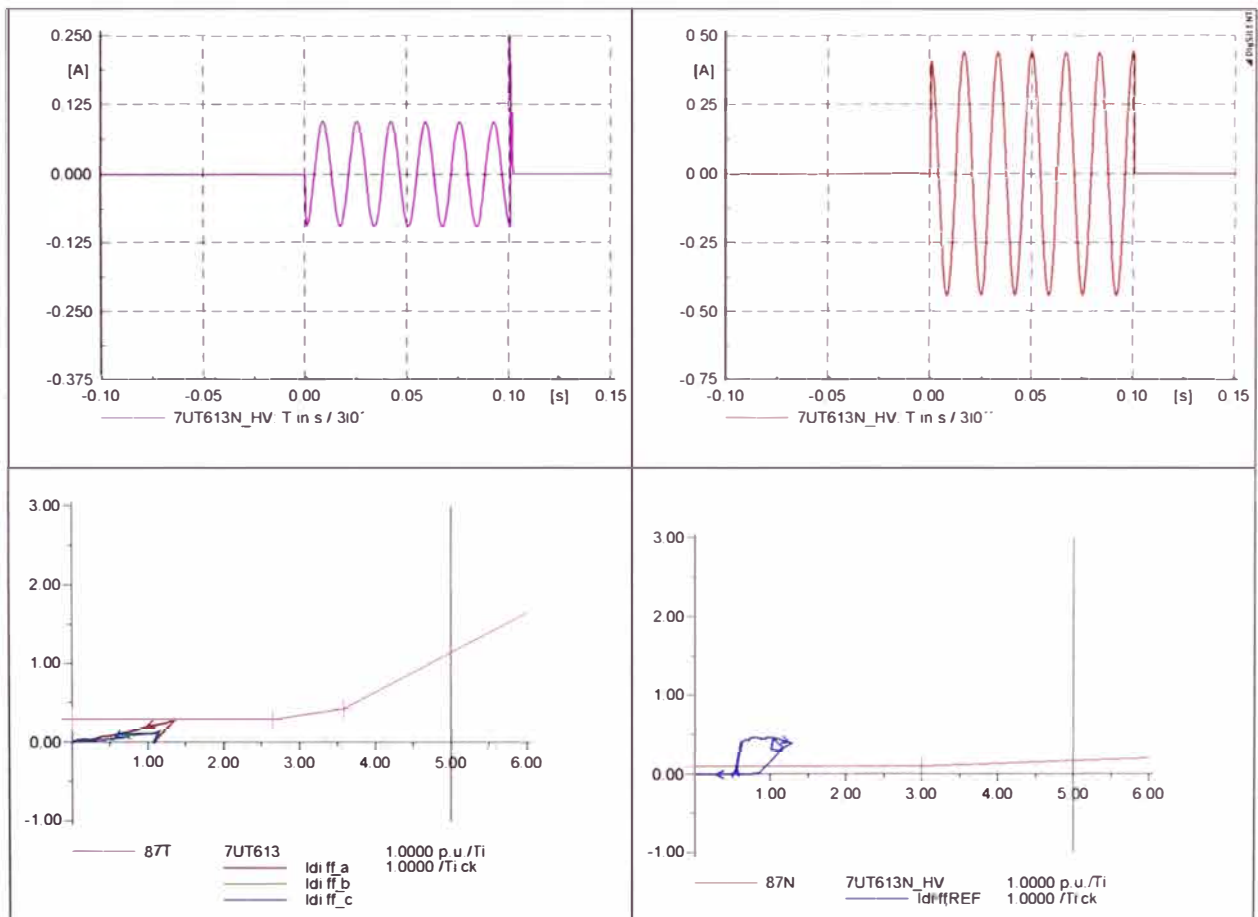


Fig. 5.20 Corrientes en secundarios de la homopolar, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé (87T y 87N), para el devanado de alta tensión.

Como se muestra en la figura 5.20, el devanado de 138 kV estará bien protegido por la protección diferencial 87T, y que solo se requiere la función 87N (falla a tierra restringida para fallas a tierra con resistencias de fallas más de 700 ohm).

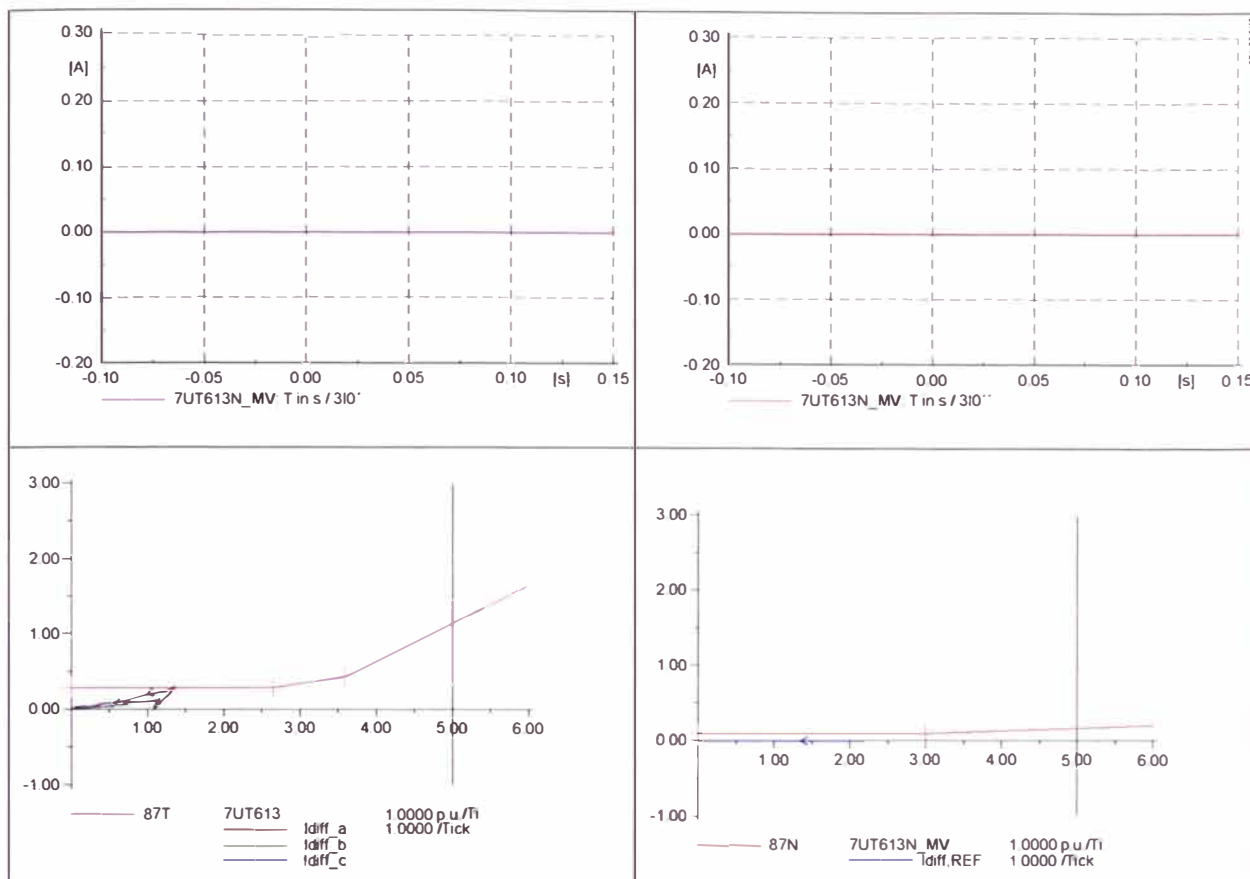


Fig. 5.21 Corrientes en secundarios de la homopolar, corrientes diferenciales graficadas en la característica de operación del relé (87T y 87N), para el devanado de media tensión.

Como se puede observar en la figura 5.21, la protección 87N conectado en el devanado de 23.8 kV no actuara porque está fuera de su zona de protección y de esta manera se comprueba la selectividad de la protección de falla a tierra restringida.

CAPITULO VI

PRUEBAS AL RELÉ DIFERENCIAL SIEMENS 7UT613

6.1 Introducción

En este ultimo capitulo se describirán la pruebas realizadas al relé diferencial 7UT613 del transformador de la subestación Trujillo Nor-Oeste, para ello se utilizo la maleta de pruebas OMICRON CMC 353, el cual fue proporcionado por la empresa Hidrandina S.A.

6.2 Desarrollo de los archivos Comtrade para los casos a probarse

El formato COMTRADE es un formato estándar IEEE Std C37.111-1999, usado para trabajar con registros oscilográficos que está compuesto por:

- *.hdr Archivo de encabezamiento, este archivo de texto opcional creado por el originador de los datos COMTRADE, típicamente a través de un editor de texto como el Notepad o WordPad.
- *.cfg Archivo de configuración, este archivo contiene información necesaria para que un programa computacional (SIGRA) interprete el archivo de datos. Este archivo contiene información tales como:
 - Nombre y ubicación, identificación del registrador, año del estándar.
 - Número y tipo de canales.
 - Nombre de canales, unidades y factores de conversión.
 - Frecuencia del sistema.
 - Tasa de muestreo y numero de muestras por canal.
 - Fecha y hora del primer punto de datos.
 - Fecha y hora del punto de disparo.
 - Tipo de archivo de datos.

SIGRA es un programa incluido dentro del DIGSI, este programa es usado para analizar eventos en formatos COMTRADE.

- *.dat Archivo de datos, muestreo, este archivo contiene valores en filas y columnas donde cada fila consiste de una serie de valores de datos precedidos por dos números

que indican la posición y el tiempo de ocurrencia. Este archivo debe tener el mismo nombre de los archivos de encabezamiento y de configuración y su extensión es “DAT”.

Para poder obtener los archivos COMTRADE es necesario la modelación del sistema eléctrico de potencia (SEP), en el capítulo IV se explica el modelamiento realizado para el sistema eléctrico en estudio. Para obtener los archivos COMTRADE se utilizó el software DIgSILENT PowerFactory, ya que es un software que realiza simulaciones digitales para cualquier tipo de eventos de fallas en el sistema eléctrico. Y también tiene la opción de generar los archivos IEEE COMTRADE ASCII.

6.3 Pruebas al relé diferencial Siemens 7UT613 ante diferentes eventos del sistema

Los eventos realizados son los siguientes.

- a) Energización del transformador de potencia con tap central y sin flujo remanente.
- b) Energización del transformador de potencia con tap central y con flujo remanente.
- c) Falla externa a la zona de protección.
- d) Falla interna a la zona de protección.
- e) Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga.

6.3.1 Energización del transformador con tap central y sin flujo remanente

En la figura 6.1, se muestra el reporte del relé diferencial 7UT613, y se observa que el relé arranca y después de 15 ms es bloqueado por el porcentaje del diferencial de la segunda armónica, el cual tiene un ajuste recomendado por el fabricante del 15%. Como se puede observar el relé calcula para cada fase el porcentaje de la segunda armónica, y según su algoritmo solo basta que una fase pase el 15% es bloqueado para todas las fases, durante un tiempo que depende del ajuste del Diff. Crosssblock by 2da Harmonic que es de 7 ciclos (117ms).

También se observa que los porcentajes de la segunda armónica se desactivan en un tiempo de 469 ms, el cual la maleta de pruebasOMICRON deja de inyectar las corrientes, con esto se comprueba que las corrientes diferenciales de la segunda armónica se mantienen más del ajuste del 15% en todo el tiempo tal como se muestra en la simulación del capítulo V, (figura 5.3).

En la figura 6.2, se muestran la oscilografía del transformador de potencia registrada en el relé diferencial 7UT613, para una energización con la posición del tap central y sin flujo remanente, a las mismas condiciones que se realizó en las simulaciones del capítulo V.

7UT613 20120916 postTest_pm					
Indications					
SIMATIC					
Trip Log - 000015 / 16/09/2012 11:57:58.686 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE /					
1 Indications					
1.1 Trip Log - 000015 / 16/09/2012 11:57:58.686 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613					
Trip Log - 000015 / 16/09/2012 11:57:58.686 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613					
Number	Indication	Value	Date and time	Cause	State
00301	Power System fault	15 - ON	16.09.2012 11:57:58.686		
00302	Fault Event	15 - ON	16.09.2012 11:57:58.686		
00501	Relay PICKUP	ON	0 ms		
05631	Differential protection picked up	ON	0 ms		
05657	Diff: Crossblock by 2.Harmonic	ON	15 ms		
05644	Diff: Blocked by 2.Harmon. L1	ON	15 ms		
05645	Diff: Blocked by 2.Harmon. L2	ON	15 ms		
05646	Diff: Blocked by 2.Harmon. L3	ON	15 ms		
05657	Diff: Crossblock by 2.Harmonic	OFF	117 ms		
05644	Diff: Blocked by 2.Harmon. L1	OFF	469 ms		
05645	Diff: Blocked by 2.Harmon. L2	OFF	469 ms		
05646	Diff: Blocked by 2.Harmon. L3	OFF	469 ms		
05631	Differential protection picked up	OFF	469 ms		

Fig. 6.1 Reporte del relé diferencial 7UT613, para energización con tap central y sin flujo remanente

6.3.2 Energización del transformador con tap central y con flujo remanente

En la figura 6.3, se muestra la oscilografía del relé diferencial 7UT613, y se observa que el relé arranca y después de 18.7 ms es bloqueado por el porcentaje del diferencial de la segunda armónica, el cual tiene un ajuste recomendado por el fabricante del 15%. Como se puede observar el relé calcula para cada fase el porcentaje de la segunda armónica, y según su algoritmo solo basta que una fase pase el 15% es bloqueado para todas las fases, durante un tiempo que depende del ajuste del Diff. Crossblock by 2 Harmonic que es de 7 ciclos (117ms). También se observa que para la fase A, al comienzo y durante 91.6ms tiene menor porcentaje de la segunda armónica que a su vez es este tiempo es menor del Diff. Crossblock by 2 Harmonic que es de 7 ciclos (117ms) y es por ello el relé no envía disparo, que los porcentajes de la segunda armónica se desactivan en un tiempo de 469 ms, el cual la maleta de pruebas OMICRON deja de inyectar las corrientes, con esto se comprueba que las corrientes diferenciales de la segunda armónica se mantienen mas del ajuste del 15% en todo el tiempo tal como se muestra en la simulación del capítulo V, (figura 5.6).

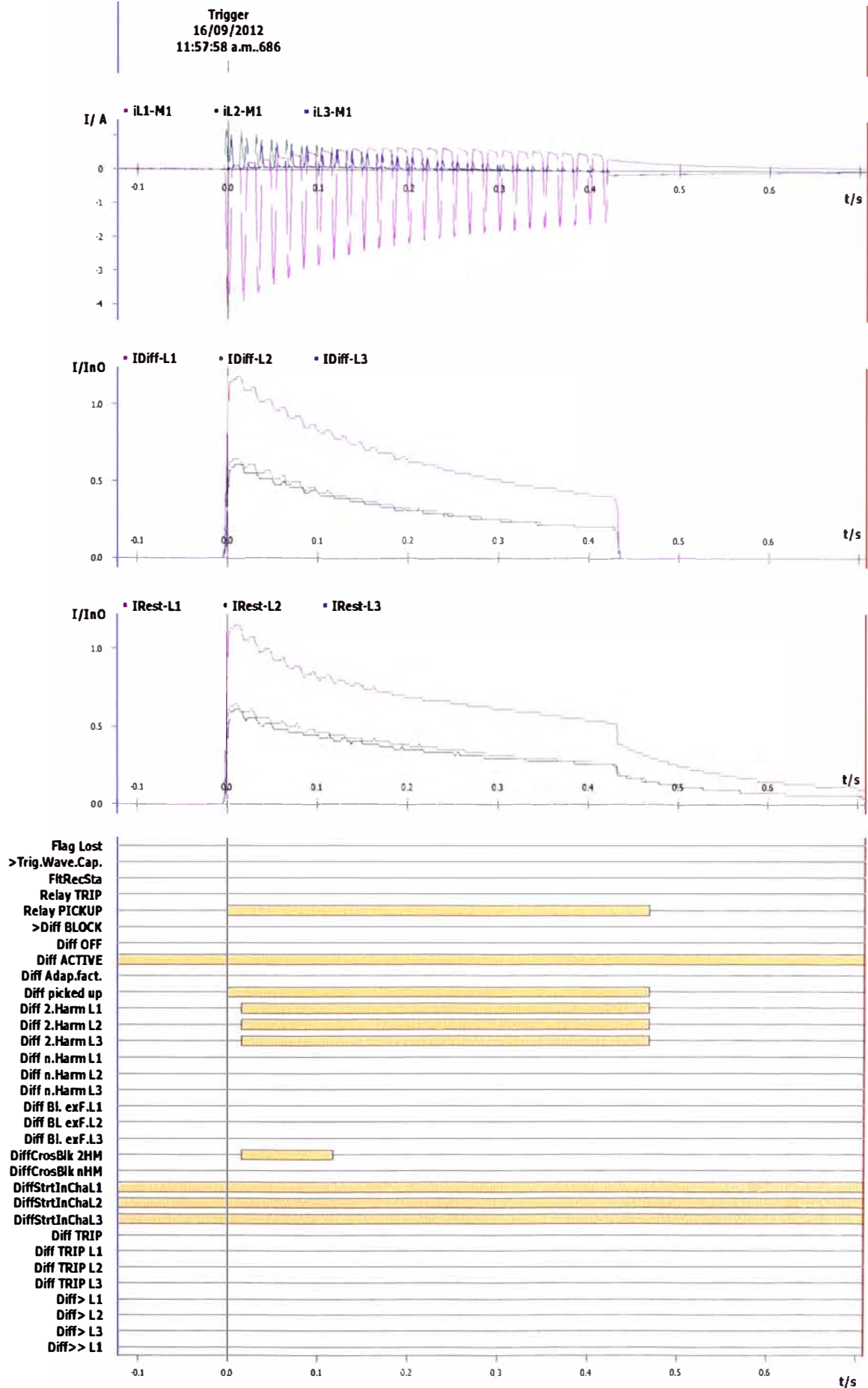


Fig. 6.2 Oscilografía para la energización con tap central y sin flujo remanente

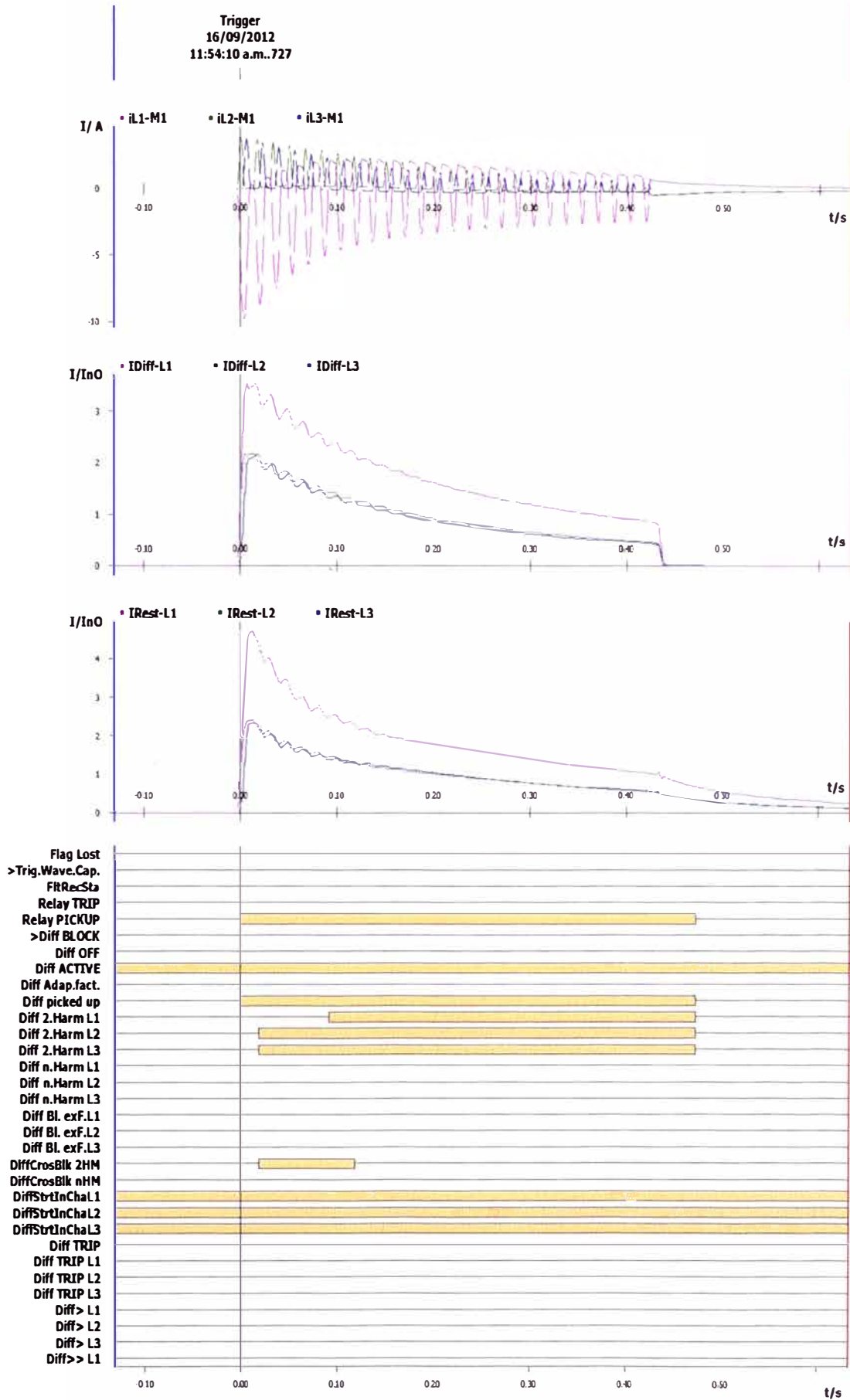


Fig. 6.3 Oscilografía para la energización con tap central y con flujo remanente

6.3.3 Falla externa a la zona de protección

En la figura 6.4, se muestra el reporte que registró el relé diferencial 7UT613, y se observa que el relé arranca y después de 2 ms lo detecta como falla externa en la fase A, por lo tanto el relé no envía disparo, esto se debe a que las corrientes diferenciales son menores con respecto a las corrientes de restricciones de cada fase el cual me indica que está en la zona de no operación, tal como se muestra en la simulación realizada en el capítulo V (figura 5.11).

7UT613 20120916 postTest_prn					
Indications					
SIMATIC			Trip Log - 000018 / 16/09/2012 12:05:04.587 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE /		
1	Indications				
1.1	Trip Log - 000018 / 16/09/2012 12:05:04.587 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613				
<i>Trip Log - 000018 / 16/09/2012 12:05:04.587 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613</i>					
Number	Indication	Value	Date and time	Cause	State
00301	Power System fault	18 - ON	16.09.2012 12:05:04.587		
00302	Fault Event	18 - ON	16.09.2012 12:05:04.587		
00501	Relay PICKUP	ON	0 ms		
05631	Differential protection picked up	ON	0 ms		
05651	Diff. prot.: Blocked by ext. fault LI	ON	2 ms		
05660	Diff. Crossblock by ext. fault	ON	2 ms		
05660	Diff. Crossblock by ext. fault	OFF	250 ms		
05651	Diff. prot.: Blocked by ext. fault LI	OFF	508 ms		
05631	Differential protection picked up	OFF	508 ms		

Fig. 6.4 Reporte del relé diferencial 7UT613, para falla externa a tierra en la fase A

En la figura 6.5, se puede observar que las corrientes diferenciales no pasan de 0.04 p.u. el cual es menor al ajuste 0.29 p.u., es por ello que el relé no arranca y también se puede ver que sus corrientes de restricciones no mayores y por lo tanto no entra a la zona de operación del relé. Como se puede observar en la grafica 5.11 del capítulo V, las corrientes diferenciales no entran a la zona de operación del relé diferencial.

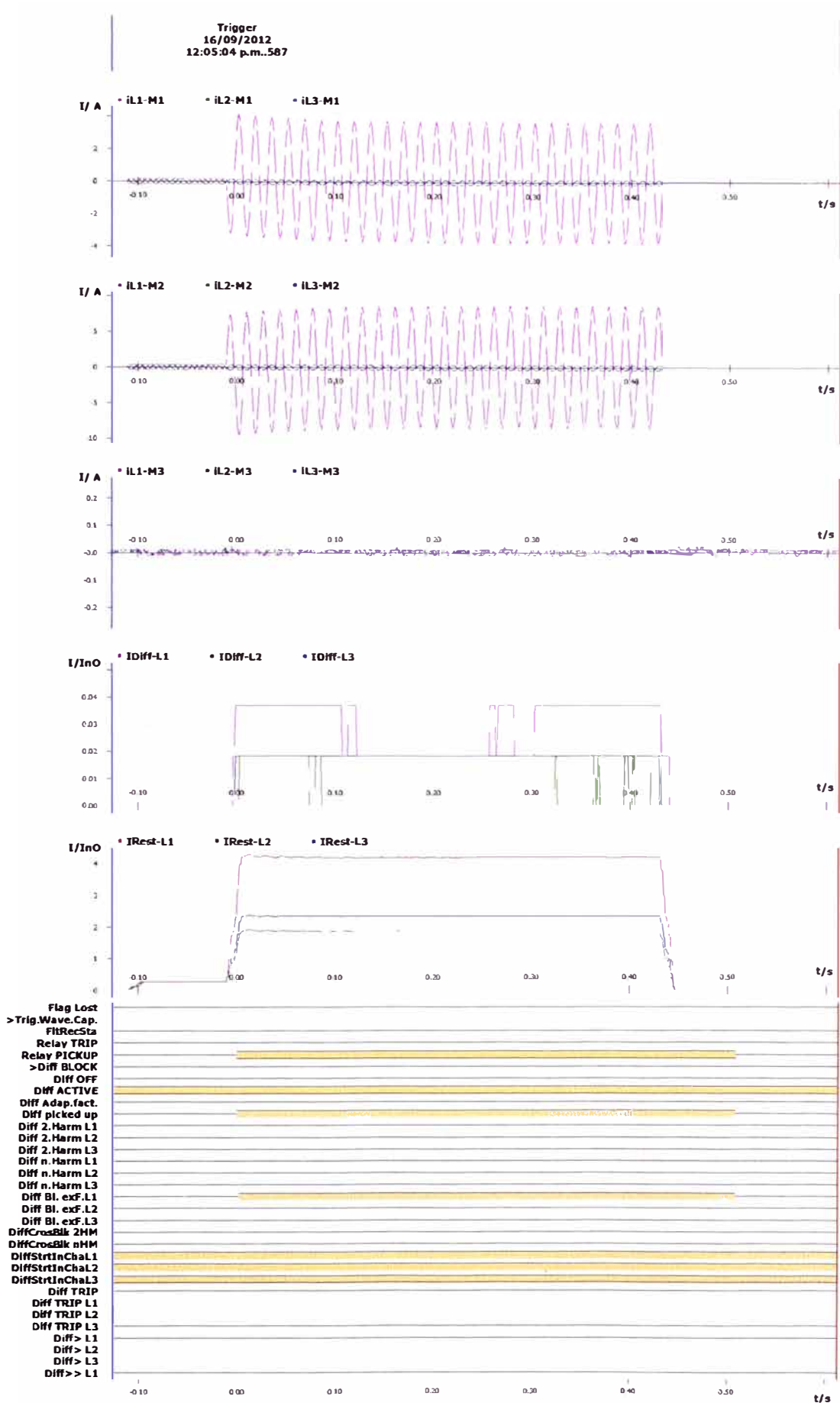


Fig. 6.5 Oscilografía para una falla externa a tierra en la fase A

6.3.4 Falla interna a la zona de protección

En la figura 6.6, se muestra el reporte que registró el relé diferencial 7UT613, y se observa que el relé arranca y después de 15 ms envía disparo, ya que las corrientes diferenciales son mayores al ajuste 0.29 p.u. y también se puede comprobar que las corrientes diferenciales son casi iguales a las corrientes de restricciones de cada fase el cual me indica que está en la zona de operación, tal como se puede observar en la figura 5.13 del capítulo V, ya que se realizó la simulación para el misma falla interna.

7UT613 20120916 postTest_prn					
Indications					
SIMATIC			Trip Log - 000020 / 16/09/2012 12:09:20.553 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE /		
1 Indications					
1.1 Trip Log - 000020 / 16/09/2012 12:09:20.553 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613					
<i>Trip Log - 000020 / 16/09/2012 12:09:20.553 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613</i>					
Number	Indication	Value	Date and time	Cause	State
00301	Power System fault	20 - ON	16.09.2012 12:09:20.553		
00302	Fault Event	20 - ON	16.09.2012 12:09:20.553		
00501	Relay PICKUP	ON	0 ms		
05631	Differential protection picked up	ON	0 ms		
05681	Diff. prot.: IDIFF> L1 (without Tdelay)	ON	15 ms		
05682	Diff. prot.: IDIFF> L2 (without Tdelay)	ON	15 ms		
05683	Diff. prot.: IDIFF> L3 (without Tdelay)	ON	15 ms		
00511	Relay GENERAL TRIP command	ON	15 ms		
05691	Differential prot.: TRIP by IDIFF>	ON	15 ms		
05701	Diff. curr. in L1 at trip without Tdelay	2.08 I/InO	15 ms		
05704	Restr. curr. in L1 at trip without Tdelay	2.15 I/InO	15 ms		
05702	Diff. curr. in L2 at trip without Tdelay	1.04 I/InO	15 ms		
05705	Restr. curr. in L2 at trip without Tdelay	1.07 I/InO	15 ms		
05703	Diff. curr. in L3 at trip without Tdelay	1.04 I/InO	15 ms		
05706	Restr. curr. in L3 at trip without Tdelay	1.30 I/InO	15 ms		
05681	Diff. prot.: IDIFF> L1 (without Tdelay)	OFF	452 ms		
05682	Diff. prot.: IDIFF> L2 (without Tdelay)	OFF	452 ms		
05683	Diff. prot.: IDIFF> L3 (without Tdelay)	OFF	452 ms		
05631	Differential protection picked up	OFF	508 ms		

Fig. 6.6 Reporte del relé diferencial 7UT613, para falla interna a tierra en la fase A

En la figura 6.7, se observa que no se activan los bloques de la corriente diferencial de la segunda armónica porque después de un ciclo ya es cero y por lo tanto no es bloqueado y el relé envía disparo.

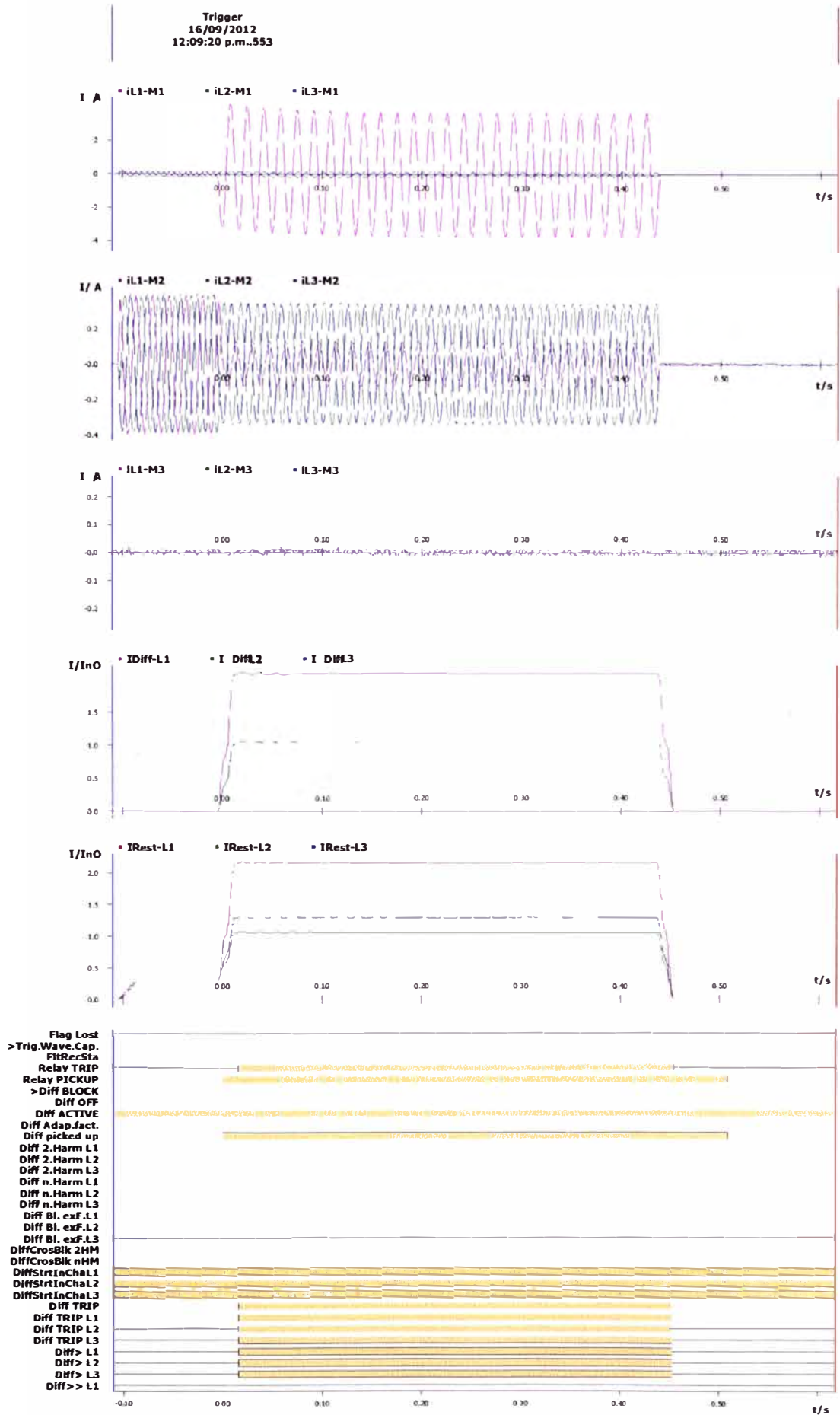


Fig. 6.7 Oscilografía para una falla interna a tierra en la fase A

6.3.5 Falla externa con saturación de un TC aumentando el burden de carga

En la figura 6.8, se muestra el reporte que registro el relé y se puede observar que la fase C es la primera fase que detecta como una falla externa y después las fase B y A, y eso se deben a que las corrientes de restricción en el primer ciclo la fase C es mayor como se muestra en la figura 6.9 y en las simulaciones realizadas en el capítulo V.

El relé no opera porque primero entra a la zona de “saturación de los transformadores de corriente”, que es el área operacional del indicador de saturación de los transformadores de corriente ante fallas externas, después ingresa a la zona de operación tal como se puede observar en la grafica 5.15 del capítulo V, ya que se realizo el mismo caso de falla externa.

7UT613 20120916 postTest_prn					
Indications					
SIMATIC					
Trip Log - 000019 / 16/09/2012 12:07:26.204 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE /					
1 Indications					
1.1 Trip Log - 000019 / 16/09/2012 12:07:26.204 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613					
Trip Log - 000019 / 16/09/2012 12:07:26.204 a.m. - INFORME FINAL / S.E. TRUJILLO NOR-OESTE / 7UT613 20120916 postTest/7UT613					
Number	Indication	Value	Date and time	Cause	State
00301	Power System fault	19 - ON	16.09.2012 12:07:26.204		
00302	Fault Event	19 - ON	16.09.2012 12:07:26.204		
00501	Relay PICKUP	ON	0 ms		
05631	Differential protection picked up	ON	0 ms		
05653	Diff. prot.: Blocked by ext. fault.L3	ON	0 ms		
05660	Diff: Crossblock by ext. fault	ON	0 ms		
05652	Diff. prot.: Blocked by ext. fault L2	ON	2 ms		
05651	Diff. prot.: Blocked by ext. fault L1	ON	5 ms		
05657	Diff: Crossblock by 2.Harmonic	ON	34 ms		
05645	Diff: Blocked by 2.Harmon. L2	ON	34 ms		
05657	Diff: Crossblock by 2.Harmonic	OFF	107 ms		
05645	Diff: Blocked by 2.Harmon. L2	OFF	107 ms		
05660	Diff: Crossblock by ext. fault	OFF	250 ms		
05651	Diff. prot.: Blocked by ext. fault L1	OFF	417 ms		
05652	Diff. prot.: Blocked by ext. fault L2	OFF	417 ms		
05653	Diff. prot.: Blocked by ext. fault.L3	OFF	417 ms		
05631	Differential protection picked up	OFF	417 ms		

Fig. 6.8 Reporte del relé diferencial 7UT613, para falla externa con saturación de un TC

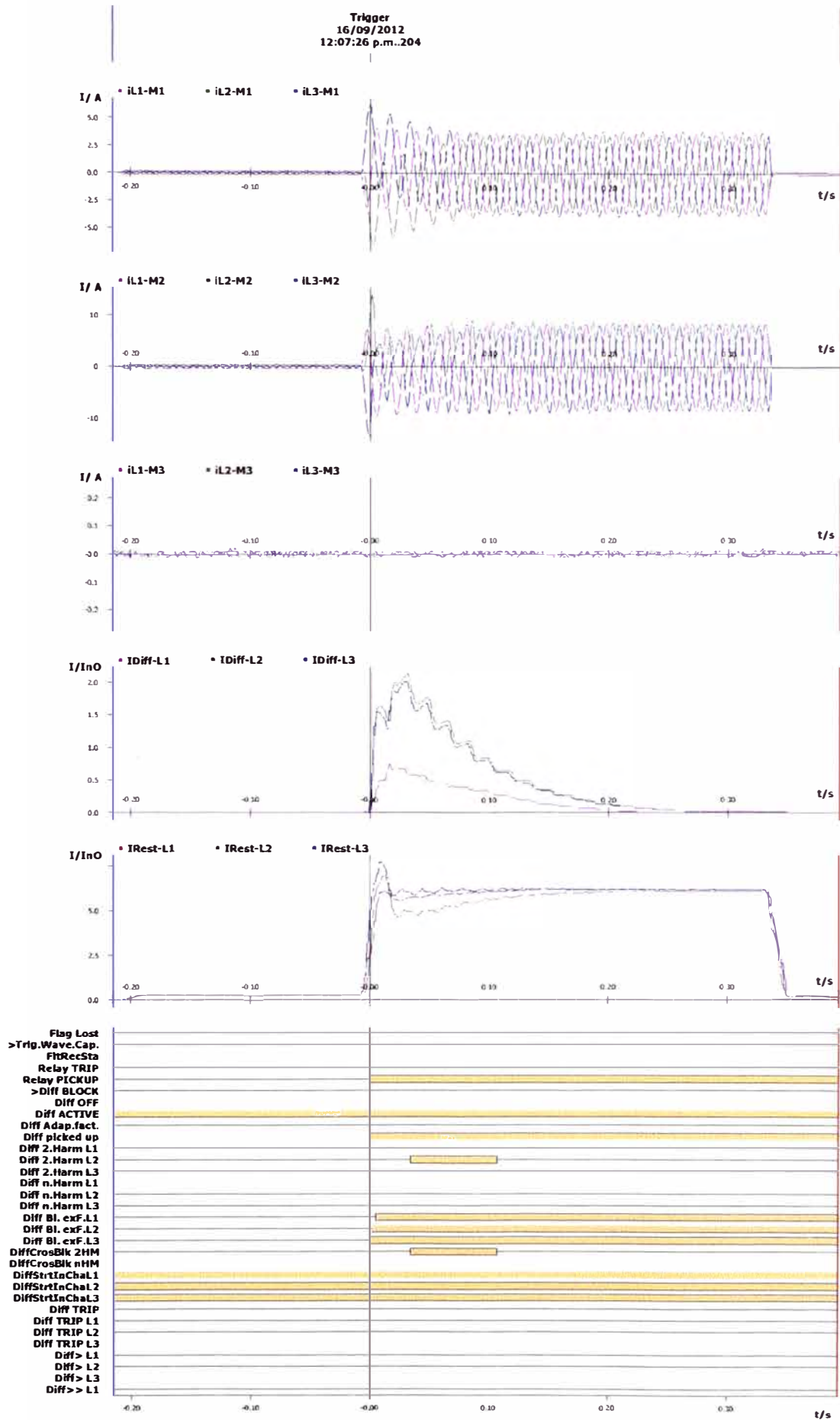
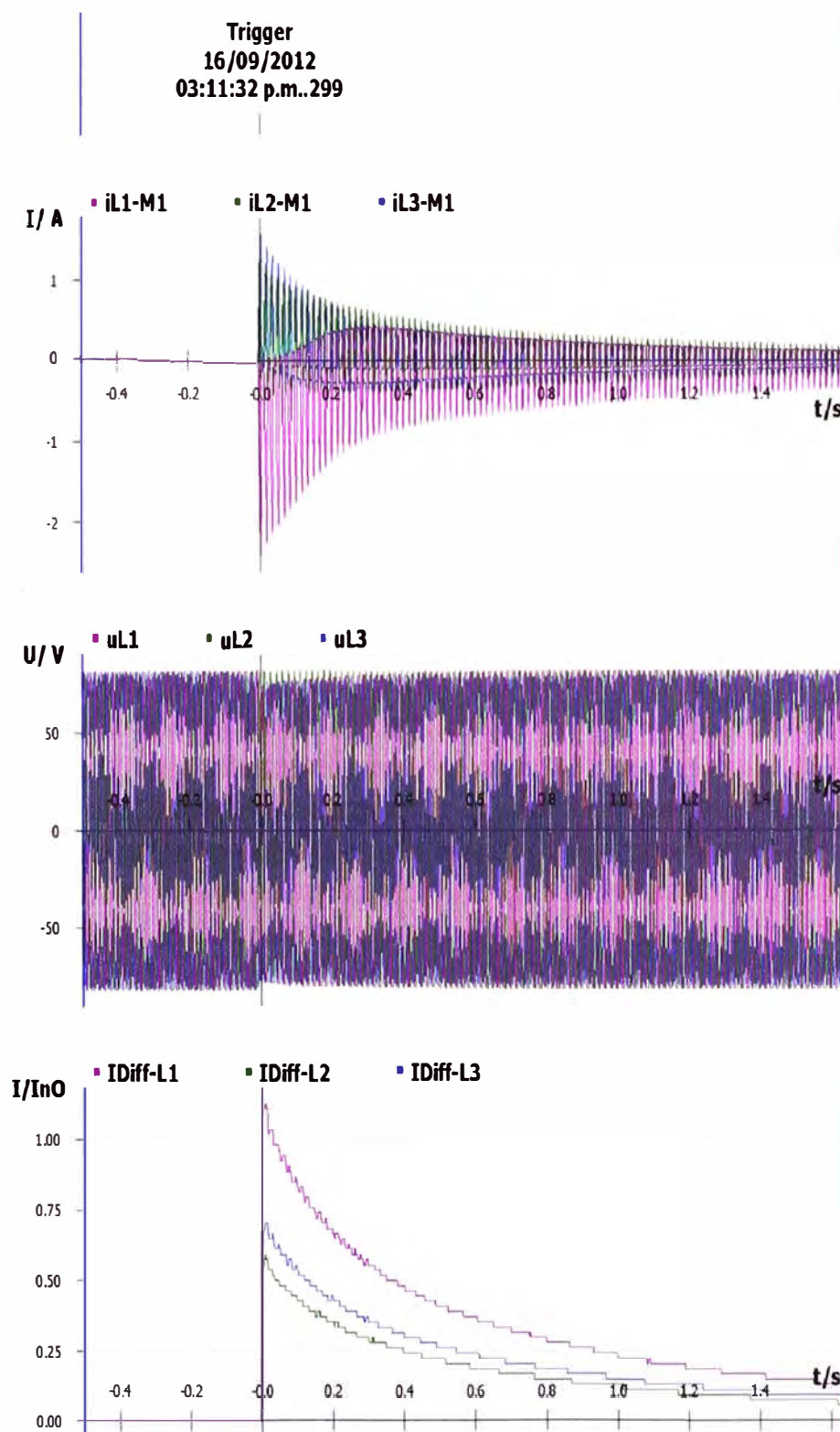


Fig. 6.9 Oscilografía para una falla externa con saturación de un TC

6.3.6 Energización real del transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV

En la figura 6.10, se muestra la oscilografía real de la energización del transformador de la subestación de Trujillo Nor-Oeste, que el relé registró el día 16 de setiembre de 2012, ya que ese día se llevo a cabo el mantenimiento programado de dicha subestación de 7:00 am hasta las 3:11 pm.



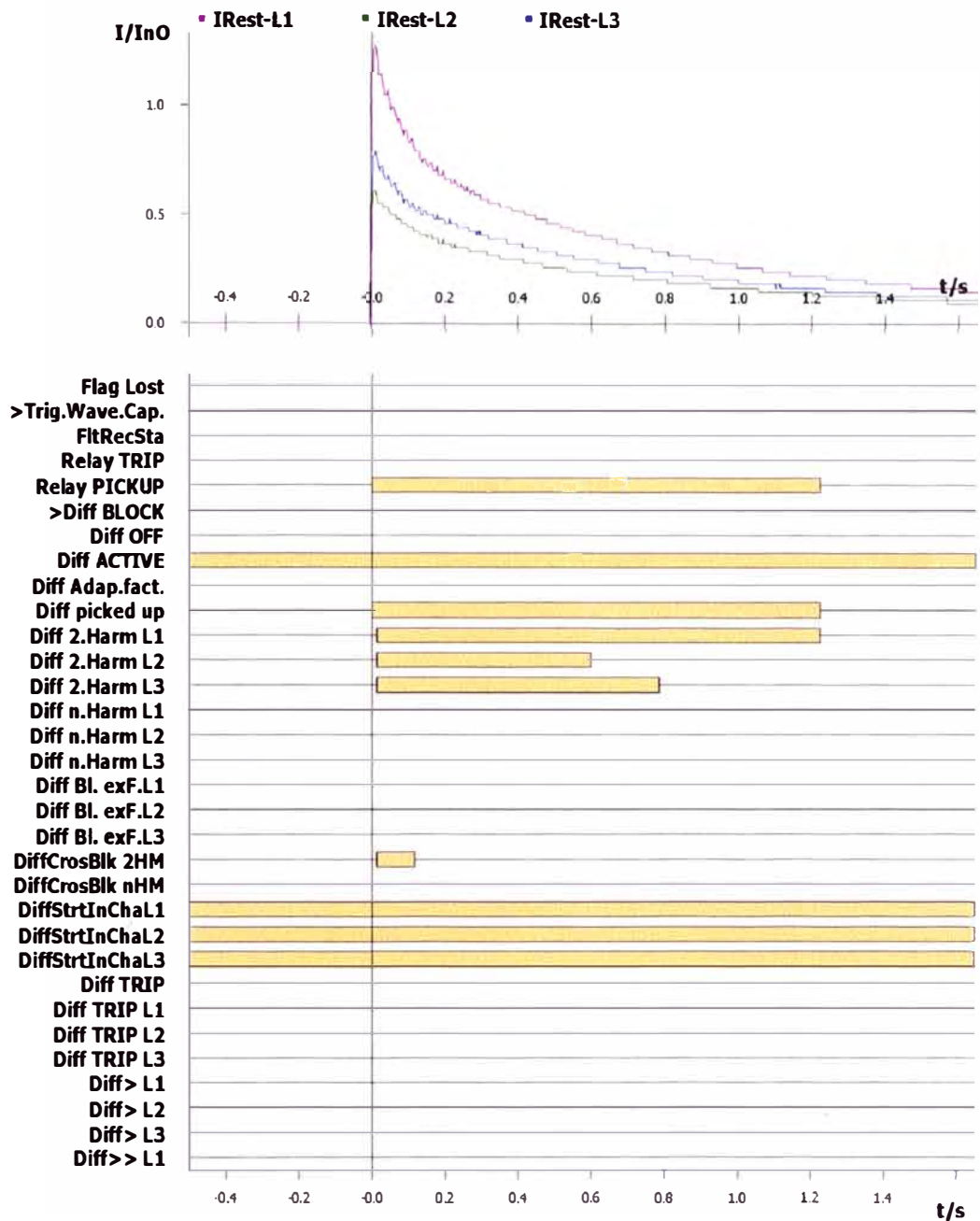


Fig. 6.10 Oscilografía de la energización real del transformador de potencia de la subestación Trujillo Nor-Oeste 138/23.8/10.5 kV

En la figura 6.10, se puede observar que las corrientes diferenciales y de restricciones son más 1 p.u. en el instante que se energiza el transformador, lo cual me indica que entra a la zona de operación pero el relé es bloqueado por la segunda armónica ya que las tres fases pasan el valor de ajuste del 15%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El relé Siemens 7UT613, es un relé de tecnología numérico de protección diferencial, y es por ello que simplifica los procesamientos de las señales y a su vez soluciona mediante algoritmos internos matemáticos las dificultades que se presentan como:
 - Las magnitudes de las corrientes en el lado de alta, media y baja del transformador de potencia son diferentes.
 - Las conexiones estrella – delta en los transformadores de potencia provoca una diferencia angular de las corrientes.
 - Los cambios automáticos de los taps del transformador de potencia varia la relación de corrientes en los devanados y esto provoca una corriente diferencial.
 - La desigualdad de las corrientes nominales secundarias de los transformadores de corriente provoca una corriente diferencial errónea.
 - La saturación de los transformadores de corrientes ante cortocircuitos externos, este hecho puede provocar la operación errónea del relé diferencial.
 - La energización del transformador de potencia en vacío, provoca la operación errónea del relé diferencial.
 - La corriente diferencial que se presenta ante fallas a tierra externa, este hecho puede provocar la operación errónea del relé diferencial si no elimina la corriente homopolar.
2. La magnitud de la corriente de inserción que se presenta en la energización del transformador de potencial va a depender de los siguientes factores:
 - El tiempo de cierre del interruptor.
 - El valor de la tensión.
 - Flujo remanente en el núcleo magnético en el transformador de potencia.
 - Tamaño del sistema eléctrico.

Para ajustar el tiempo del cross blocking se debe de analizar en el peor caso, el cual es con flujo remanente máximo positivo y la tensión pase por cero y en aumento, ya que en esta condición el contenido de la segunda armónica es bajo en los primeros ciclos.

3. Para fallas internas en el primer ciclo se presenta una corriente diferencial de la segunda armónica y después cae a cero esto se debe a la componente DC de la corriente de falla.
4. Para la saturación de los transformadores de corriente para fallas externas se comprobó que el relé no actuó y lo bloqueo porque la curva de la corriente diferencial y de restricción entraron a la zona de “saturación de los transformadores de corrientes”, y así se evito el disparo indeseado.
5. Es muy importante verificar en campo si las conexiones del neutro del estrella del transformador de potencia se encuentran aterradas o no, ya que de esto va a depender los ajustes de STARPOINT OF SIDE, ya que mediante este ajuste se le indica al relé que elimine la corriente homopolar que se presenta en una falla a tierra externa, y así evitar la operación errónea del relé diferencial.
6. También es importante verificar si entre el lado delta del transformador de potencia y los transformadores de corriente se encuentra un transformador ZIGZAG que se utiliza para aterrar sistemas aislados, tal como se muestra en la figura 3.1, se recomienda cambiar el siguiente ajuste: 0333 STARPOINT OF SIDE 3 IS = Earthed, Y de esa manera se evita que el relé opere para fallas a tierra externas.
7. Es muy importante verificar la orientación de los puntos estrella de los transformadores de corriente, como se explica en el capítulo 3. Ya que si estuviese mal ajustado ocasionaría una mala operación del relé diferencial.

ANEXOS

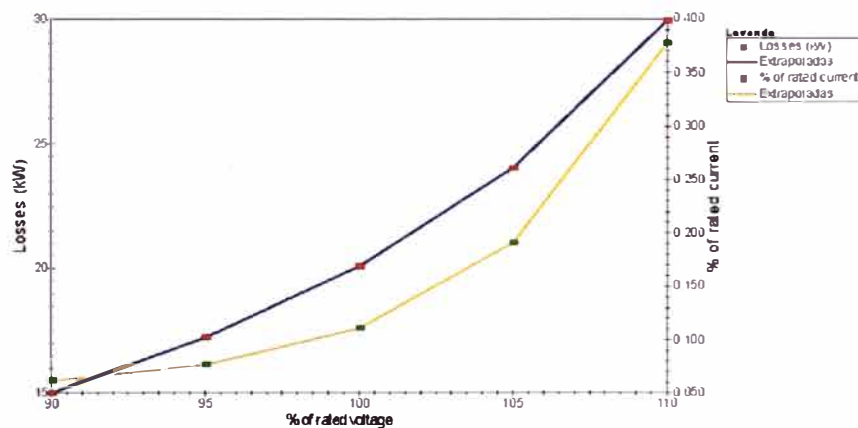
ANEXO A: Pruebas FAT del transformador de potencia de la S.E. Trujillo Nor-Oeste

PROTOCOLO DE ENSAYOS		
<p><u>Cliente:</u> HIDRANDINA</p> <p>Dirección del Cliente: Av. Camino Real N° 348 Edificio El Pilar piso 13 San Isidro - Lima.</p>	<p><u>Máquina Ensayada:</u></p> <p>Potencia Nominal : Tensión: Intensidad Nominal: BIL: Conexión: Grupo de Conexión: Frecuencia: Refrigeración: Calentamiento Máx. del Aceite: Calentamiento Medio del Cobre:</p>	<p><u>N° de Serie:</u> 200739 Transformador Trifásico</p> <p>50/60 – 20/24 – 30/36 MVA 138 ± 10 x 1% / 23.8 / 10.5 kV 251.02 / 582.2 / 1979.5 A 550 / 125 / 75 kV Yo / yo / d YNyn0d11 60 Hz ONAN / ONAF 60 °C 65 °C</p>
<p><u>Referencia de ABB:</u></p> <p>Referencia del Producto: Transformador Trifásico N° de Pedido: Proyecto 129017 N° de Placa: 200739 Inspección y Plan de Ensayos: -</p>		
<p><u>Ensayos Realizados y Aprobados:</u></p> <p>Relación Resistencia de Arrollamientos Pérdidas e Intensidad de Vacío Pérdidas en Carga y Tensión de Cortocircuito Pérdidas en los Tres Arrollamientos Rendimiento Regulación Sobretensión Aplicada Sobretensión Inducida Sobretensión Inducida con medida de DP Resistencia del Aislamiento Capacidad y F.P. del Aislamiento Impedancia Homopolar Impulso Atmosférico Nivel de Ruido Calentamiento</p>	<p><u>Normas Aplicadas:</u> IEC</p> <p><u>Recepcionado por:</u> Ing. Isaac Diaz. Interventor Hidroandina</p> <p><u>Comentarios:</u> Informe Final de Pruebas en Fábrica</p>	
<p><u>Planta:</u> Asea Brown Boveri Ltda. Calle 16 # 15-124 La Popa Dosquebradas (Risaralda-Colombia) ISO 9001 - ISO 14001-OSHAS18001-BASC</p>	<p><u>Departamento de Ensayo:</u> Calidad Integral (PTQi)</p> <p><u>Fecha de Recepción:</u> 22-Oct-2009 <u>Fecha de Terminación:</u> 27-Oct-2009 <u>Revisado por:</u> Ing. Javier Muñoz</p>	
<p><u>Realizado por:</u> Ing. Juan Carlos Vélez M.</p>	<p><u>Firma:</u> <i>Juan Carlos Vélez M.</i> Test Room Engineer</p>	
<p><u>Firma:</u> <i>Javier Muñoz</i> Quality Manager</p>	<p><u>Firma:</u> <i>Javier Muñoz</i> Quality Manager</p>	

PROTOCOLO DE ENSAYOS Pérdidas e Intensidad de Vacío

Terminales Alimentados:	3U-3V-3W	Posición:	-
1° Terminales Abiertos:	2U-2V-2W-2N	Posición:	-
2° Terminales Abiertos:	1U-1V-1W-1N	Posición:	11
Potencia Base:	30 MVA	Potencia Nominal:	30 MVA
Temperatura Media del Aceite:	27.7 °C	Frecuencia:	60 Hz

Valores Medidos							Pérdidas ¹ (kW)	Intensidad	Valores Garantizados	
V	1.11xV _{media} (kV)	V _{eficaz} (kV)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	Pérdidas (kW)			Pérdidas (kW)	Intensidad
110 %	11.54	12.37	6.508	6.202	5.972	29.94	27.79	0.38 %	-	-
105 %	11.01	11.44	3.446	3.062	2.944	24.05	23.11	0.19 %	-	-
100 %	10.50	10.71	2.105	1.688	1.689	20.09	19.68	0.11 %	25.30	1.00 %
95 %	9.966	10.06	1.511	1.103	1.175	17.24	17.08	0.077 %	-	-
90 %	9.442	9.473	1.245	0.8455	0.9637	15.01	14.96	0.062 %	-	-



Notas: El equipo pasó satisfactoriamente la prueba y cumple con los valores garantizados de pérdidas de vacío.

Equipo de medida: Analizador de Potencia
 Marca LEM NORMA D6000
 No. interno: E-0231

Prueba realizada por : Luis Ángel Soto - Edilson Londoño

¹ Pérdidas corregidas a la onda senoidal

Fecha:
23-Oct-2009

Ingeniero de Ensayo:
Juan Carlos Vélez M.

Departamento de Ensayo:
Calidad Integral (PTQ1)

PROTOCOLO DE ENSAYOS
Pérdidas en Carga y Tensión de Cortocircuito

Condición de Ensayo: AT vs MT
Terminales Alimentados: 1U-1V-1W-1N
1° Terminales Cortocircuitados: 2U-2V-2W-2N
Temperatura de Ref: 75.0 °C
Potencia Base: 20 MVA

Conexión			Medido			Corregido ¹		Garantizado	
Posiciones		U Nominal Terminal Alimentado (kV)	Temp. (°C)	Tensión (kV)	Intensidad (A)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)
Allmentado	1° Cto								
1	-	151.80	29.5	13.394	75.937	83.623	8.84	-	-
11	-	138.00	29.5	14.822	83.533	88.395	10.76	-	-
21	-	124.20	29.5	16.916	92.867	98.982	13.64	-	-

Condición de Ensayo: AT vs BT
Terminales Alimentados: 1U-1V-1W-1N
1° Terminales Cortocircuitados: 3U-3V-3W
Temperatura de Ref: 75.0 °C
Potencia Base: 30 MVA

Conexión			Medido			Corregido ¹		Garantizado	
Posiciones		U Nominal Terminal Alimentado (kV)	Temp. (°C)	Tensión (kV)	Intensidad (A)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)
Allmentado	1° Cto								
1	-	151.80	29.5	16.365	113.97	96.635	10.79	-	-
11	-	138.00	29.5	10.089	90.800	95.104	10.11	107.2	10.87
21	-	124.20	29.5	10.375	116.50	104.41	10.00	-	-

Condición de Ensayo: MT vs BT
Terminales Alimentados: 2U-2V-2W-2N
1° Terminales Cortocircuitados: 3U-3V-3W
Temperatura de Ref: 75.0 °C
Potencia Base: 20 MVA

Conexión			Medido			Corregido ¹		Garantizado	
Posiciones		U Nominal Terminal Alimentado (kV)	Temp. (°C)	Tensión (kV)	Intensidad (A)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)	Pérdidas (kW)	Impe- dancia (%)
Allmentado	1° Cto								
-	-	23.800	29.5	4.8757	484.93	99.597	20.50	-	-

Notas: El equipo pasó satisfactoriamente la prueba y cumple con los valores garantizados de pérdidas e impedancia de cortocircuito.

Equipo de medida: Analizador de Potencia
 Marca LEM NORMA D6000
 No. interno: E-0231

Prueba realizada por: Luis Angel Soto - Holman Ramirez - Edilson Londoño.

¹ Corregido a la Potencia Base y la Temperatura de Referencia

Fecha:
23-Oct-2009

Ingeniero de Ensayo:
Juan Carlos Vélez M.

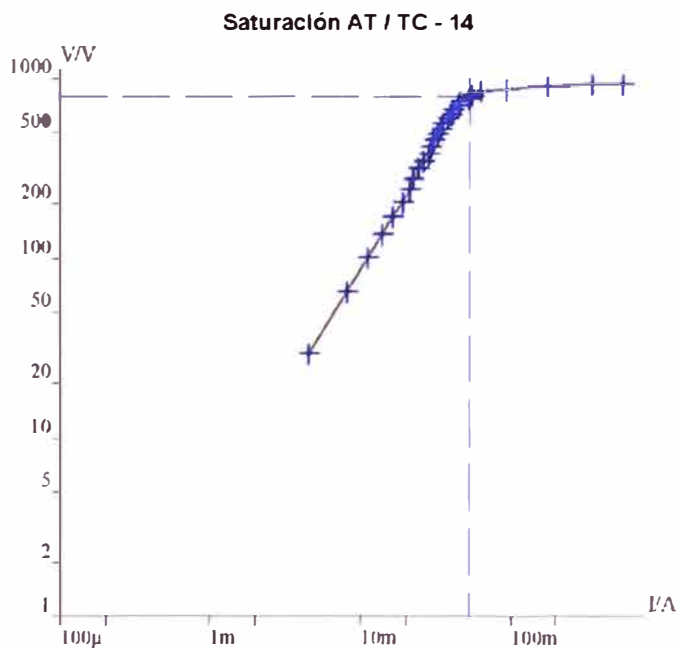
Departamento de Ensayo:
Calidad Integral (PTQi)

ANEXO B: Pruebas FAT de los transformadores de corriente

	PROTOCOLO DE PRUEBAS ELECTRICAS	
CURVA DE SATURACIÓN AT / TC - 14		

CLIENTE : Hidrandina	SET : Trujillo Noroeste
DENOMINACION : Transformador de Potencia	AÑO DE FABRICACION. : 2009
MARCA : ABB	FASES : 3
N° DE SERIE : 200739	FRECUENCIA : 60 Hz
POTENCIA MVA : 50 / 20 / 30	DIAGRAMA VECTORIAL : YNyn0d11
TENSION (KV) : 138 / 23.8 / 10.5	

V	I
928.20 V	553.45 mA
917.88 V	340.01 mA
900.40 V	174.43 mA
875.48 V	92.638 mA
843.99 V	63.437 mA
808.99 V	54.958 mA
774.40 V	52.397 mA
739.46 V	45.549 mA
704.18 V	43.872 mA
668.69 V	40.766 mA
633.26 V	40.086 mA
597.78 V	37.890 mA
562.68 V	35.317 mA
526.92 V	34.311 mA
491.71 V	32.107 mA
455.93 V	30.577 mA
420.55 V	29.223 mA
384.95 V	28.169 mA
349.51 V	26.067 mA
314.03 V	24.216 mA
278.35 V	22.492 mA
242.88 V	20.910 mA
207.17 V	18.829 mA
171.77 V	16.339 mA
136.21 V	13.853 mA
100.61 V	11.128 mA
65.10 V	8.0490 mA
29.54 V	4.5530 mA



Calculo Punto de Saturación: IEC/BS
V Infl.: 784.45 V
I infl: 53.140 mA

EQUIPO UTILIZADO	
MARCA :	OMICRON
N° SERIE :	HA156L (V1)
MODELO :	CPC 100

EJECUTOR	R. Vasquez Q.	REVISADO	R. Vasquez Q.
FECHA	04-Mar-10	FECHA	22-Mar-10

PROTOCOLO DE PRUEBAS ELECTRICAS

CURVA DE SATURACIÓN BT / TC - 18

CLIENTE : Hidrandina

SET : Trujillo Noroeste

DENOMINACION : Transformador de Potencia

AÑO DE FABRICACION. : 2009

MARCA : ABB

FASES : 3

N° DE SERIE : 200739

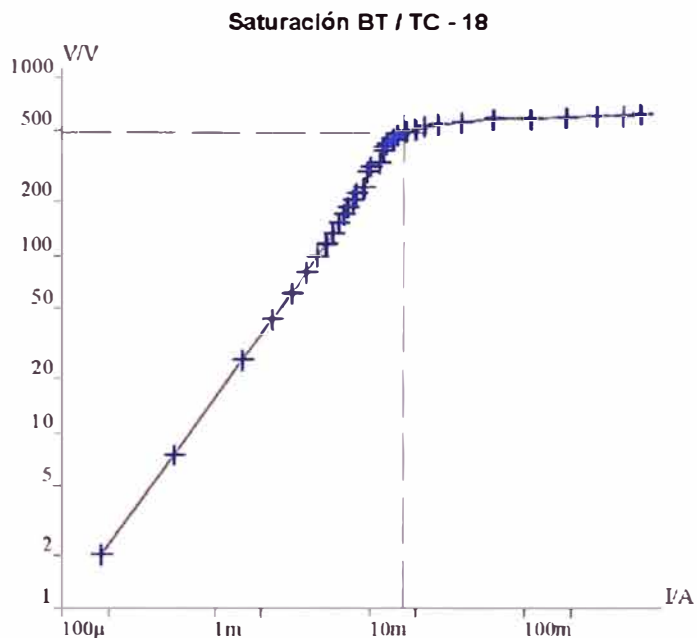
FRECUENCIA : 60 Hz

POTENCIA MVA : 50 / 20 / 30

DIAGRAMA VECTORIAL : YNyn0d11

TENSION (KV) : 138 / 23.8 / 10.5

V	I
623.22 V	564.31 mA
618.51 V	429.60 mA
612.16 V	292.22 mA
604.35 V	183.81 mA
593.82 V	107.95 mA
580.98 V	62.748 mA
565.90 V	39.059 mA
549.37 V	27.445 mA
531.92 V	22.190 mA
514.13 V	19.474 mA
496.39 V	17.114 mA
478.74 V	15.098 mA
460.70 V	14.215 mA
442.60 V	13.646 mA
424.49 V	12.775 mA
406.41 V	12.081 mA
388.18 V	11.995 mA
334.03 V	11.460 mA
315.95 V	10.115 mA
297.73 V	9.5940 mA
243.30 V	9.0610 mA
225.28 V	8.1980 mA
207.18 V	7.6300 mA
189.01 V	7.1660 mA
170.84 V	6.7010 mA
152.71 V	6.2200 mA
134.60 V	5.7100 mA
116.43 V	5.1420 mA
98.34 V	4.5310 mA
80.21 V	3.8680 mA
62.04 V	3.1340 mA
43.88 V	2.3380 mA
25.74 V	1.4950 mA
7.52 V	538.00 µA
2.03 V	183.00 µA



Calculo Punto de Saturación: IEC/BS

V infl.: 492.17 V

I infl: 16.615 mA

EQUIPO UTILIZADO	
MARCA :	OMICRON
N° SERIE :	HA156L (V1)
MODELO :	CPC 100

EJECUTOR	R. Vasquez Q.	REVISADO	R. Vasquez Q.
FECHA	04-Mar-10	FECHA	22-Mar-10

PROTOCOLO DE PRUEBAS ELECTRICAS

CURVA DE SATURACIÓN TERC / TC - 24

CLIENTE : Hidrandina

SET : Trujillo Noroeste

DENOMINACION : Transformador de Potencia

AÑO DE FABRICACION. : 2009

MARCA : ABB

FASES : 3

N° DE SERIE : 200739

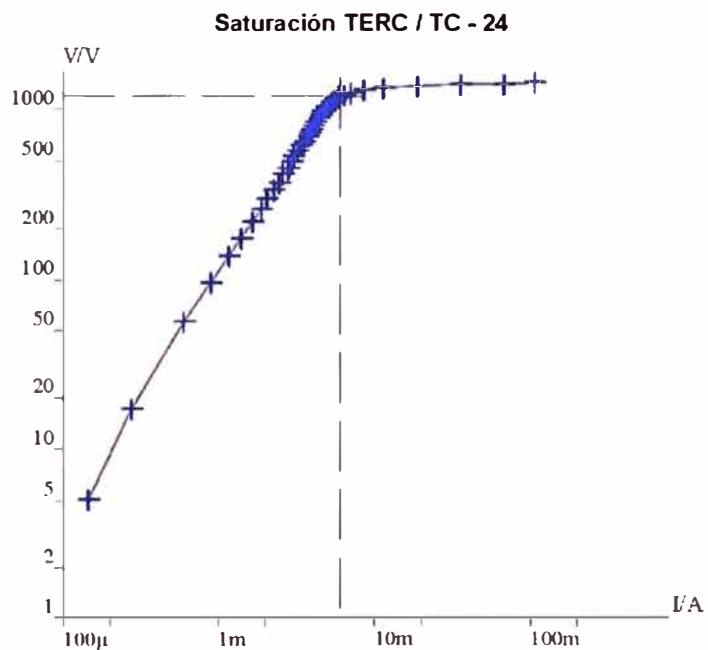
FRECUENCIA : 60 Hz

POTENCIA MVA : 50 / 20 / 30

DIAGRAMA VECTORIAL : YNyn0d11

TENSION (KV) : 138 / 23.8 / 10.5

V	I
1445.23 V	107.13 mA
1425.90 V	67.250 mA
1400.94 V	36.149 mA
1370.91 V	19.040 mA
1335.42 V	11.513 mA
1296.86 V	8.4990 mA
1257.78 V	7.1370 mA
1218.21 V	6.3950 mA
1178.45 V	5.9080 mA
1138.66 V	5.5680 mA
1098.82 V	5.2960 mA
1058.87 V	5.0640 mA
1018.89 V	4.8580 mA
979.06 V	4.6720 mA
939.10 V	4.5060 mA
899.04 V	4.3550 mA
859.17 V	4.2130 mA
819.15 V	4.0820 mA
779.01 V	3.9660 mA
738.83 V	3.8520 mA
698.74 V	3.7140 mA
658.72 V	3.5540 mA
618.60 V	3.3870 mA
578.45 V	3.2220 mA
538.36 V	3.0690 mA
498.36 V	2.9260 mA
458.25 V	2.7770 mA
418.21 V	2.6110 mA
378.17 V	2.4340 mA
338.03 V	2.2500 mA
297.97 V	2.0580 mA
257.95 V	1.8590 mA
217.83 V	1.6490 mA
177.76 V	1.4220 mA
137.69 V	1.1720 mA
97.68 V	901.00 µA
57.52 V	607.00 µA
17.49 V	280.00 µA
5.08 V	145.00 µA



Calculo Punto de Saturación: IEC/BS
V infl.: 1185.22 V
I infl: 5.9890 mA

EQUIPO UTILIZADO	
MARCA :	OMICRON
N° SERIE :	HA 156L (V1)
MODELO :	CPC 100

EJECUTOR	R. Vasquez Q.	REVISADO	R. Vasquez Q.
FECHA	04-Mar-10	FECHA	22-Mar-10

BIBLIOGRAFIA

- [1] Siemens AG, “Siprotec - Differential Protection 7UT6”, Dept. PTD PA D DM, Germany, 2003.
- [2] Gerhard Ziegler. “Numerical Differential Protection – Principles and Applications”, Germany, first edition, 2005.
- [3] Protocolos Pruebas Eléctricas a Transformador S.E. Trujillo Noroeste-Hidrandina.
- [4] Protocolos Pruebas Eléctricas a los Transformadores de corrientes S.E. Trujillo Noroeste-Hidrandina.
- [5] Poveda M., “Corrientes Transitorias de Magnetización en Transformadores”, Tesis EPN, Facultad de Ingeniería Electrica-1971.
- [6] Rurales L., “Simulaciones de Transformadores”, Tesis EPN, Facultad de Ingeniería Eléctrica – 1978.
- [7] Dutan L., “Modelamiento y Análisis del Relé Diferencial para Transformadores de Potencia con conexión YYD usando ATP-EMTP”, Tesis EPN, Facultad de Ingeniería Electrica-2008.