



## APLICACIONES INDUSTRIALES

# METODOLOGÍA PARA EL AJUSTE DE LAS RESTRICCIONES ARMÓNICAS EN LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL PORCENTUAL DE TRANSFORMADORES

Ing. Yoel Rosales Hernández

Ing. Lázaro Guerra Hdez

Dr. Antonio Martínez García

Est. Denis Arce López

## Resumen / Abstract

El presente trabajo tiene como objetivo establecer un método para ajustes de las pendientes de las restricciones armónicas en la protección diferencial de transformadores.

Palabras claves: Protección diferencial porcentual, segundo armónico, quinto armónico.

*This paper introduces a procedure to determine the slope of the percentage differential characteristic of a differential protection for power transformers.*

*Key words: Percentage differential, second harmonic, fifth harmonic.*

## Introducción.

Desde hace más de 25 años el uso de restricciones armónicas de diferentes formas ha resultado la forma más efectiva y económica de evitar la operación incorrecta durante la energización de transformadores de potencia. Se comenzó utilizando restricciones con el segundo armónico y en los últimos años se han incluido también restricciones con el quinto armónico, motivado por el uso de núcleos con curvas de magnetización con menos pérdidas histerésicas (características con lazos histerésicos más altos y estrechos) los que propician en caso de sobre voltajes una sobre excitación más rápida y peligrosa del transformador, (y lo que nos interesa en el caso que analizamos) una mayor composición de 5to armónico que los niveles tradicionales, lo que motivó la inclusión de otra restricción con el 5to armónico en las protecciones diferenciales de transformadores que usan este principio de restricción para detectar condiciones de inrush.

Los fabricantes de este tipo de protección normalmente suministran los rangos de variación de las pendientes de estas restricciones y dan valores típicos de ajuste, que evidentemente no pueden corresponder a los ajustes más efectivos de cada caso particular y por tanto tienen un alto % de seguridad que pueden provocar una pequeña demora en la operación en caso de cortocircuitos que pueden ser reducidos con un estudio apropiado que es precisamente lo que se propone en el presente trabajo.

## Desarrollo.

Paso1. Determinación de la peor condición inicial de energización de un transformador trifásico, con un determinado grupo de conexión, con el secundario abierto. Cálculo de la máxima corriente de línea en cada fase.

Para poder determinar lo anterior es necesario calcular considerando diferentes condiciones iniciales de energización del transformador,  $U_a=0$ ,  $U_{maxsen30}$ ,  $U_{maxsen60}$ , .....  $U_{maxsen180}$  en pasos de 30 grados, las corrientes de inrush de fase y de acuerdo con el grupo de conexión las de línea por las tres fases, para ello nos auxiliamos de los algoritmos desarrollados según [ 1 ] en [ 2 ] para el cálculo de las corrientes de inrush con pasos de 3 grados, con el secundario abierto.

En la figura 1 se muestran las corrientes de línea de cada una de las fases para una conexión delta- y5 obtenidas para condiciones iniciales en  $t=0$ . En el cálculo de la corriente de inrush hay que obtener por reducción de redes la red equivalente que está energizando al transformador en el régimen de máximo voltaje en barra, pues la relación X/R de la fuente equivalente que lo alimenta determina la caída de la corriente de inrush. En la tabla 1 se muestran los picos iniciales de estas corrientes para diferentes condiciones iniciales obtenidas de las diferentes modelaciones.

Condición                      Pico inicial de corriente

$$q_a = 0^\circ \quad I_a = 135 \text{ A} , I_b = 135 \text{ A} , I_c = 60 \text{ A}.$$

$$q_a = 30^\circ \quad I_a = 160 \text{ A} , I_b = 96 \text{ A} , I_c = 98 \text{ A}.$$

$$q_a = 60^\circ \quad I_a = 133 \text{ A} , I_b = 60 \text{ A} , I_c = 133 \text{ A}.$$

$$q_a = 90^\circ \quad I_a = 96 \text{ A} , I_b = 98 \text{ A} , I_c = 160 \text{ A}.$$

$$q_a = 120^\circ \quad I_a = 60 \text{ A} , I_b = 133 \text{ A} , I_c = 134 \text{ A}.$$

$$q_a = 150^\circ \quad I_a = 98.7 \text{ A} , I_b = 160 \text{ A} , I_c = 96 \text{ A}.$$

$$q_a = 180^\circ \quad I_a = 133 \text{ A} , I_b = 133 \text{ A} , I_c = 60 \text{ A}..$$

Tabla 1. Variación del primer pico de las corrientes de inrush por línea con secundario abierto para diferentes condiciones iniciales

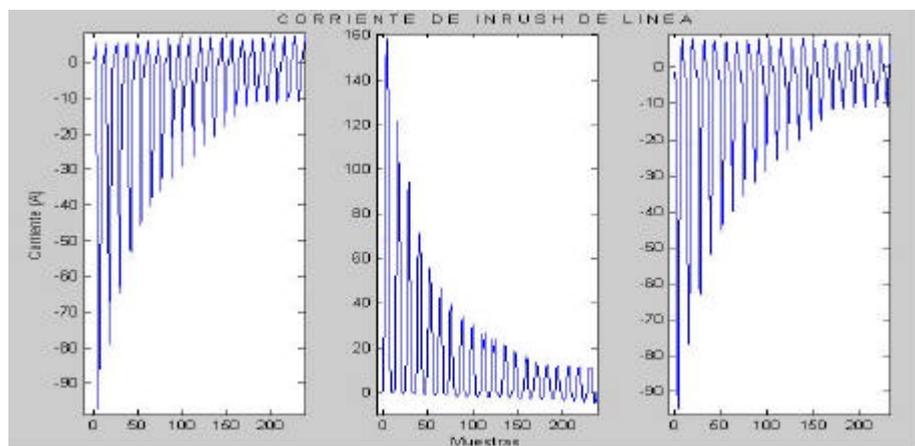
Paso2.- Determinación a partir de todas las combinaciones de corrientes por las líneas para todas las condiciones iniciales señaladas en el punto 1, los valores de  $I_1$  e  $I_2$  o sea  $I_{H2} = \text{mod}[IH2a] + \text{mod}[IH2b] + \text{mod}[IH2c]$ ,  $I_{H5} = \text{mod}[IH5a] + \text{mod}[IH5b] + \text{mod}[IH5c]$ , para determinar en que régimen de energización las restricciones armónicas toman el menor valor de su pico inicial (pues la velocidad de caída lo da el sistema físico fuente transformador que es común en todos los casos).

$q_a = 60^\circ$	72 A
$q_a = 90^\circ$	69 A
$q_a = 120^\circ$	66 A
$q_a = 150^\circ$	66 A
$q_a = 180^\circ$	66 A

Tabla 2. Variaciones del primer pico de la corriente del segundo armónico por línea en función de las condiciones iniciales.

En el ejemplo que se corrió esto corresponde a fase inicial de la fase a igual a 180 grados,

Fig.1 Corrientes de inrush fases a,b y c



En la figura 2 se muestran gráficas de las variaciones en el tiempo de  $I_{H2}$  e  $I_{H5}$  para diferentes condiciones iniciales, obtenidos a partir de la transformada discreta de Fourier para una ventana de un ciclo, mediante los programas desarrollados en [ 4 ]. En la tabla 2 se muestran las variaciones de los picos iniciales de las corrientes del segundo armónico por línea en función de las condiciones iniciales, el quinto armónico toma valores menores pero la variación es similar.

Después de este paso se puede conocer cuando las restricciones armónicas son mínimas y a partir de los resultados del primer paso conocer para esas mismas condiciones iniciales la fase que toma la mayor intensidad de corriente, que será la más crítica en cuanto a posible operación incorrecta.

Condición inicial de inrush	Valor del primer pico Armónico 2do.
-----------------------------	-------------------------------------

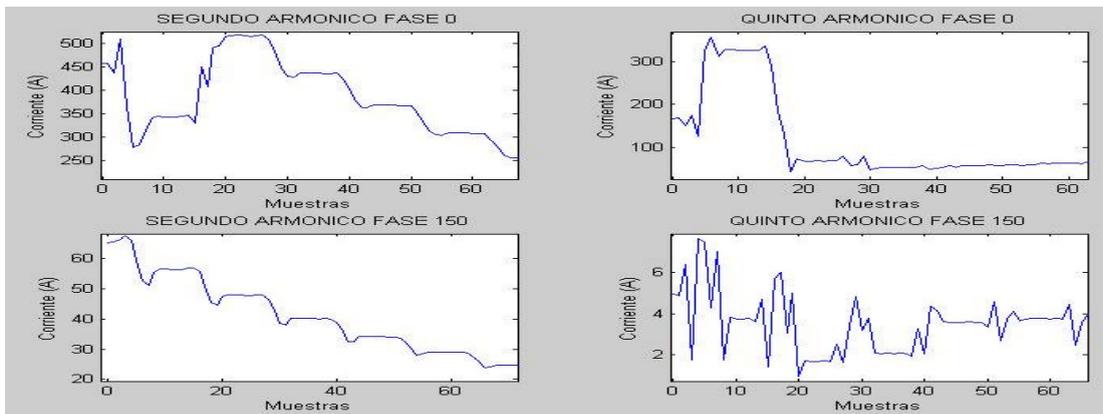
$q_a = 0^\circ$	520 A
$q_a = 30^\circ$	74 A
$q_a = 60^\circ$	72 A
$q_a = 90^\circ$	69 A
$q_a = 120^\circ$	66 A
$q_a = 150^\circ$	66 A
$q_a = 180^\circ$	66 A

Tabla 2. Variaciones del primer pico de la corriente del segundo armónico por línea en función de las condiciones iniciales.

En el ejemplo que se corrió esto corresponde a fase inicial de la fase a igual a 180 grados, para cuyo caso la fase que toma más intensidad de corriente es la fase b  $I_b = 133$  A, como pico inicial (ver tabla No.1). En 180 grados las restricciones armónicas están muy parecidas a el caso de 150 grados pero con menos corriente máxima por las fases por lo que el caso crítico para modelar fue 150 grados de fase inicial y  $I_b = 160$  A .

**Paso3.-** Como se conoce, la pendiente de la característica diferencial porcentual fundamental debe haber sido fijada previamente por los procedimientos tradicionales (30%) por lo que conocida esa pendiente de ajuste y la  $I_{umbral}$  de disparo (ver fig.3) se determina para la condición de menor restricción armónica los valores de corrientes de operación y restricción de la fundamental y de las restricciones armónicas,  $I_{op}$ ,  $I_{rest}$ ,  $I_{H2}$  e  $I_{H5}$  respectivamente en un tiempo correspondiente al que deja de existir señal de disparo para las condiciones fijadas en el punto 2, utilizando el algoritmo de este tipo de protección explicado en [ 1 ] y desarrollado en [ 2 ], en nuestro caso se utilizaron 750 valores con tiempo de muestreo de 1.38 milisegundos.

Fig.2 Variaciones del 2do y 5to armónicos.



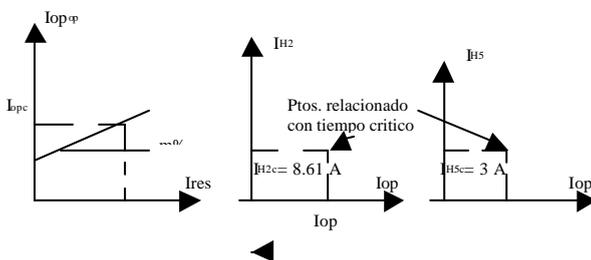
**Paso4.-** Conocidas las corrientes de operación y de restricción y la característica de corriente de operación versus corriente de restricción cuya pendiente debe haber sido fijada previamente, suponemos en nuestro caso 0.3, se calcula el instante en que deja de existir señal de operación en la fase con mayor intensidad de corriente, la fase b 160 A pico de inrush, y al mismo tiempo como la corriente de operación crítica  $I_{op}$  en los tres gráficos de la figura 3 es el mismo en nuestro caso 13.22 A conocer ese cortocircuito, para él, si es posible la pendiente debe ajustarse para que alrededor de un ciclo ya no restrinja la operación de la protección. Es evidente que el cc. que da más restricción armónica es el monofásico que ocurre en el momento de energizar el transformador con el secundario abierto, para determinadas condiciones iniciales que es necesario determinar. De los estudios efectuados para estas condiciones esto corresponde a una fase inicial de la fase a de cero grados para un cortocircuito monofásico estando las otras fases abiertas..

se puede determinar por interpolación cuál es el valor de  $I_{H2}$  e  $I_{H5}$  que le corresponde a  $I_{op}$  ver figura 3 y por tanto se conocerá la pendiente máxima que podrán tener ambas restricciones para que no haya operación innecesaria por inrush y el tiempo en que dejarán de existir restricciones armónicas, debiendo ajustarse el por debajo de esos valores con un cierto por ciento de seguridad, o sea debe de aumentarse el tiempo en que seguirán actuando las restricciones armónicas respecto al tiempo crítico. En nuestra modelación  $I_{H2c} = 8.61$  A y  $I_{H5c} = 3$  A, por lo que las pendientes máximas corresponderán a 65% en el segundo y 22.6% en el 5to armónico.

Con lo anterior solo se asegura que no habrá operación, en condiciones normales para lograr un ajuste correcto de la pendiente de las restricciones armónicas es necesario que en condiciones de cc. la demora de la operación debida a las restricciones sea lo menor posible, para evitar calentamientos innecesarios, para ello la pendiente no debe ser muy baja, en nuestro caso según [ 3 ] alrededor de un ciclo. Es importante analizar cual es el cortocircuito en que se producirá una mayor restricción armónica, si pudiéramos conocer ese cortocircuito, para él, si es posible la pendiente debe ajustarse para que alrededor de un ciclo ya no restrinja la operación de la protección. Es evidente que el cc. que da más restricción armónica es el monofásico que ocurre en el momento de energizar el transformador con el secundario abierto, para determinadas condiciones iniciales que son necesario determinar. De los estudios efectuados para estas condiciones esto corresponde a una fase inicial de la fase a de cero grados para un cortocircuito monofásico estando las otras fases abiertas..

Paso 5.- Para la condición de cortocircuito monofásico en el secundario del transformador se calculan  $I$  e  $I$  y la  $I_{res}$  como variables en el tiempo para diferentes condiciones iniciales resultando la más crítica por tener la mayor composición de armónico la que corresponde

Fig.3 Gráficos para determinar pendientes armónicas.

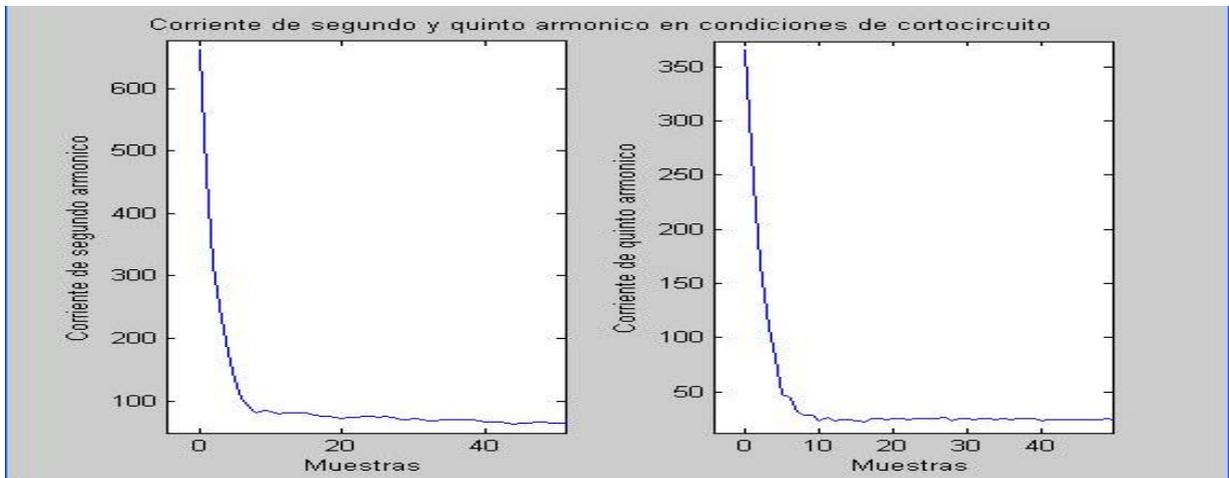


con la fase inicial en la fase a =0, ver figura 4 y se calcula en un tiempo de alrededor de un ciclo (en nuestro caso 1.25 ciclos) los valores de las corrientes armónicas por lo que se podrá con ese valor y el valor correspondiente de la corriente de operación fundamental  $I_{op}$  determinar la mínima pendiente que asegura señal de operación

para la peor condición en un tiempo de 1 ciclo de la señal de 60 Hz , el proceso es similar al seguido en el caso del inrush pero ahora con los valores en condiciones de cortocircuito y con máximos armónicos, en nuestra modelación eso ocurre con  $I_{op\ 1ciclo}=4862\text{ A}$ ,  $I_{H2\ 1ciclo}= 661.6\text{ A}$ ,  $I_{H5\ 1. ciclo}= 366.02\text{ A}$  , estos valores corresponderán con cero retardo de tiempo adicional a un ciclo después de ocurrido el cc y a ellos corresponden valores de pendientes de 13.6 y 7.5 % respectivamente. En la figura 4 los gráficos de los segundos y quintos armónicos comienzan 1 ciclo después de ocurrido el cortocircuito, por lo que si se quiere conocer cuántas muestras después de ocurrido el cortocircuito hay que agregarle 12 , pues las modelaciones de la protección diferencial se hicieron con pasos de 30 grados y 12 muestras por ciclo, los resultados obtenidos en cuanto a variación de los armónicos 2 y 5 coinciden con lo reportado en [3]. Los armónicos se comienzan a calcular después de un ciclo de ocurrida la falla. En nuestro caso el valor de ajuste que se propone sería un poco superior a la pendiente  $M_2$  obtenida de la condición de cc, pues en los cálculos no se han considerado condiciones de magnetismo remanente en el núcleo del transformador que pudieran para determinadas condiciones bajar los valores críticos de las corrientes del segundo y quinto armónicos y por tanto de la pendiente a ajustar en el caso de los análisis de inrush siendo difícil precisar cuanto. Por lo anterior se toma un 10% superior al ajuste de cortocircuito las pendientes lo que daría ajustes finales para el segundo armónico de 23.6 y del quinto de 17.5%.

Este sería el último paso de la metodología, que como se puede ver no existe un valor único correcto de ajuste este puede variar entre ambas pendientes analizadas.

Fig.4 Máximos valores armónicos en cc 1 .



## Conclusiones.

La metodología propuesta permite hacer ajustes a la medida de las pendientes armónicas en la protección diferencial de transformadores, que aseguren un trabajo eficiente de las mismas ajustadas a las condiciones específicas del lugar en que se instalen.

## Bibliografía.

1. Algoritmos para el cálculo de transitorios en transformadores I y II. C Chang IEEE Trans. on Power Delivery . 1994
2. Algoritmos para el cálculo de transitorios en transformadores. Tesis de diploma del CIPEL 1998.
3. Computer relaying for power systems protection. Arum G. Phadke, James S. Thorp.
4. Algoritmo para modelar protección diferencial de transformadores con restricciones armónicas. Tesis Diploma CIPEL 1998.

## AUTORES

Ing. Yoel Rosales Hernández.  
 yoelraul@cipel.cujae.edu.cu  
 Ing. Lázaro Guerra Hdez  
 lazaro@cipel.cujae.edu.cue  
 Dr. Antonio MartínezGarcía  
 amg@cipel.cujae.edu.cu  
 Est. Denis Arce López  
 dalmaster@cipel.cujae.edu.cu