



Simulación de transformadores de corriente en MATLAB/SIMULINK

Orlys Ernesto Torres
Miriam Vilaragut
Antonio Martínez

Recibido: Septiembre del 2004

Aprobado: Noviembre del 2004

Resumen / Abstract

Se presentan los modelos de transformadores de corriente, monofásicos y trifásicos, utilizando MATLAB/SIMULINK. Estos modelos pueden ser conectados con los modelos de la biblioteca de Power System Blockset del propio SIMULINK para completar los modelos y análisis relacionados con las protecciones eléctricas. Las máscaras dinámicas realizadas permiten una flexibilidad superior para el usuario, dado que pueden configurar el modelo según las necesidades de la investigación que se realiza.

Palabras clave: transformadores de corriente, modelación y simulación, SIMULINK

In this work are shown the models of the three-phase and single-phase current transformers using MATLAB/Simulink. These models can be connected to the models that belong to the Power System Blockset to complete models and analysis related with Protective Relaying. The dynamic masks made in this work, allow a major flexibility to the users, because of now, the users can configure the model depending of the researching goals.

Key words: current transformers, modelling and simulation, SIMULINK

INTRODUCCIÓN

Tanto los instrumentos de medición como los relevadores son imprescindibles en las instalaciones eléctricas, los primeros para conocer el comportamiento de los parámetros eléctricos y los segundos, para protegerlas de averías.

Ambos, los instrumentos de medición y los relevadores, son construidos de forma delicada, tamaño reducido y alta precisión.

Las magnitudes de los parámetros eléctricos que están presentes en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) suelen ser muy elevadas, por lo que se necesita de un dispositivo que las disminuya.

El transformador de corriente (TC) tiene como función disminuir los valores de corriente que circula por el

SEP a valores tolerables por los instrumentos de medición o los relevadores.

Aunque en la actualidad se están introduciendo TC ópticos,¹ los TC inductivos son aún mayormente empleados.

Los TC separan o aíslan los aparatos de medida y protección de la alta tensión, reducen las perturbaciones electromagnéticas de las grandes corrientes y obtienen corrientes proporcionales y reducidas para hacerlas circular por los aparatos apropiados.

La correcta elección de los TC es muy importante y no solo se limita a la selección de la relación de transformación y la tensión de aislamiento, otros factores² son necesarios tomarlos en cuenta para

lograr la protección de los aparatos de medida y protección, así como la seguridad de la instalación y el personal que trabaja en ella.

Se han desarrollado muchos tipos de TC inductivos. Algunos se conectan directamente a los aisladores pasantes de los interruptores, transformadores u otro elemento del SEP. Otros tienen un devanado primario y la mayoría, solo tienen una barra o conductor como devanado. Se fabrican incluso algunos en los que el propio cable del SEP cruza al transformador y es el primario, es decir, estos no tienen devanado primario.

Los TC no trabajan siempre de forma ideal, transformando la corriente que circula por el primario en una corriente menor y apropiada a los aparatos de medida o protección. Estos se saturan y la proporcionalidad ideal se pierde.

Muchos son los factores que afectan el trabajo ideal del TC, es decir, que propician la saturación como son: la magnitud de la corriente primaria, la carga conectada al secundario, la frecuencia y las propias características del núcleo, entre otros.

Cuando un transformador de corriente se satura, por cualquiera de estos factores, la corriente secundaria no sigue la misma proporción ideal que sino está saturado. Si se espera un nivel dado de corriente circulará otro de menor valor en dependencia del nivel de la saturación.

La saturación no es un fenómeno totalmente negativo o negativo en todos los casos. Los instrumentos de medición generalmente se fabrican muy frágiles, solo para soportar las corrientes a las que fueron especificados y es donde el fenómeno de la saturación resulta positivo. Cuando el TC se satura la corriente que circula en el secundario no crece y por tanto, se protegen los aparatos de medida.

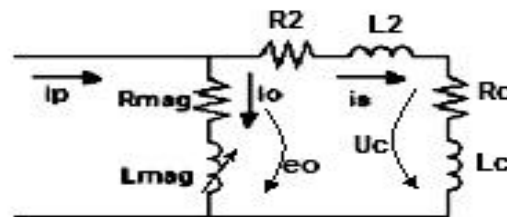
En el caso de las protecciones eléctricas, el fenómeno de la saturación es totalmente perjudicial. Los relevadores de corriente, por ejemplo, están midiendo y comparando las señales de corriente con un determinado valor preestablecido (ajuste), y si el TC está saturado puede que la corriente en el secundario jamás alcance el valor esperado y en la realidad una alta corriente, muy dañina, esté circulando por el SEP que terminará por destruir una porción del mismo.

La saturación no solo se muestra en el error de magnitud que le proporciona a la corriente secundaria con respecto a la primaria, sino incluso, a la deformación de la onda. Este otro elemento afecta a relevadores tales como los direccionales, distancia y diferenciales que utilizan el valor complejo de la señal de corriente.

MODELACIÓN FÍSICA DE LOS TRANSFORMADORES DE CORRIENTE

Los TC han sido estudiados con profundidad y aún se continúa trabajando en ellos, por la importancia de conocerlos para determinar su correcta utilización con aparatos de medida y protección.

El modelo físico o eléctrico de un TC se muestra en la figura 1.



Circuito equivalente del TC.

1

En la mayoría de los modelos no se incluye el devanado primario, muchas veces porque simplemente no existe o porque no participa directamente en el fenómeno de la saturación.

La corriente primaria (I_p) es idealmente referida a los valores del secundario. La corriente secundaria (I_s) no es igual a la corriente ideal del primario (I'_p) a menos que la corriente de magnetización (I_o) tenga un valor igual a cero.

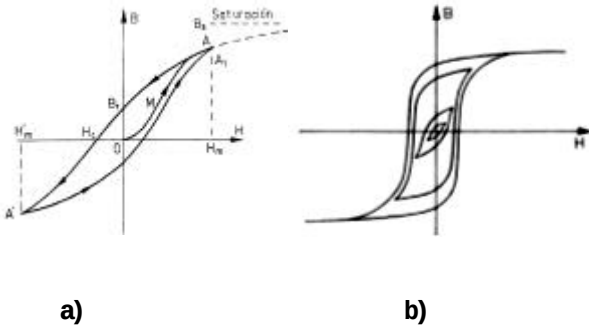
La rama en paralelo al secundario, representa los fenómenos que ocurren en el núcleo del TC y es conocida como rama de magnetización.

Esta rama está compuesta por una resistencia que representa las pérdidas por calor en las láminas del núcleo y una inductancia que representa el propio fenómeno de la inducción electromagnética.

La inductancia de magnetización no es constante. La cantidad de flujo que circula por un determinado material ferromagnético no es ilimitada. Esta no linealidad representa la saturación propiamente dicha.

El comportamiento no lineal del núcleo es estudiado utilizando la curva de histéresis (figura 2a). La relación intensidad del campo electromagnético (H) y densidad de flujo (B) al aplicar una corriente sinusoidal de magnitud constante, no sigue el mismo comportamiento si la corriente está creciendo que si la corriente está decreciendo.

Es importante destacar (figura 2b) que este lazo no es único en el TC. Cuando se modifica la magnitud de la corriente aplicada al devanado del núcleo, el lazo de histéresis se modifica, siendo más amplio durante la saturación. Por tanto, para cada magnitud corriente aplicada existirá un lazo de histéresis definido.



Lazos de histéresis en un TC: a) Para una intensidad fija; b) Con varias intensidades.

2

Se ha trabajado mucho en el mejoramiento de las características de los materiales ferromagnéticos utilizados en los núcleos de los TC para reducir el ancho de la curva de histéresis, algunos autores suponen una sola curva.³

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Aplicando las leyes del electromagnetismo y las ecuaciones de kirchoff al circuito mostrado en la figura 1, se podrán extraer las ecuaciones que permitirán la modelación matemática del TC.

La corriente ideal en el secundario se calcula como:

$$i'_p = \frac{i_p}{K_{TC}} \quad \dots(1)$$

De la aplicación de la primera ley de kirchoff se obtiene:

$$i_0 = i'_p - i_s \quad \dots(2)$$

Aplicando la segunda ley de kirchoff al lazo formador por la rama de magnetización y el devanado secundario en serie con la carga, se puede calcular la fem de la rama de magnetización (e_0):

$$e_0 = i_s R_2 + L_2 \frac{di_s}{dt} + i_s R_C + L_C \frac{di_s}{dt} \quad \dots(3)$$

donde:

R_2 : Resistencia del devanado del TC.

L_2 : Inductancia del devanado del TC.

R_C : Resistencia de la carga conectada al TC.

L_C : Inductancia de la carga conectada al TC.

Pero esta ecuación (3) se puede simplificar haciendo algunas transformaciones sencillas:

$$e_0 = i_s (R_2 + R_C) + (L_2 + L_C) \frac{di_s}{dt} \quad \dots(4)$$

$$R_H = R_2 + R_C \quad \dots(5)$$

$$L_H = L_2 + L_C \quad \dots(6)$$

$$e_0 = i_s R_H + L_H \frac{di_s}{dt} \quad \dots(7)$$

De las leyes del electromagnetismo se obtiene la relación entre la fem y el flujo total que circula por el núcleo (ψ):

$$e_0 = \frac{d\psi}{dt} \quad \dots(8)$$

La saturación del núcleo impone una función no lineal entre el flujo y la corriente de magnetización (i_0) que depende de las características del propio TC, por tanto:

$$\psi = f(i_0) \quad \dots(9)$$

$$U_C = e_0 - \left(i_s R_2 + L_2 \frac{di_s}{dt} \right) \quad \dots(10)$$

Resolver estas ecuaciones algebraicas y diferenciales de primer orden, es un proceso sencillo de lograr utilizando MATLAB, solo que la ecuación 9 introduce una alinealidad.

Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones anteriores, el sistema queda como sigue:

$$i'_{p(s)} = \frac{i_{p(s)}}{K_{TC}} \quad \dots(11)$$

$$I_{0(s)} = I'_{P(s)} - I_{S(s)} \quad \dots(12)$$

$$E_{0(s)} = I_{S(s)}(R_H - sL_H) \quad \dots(13)$$

$$E_{0(s)} = sY(s) \quad \dots(14)$$

$$Y(s) = f(I_{0(s)}) \quad \dots(15)$$

$$U_{C(s)} = E_0 - I_{S(s)}(R_2 + sL_2) \quad \dots(16)$$

Las ecuaciones (13) y (16) son imposibles de lograr de forma continua en SIMULINK, pero simplificando la fem (E_0) o igualando las ecuaciones (13) y (16), así como obviando la 16, se obtiene un nuevo sistema de ecuaciones fácilmente solubles en SIMULINK.

$$I'_{P(s)} = I_{P(s)} \left(\frac{1}{K_{TC}} \right) \quad \dots(17)$$

$$I_{0(s)} = I'_{P(s)} - I_{S(s)} \quad \dots(18)$$

$$Y = f(I_0) \quad \dots(19)$$

$$I_{S(s)} = Y(s) \left(\frac{s}{(R_H - sL_H)} \right) \quad \dots(20)$$

La tensión en la carga (U_C) y la fem (E_0) se pueden obtener, una vez almacenado el flujo (ψ) y la corriente secundaria (I_s) luego de una simulación, con la ecuación (8) y (10) respectivamente.

MODELO EN SIMULINK DE UN TC IDEAL MONOFÁSICO

La ecuación (1) describe el trabajo ideal de un TC. La corriente primaria referida (I'_p) representa la corriente secundaria ideal que debe existir en el secundario si por el primario circula una corriente (I_p). En la figura 3 se muestra un modelo en SIMULINK.

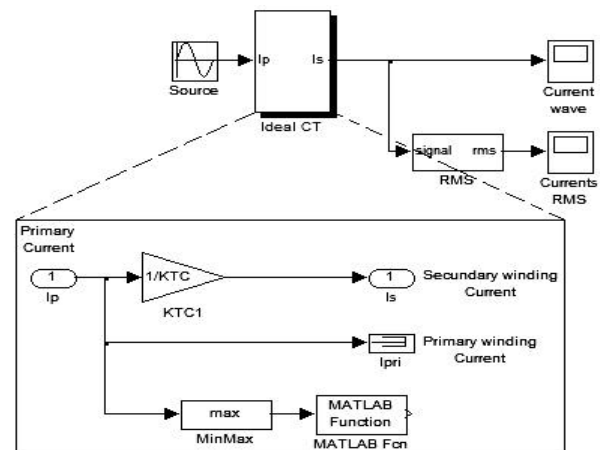
El bloque representa el modelo en SIMULINK para el TC ideal creado. En el interior de este bloque aparece una ganancia con el coeficiente de transformación del TC, que se calcula de la relación corriente primaria y secundaria nominal.

Otro bloque (MATLAB function) se añadió para cambiar el color de la corriente del bloque si la corriente del primario supera la corriente dinámica del TC.

Muchos de estos bloques necesitan de datos que se solicitan al usuario, por medio de una máscara dinámica (figura 4), que no solo realiza los cálculos de la relación de transformación, entre otros sino que permite hacer que las salidas del modelo sean controladas por el usuario.

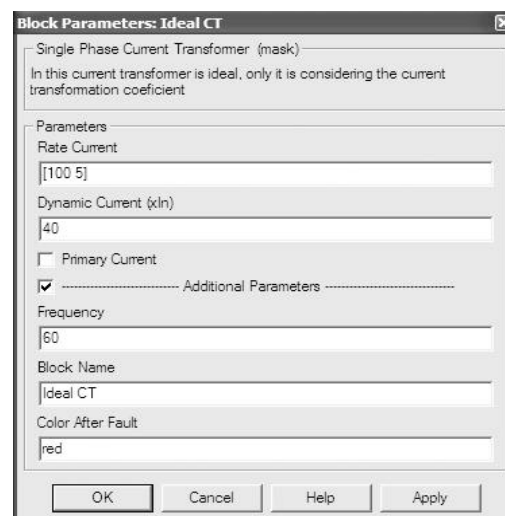
Los datos de corrientes nominales primarias y secundarias y la corriente dinámica entre otros, datos auxiliares son pedidos en esta máscara.

Las salidas del bloque que se utiliza para modelar el TC ideal son dinámicas, es decir, aparecen o desaparecen según lo especifica el usuario. Esto se logra a través de una subrutina (callback function) implementada en la misma máscara (tabla 1).



Modelo en SIMULINK para un TC ideal monofásico.

3



Máscara dinámica para el TC ideal.

4

Tabla 1
Subrutina para conformar las salidas dinámicas

```
% To calculate the Current Transformation Coefficient
Ip=I(1);
Is=I(2);
KTC=Ip/Is;

% Setting some initial variables
b=gcb;
names={'Ipri'};
etats={Ipri};

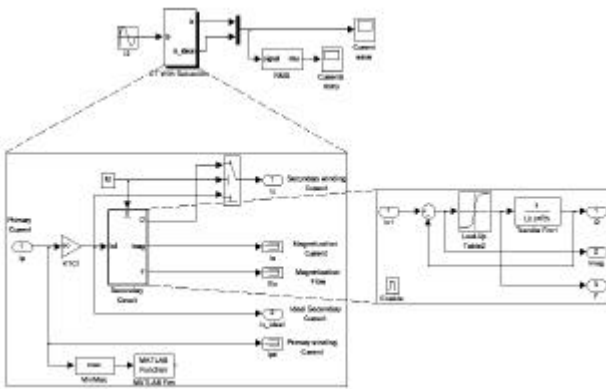
for i=1:1

    % Depending of the status of the checkboxes, set the block type

    if etats{i}==0
        status='Terminator';
    else
        status='Outport';
    end

    % Get the actual block type of the output (i)
    actual=get_param([b,'/',names{i}], 'BlockType');
    % if the actual status and the desired one are not equal
    if strcmp(actual,status)~=0
        % replace for the desired status
        replace_block(b,'FollowLinks','on','Name',names{i},status,'noprompt');
```

Si el usuario no desea que la corriente primaria (*primary current*) sea una salida, entonces la subrutina reemplazará el objeto de salida (*put port*) por un terminador.



Modelo en SIMULINK para un TC monofásico considerando la saturación.

MODELO EN SIMULINK DE UN TC MONOFÁSICO, CONSIDERANDO LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO

Las ecuaciones desde la (17) hasta la (20) se toman en cuenta para la realización del modelo (figura 5).

La relación no lineal entre el flujo y la corriente de magnetización establecida en la ecuación (19), se logra a partir de dividir la curva en varios puntos e introducirlos en una tabla de búsqueda (*look-up table*) que utilizando interpolación calculará el resto de los puntos a partir de los ofrecidos por el usuario.

Una máscara dinámica similar a la mostrada en la figura 4 fue creada para estos modelos. Se pueden activar varias salidas temporales en adición de la salida permanente que es la corriente secundaria:

- Corriente secundaria ideal.
- Corriente de magnetización.
- Flujo total en el núcleo.
- Corriente primaria.

De la misma forma este bloque cambia de color cuando la corriente por el primario supera el valor de la corriente dinámica especificada por el usuario.

MODELO EN SIMULINK DE UN TC TRIFÁSICO, CONSIDERANDO LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO

Los TC trifásicos no son fabricados en la realidad, esto es solo una herramienta necesaria para la simulación.

Un TC trifásico es la combinación de 3 TC monofásicos. La corriente que circula por los aparatos de medición y(o) protección conectados a los TC depende de la conexión del devanado secundario de los mismos.

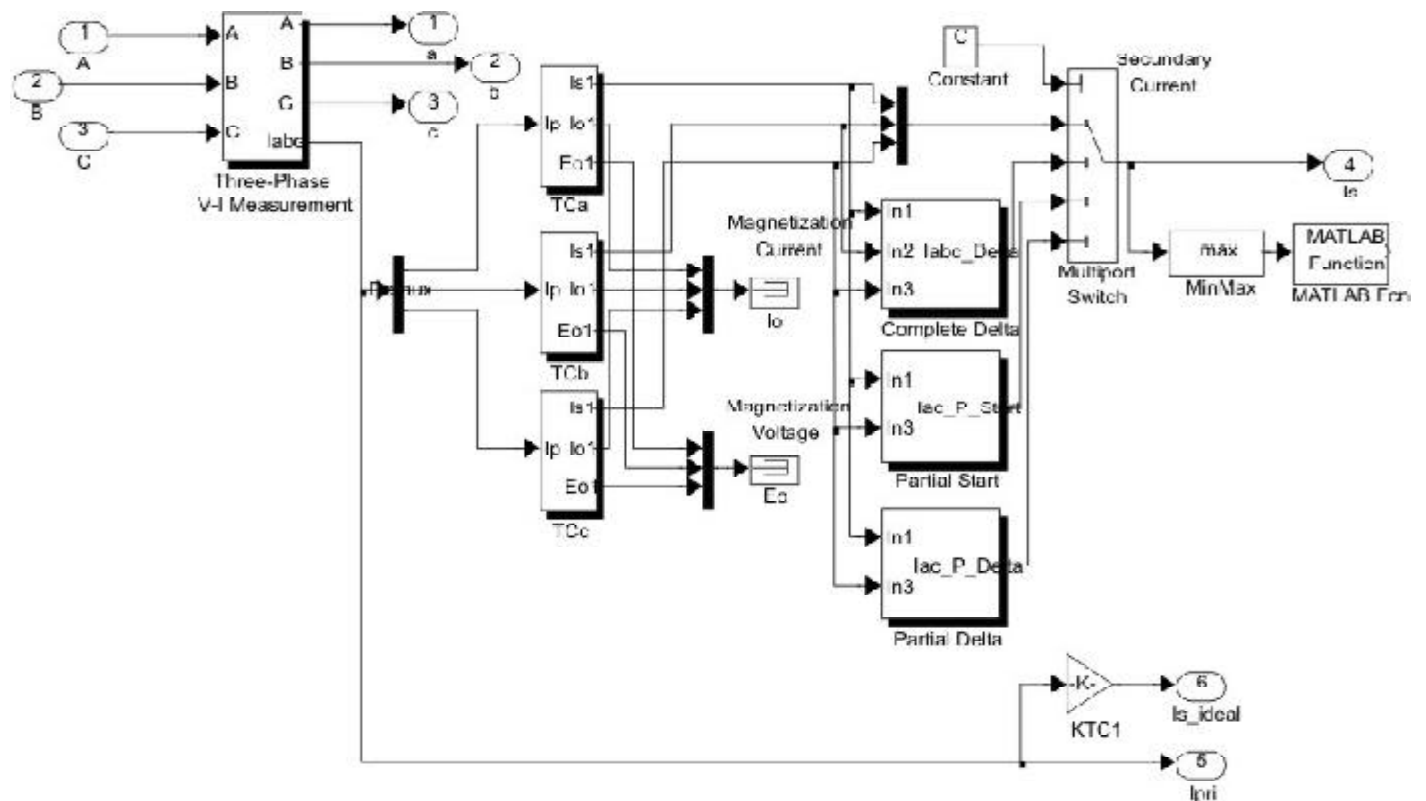
El modelo del TC trifásico se muestra en la figura 6. Este, adicionalmente, permite variar la conexión de las fases del devanado secundario.

Este modelo se implementó de tal forma que pueda ser conectado a la librería Power System Blockset (figura 7).

La máscara dinámica creada para este modelo de TC trifásico es similar, pero adicionalmente incluye 4 posibles conexiones: estrella completa, incompleta, delta completa e incompleta.

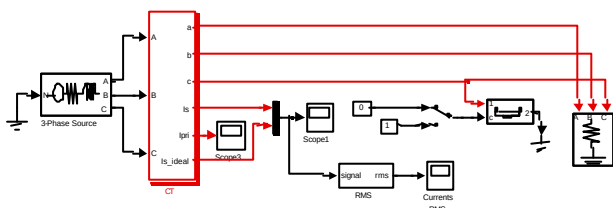
EXPERIMENTACIÓN CON TC REALES

Se realizó un experimento con dos TC reales para comparar y validar los modelos creados.



Modelo del TC trifásico.

6



Modelo en SIMULINK para un TC trifásico conectado a otros modelos de la biblioteca Power System Blockset.

7

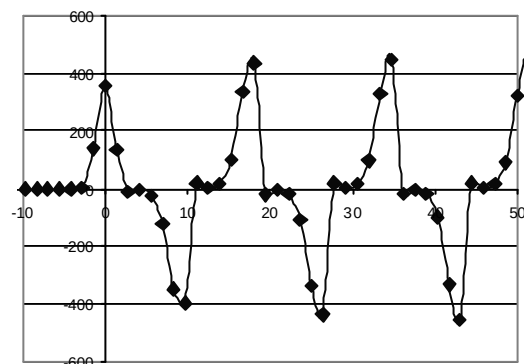
Se utilizó un TC de 150/5 y otro de 75/5, ambos con una corriente dinámica de 20 veces la nominal y los accesorios utilizados fueron los siguientes:

- Dos transformadores tipo ventana.
- Una fuente variable de corriente de hasta 3 000 A.
- Un relé digital Multilin SR 469 de la compañía General Electric Power Management.
- Un interruptor pulsador.
- Dos multímetros.
- Un Computador Pentium III, 128 MBRAM, CD-ROM, 10 GHB.
- Cables sólidos.

Con el relé digital SR-469 y el programa 469PC, se capturó la forma de onda de las corrientes por varios ciclos. El relé comenzaba a capturar una vez activado

el pulsador. La corriente es almacenada, en un fichero, con valores referidos al devanado primario del transformador de corriente.

En la figura 8 se muestra la corriente del secundario del TC de 75/5 para un régimen de sobrecorriente a 5 veces su corriente nominal, para la cual ya está saturado. En este caso no existe componente de directa dado que la señal es producida por una fuente de corriente comercial.



Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 75/5, referidas al primario, en régimen de saturación a 5 veces la corriente nominal.

8

En la figura 9 se muestra la corriente del secundario del TC de 150/5 para un régimen de sobrecorriente a 10 veces su corriente nominal.

En ambos casos se logró experimentar el fenómeno de la saturación de los TC reales a distintos valores que depende de la característica de sus núcleos, pero estas características no son conocidas. Es válido destacar que los devanados estaban en cortocircuito o a través de la impedancia propia del relé digital, que es muy pequeña.

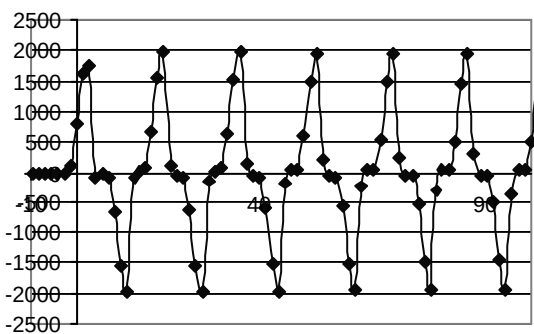
Para comprobar los modelos, se introdujeron los datos en las máscaras y se utilizó como característica o curva de histéresis la función tangencial hiperbólica a distintos valores hasta lograr alcanzar la saturación para las mismas corrientes primarias.

El transformador de 75/5 se simuló y en régimen normal, las corrientes secundarias tanto ideales como los resultados del modelo se muestran en la figura 10. Con líneas discontinuas las corrientes secundarias ideales y continuas, las resultantes del modelo tomando en cuenta la saturación.

En la figura 11 se muestran las corrientes secundarias en el mismo TC pero esta vez simulando corrientes iguales a 5 veces la nominal (375 A).

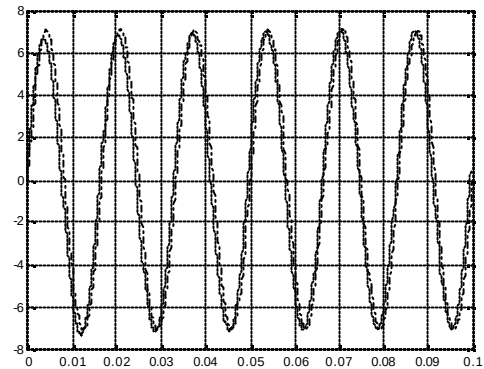
Se podrá observar en la figura 11, la similitud de ambos resultados, los ensayos prácticos (figura 8) y los teóricos. La onda decrece bruscamente a valores iguales a cero, en casi un cuarto de ciclo.

La misma simulación se realizó para el transformador de 150/5 y las corrientes secundarias, a 10 veces la nominal (1500 A), lo cual se muestra en la figura 12.



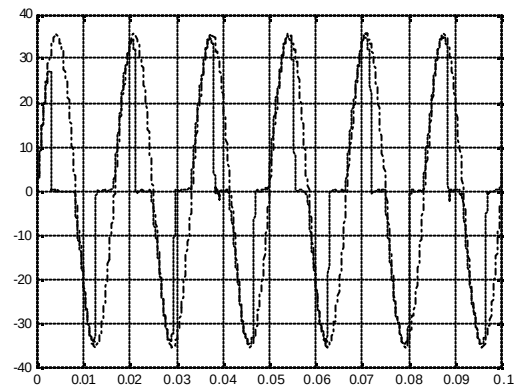
Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 150/5, referidas al primario.

9



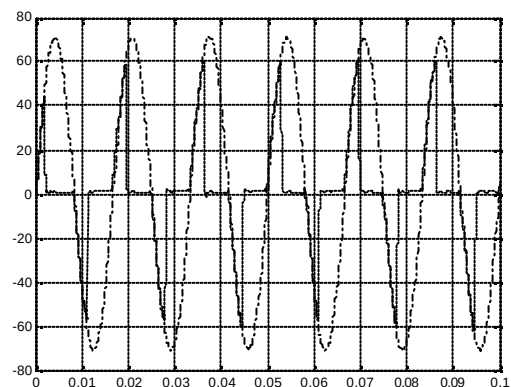
Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 75/5 en régimen normal.

10



Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 75/5 en régimen de saturación.

11



Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 150/5 en régimen de saturación.

12

En ambos casos las corrientes crecen siguiendo una función aparentemente sinusoidal ideal, pero caen a cero bruscamente. Esto se puede observar en los resultados experimentales reales y los simulados.

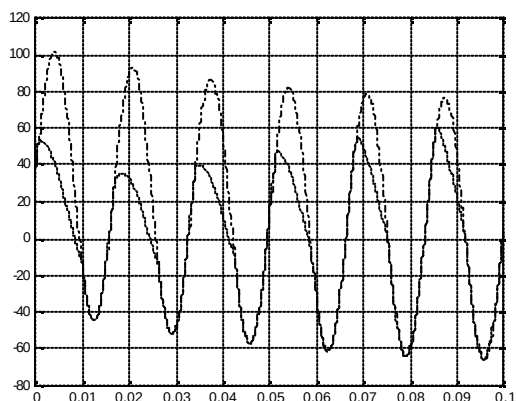
INFLUENCIA DE LA CARGA Y LAS COMPONENTES DE DIRECTA EN EL TC

Una vez validado el comportamiento de los modelos se hicieron varias simulaciones, para determinar el comportamiento de los TC en distintos tipos de cargas y frente a señales de corrientes con componentes directas.

Se conoce que el aumento de la carga en el TC provoca la saturación prematura de los mismos, por lo que se estudió el comportamiento de las forma onda de la corriente secundaria para distintos tipos de cargas, ya sea resistiva o inductiva.

En la figura 13 se muestra la forma de onda de la corriente secundaria en un TC de 100/5. El devanado tenía una impedancia de $(1.8+j4)$. La corriente simulada es de 10 veces la nominal y con componente de directa. Se observa que el mayor error entre la corriente ideal esperada y el resultado de la simulación, está precisamente en el segundo ciclo y se va recuperando lentamente con el paso del tiempo.

En la figura 14 se muestra el comportamiento del error de corriente, tomando en cuenta el valor eficaz de la corriente ideal (continuo) y la corriente resultada del modelo (círculos).



Formas de onda de las corrientes secundarias de un TC de 100/5 en régimen de saturación, pero con corrientes de componente directa.

13

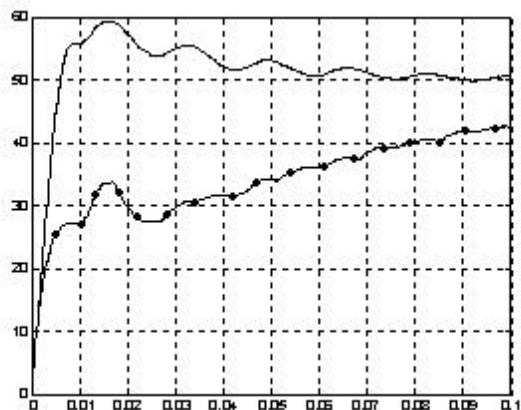
El error es considerable en los primeros ciclos debido a la componente asimétrica y se va recuperando una vez que esta componente pase.

En la figura 15 se muestra la corriente secundaria de un TC 100/5, con corrientes de 10 veces el valor nominal, pero modificando el tipo de carga conectada al secundario. Las corrientes secundarias que bajan en forma de picos, presentan las condiciones con cargas mayormente resistivas. Las cargas con componentes inductivas provocan un aplanamiento en el pico superior de la forma de onda y por tanto mayores errores de corrientes.

Para continuar estas investigaciones sería muy interesante encontrar otros modelos que superen las limitantes establecidas en este trabajo, donde se tomen en cuenta:

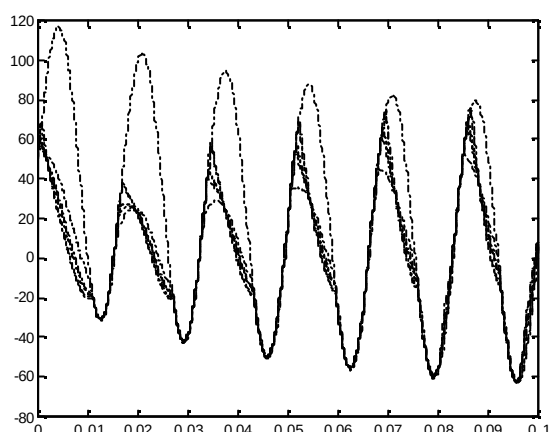
1. La influencia de la frecuencia, para determinar el comportamiento de los TC con corrientes contaminadas de armónicas superiores.
2. La variación de la curva de histéresis, para determinar con exactitud los errores a corrientes muy bajas.
3. La influencia del tipo de cortocircuito con relación a la conexión de la carga conectada al TC.

Adicionalmente a estos aspectos mencionados, las investigaciones futuras pudieran dirigirse a la modelación de transformadores de secuencia cero y transformadores con circuitos de premagnetización, empleados en la protección contra fallas a tierra en instalaciones con neutros aislados.⁴



Corrientes eficaces de la corriente ideal y los resultados del modelo.

14



Corrientes eficaces de la corriente ideal y los resultados del modelo.

15

CONCLUSIONES

1. MATLAB resulta de una herramienta eficaz para la modelación del comportamiento de los transformadores de corrientes.
2. Corrientes no sinusoidales representan el proceso de saturación de un TC. Esta saturación se logra para corrientes por encima de la nominal, pero el momento exacto depende de las características magnéticas del núcleo, la impedancia de la carga, entre otros factores.
3. Se corroboró, usando la simulación, que la influencia de la carga depende no solo del valor modular de la misma, sino del valor de la componente resistiva o inductiva que la caracteriza.
4. Las cargas mayormente resistivas provocan menor error para las mismas condiciones, que las cargas mayormente inductivas.
5. El ángulo de la aparición del cortocircuito y la componente directa que acompañan a estos, influye adicionalmente en la deformación de la onda.

6. La carga de unos TC no solo depende de la cantidad de dispositivos de medición y protección conectados a este, sino del tipo de cortocircuito y de la conexión de los secundarios de los TC en el lugar de la medición.

REFERENCIAS

1. Anderson, P. M.: "Power System Protection", *IEEE PRESS*, p. 1305, McGraw-Hill, 1999,
2. IEEE PRESS, *Transient Response of Current Transformer*, *IEEE Publication*, January, 1976.
3. Garret, R.; W.C. Kotheineer and S.E. Zocholl: "Computer Simulation of Current Transformer and Relays for Performance Analysis", A Paper Presented at the 14th Annual Western Relay Conference Sokane, Washinton, October, 20-23, 1987.
4. Vasilev, A. A. et al.: *Parte eléctrica de las centrales y subcentrales eléctricas*, p. 995, 2da. ed., Moscú: Vneshtorgizdat, 1986, .

AUTORES

Orlys Ernesto Torres Breffe

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica
Profesor Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa, Cuba.

e-mail: otorres@ismm.edu.cu

Miriam Vilaragut Llanes

Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas,
Profesora Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: miriamv@electronica.cujae.edu.cu

Antonio Martínez García

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas,
Profesor Titular, CIPEL, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail: amg5057@yahoo.es

*Disponemos de un departamento informatizado,
dotado con tecnologías que nos permiten realizar
todo el proceso de edición de revistas científicas
así como de otros materiales.*

Visítenos!!!

