



Evaluación del Error en un Transformador de Corriente, con Respecto a la Constante de Tiempo de la Corriente Primaria y Secundaria

Héctor O. Pascual (opascual@frlp.utn.edu.ar), Omar A. Fata (oafata@frlp.utn.edu.ar), Ariel A. Albanese (albanese@frlp.utn.edu.ar)
Grupo de Investigación y Desarrollo de Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE)
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata.
Dirección: 60 y 124, La Plata, CP (1900), Buenos Aires, Argentina
Tel: +54 (221) 421-7578/482-4855/427-0483/425-4335

RESUMEN: Considerando que los Transformadores de corriente TAs están sometidos a corrientes que por las características de los sistemas eléctricos de potencia, durante una falla de cortocircuito pueden presentar una componente exponencial decreciente, es objeto del presente trabajo evaluar el error que se comete en la medición de estas corrientes en relación con la constante de tiempo de la corriente primaria (T_p) y la constante de tiempo que presenta el circuito secundario del transformador de corriente (T_s). En tal sentido se utilizará para determinar dicha relación, ya sea en régimen estable o transitorio de funcionamiento, un TA trabajando en condiciones lineales y con flujo disperso despreciable, condición cercana a la de funcionamiento real si no se produce saturación en su núcleo magnético. Cabe mencionar que la saturación del TA es una situación que, en general, se trata de evitar ya que ésta provoca una deformación en la corriente secundaria que podría causar un funcionamiento incorrecto en los equipos asociados.

Palabras claves: Transformador de corriente, error, constantes de tiempo.

Error Evaluation of a Current Transformer, Respect to the Time Constant of the Primary and Secondary Current

ABSTRACT: Due to the characteristics of the electric power systems in a short-circuit, the current transformers CTs can be energized by a current with a d.c. component. Considering this situation, the aim of the present work is to evaluate the error when a CT is used to measure this type of currents in relation with the primary time constant (T_p) and the time constant of the current transformer secondary loop (T_s). In order to evaluate the aforementioned relationship in steady-state and transient conditions, a CT working in linear conditions and a negligible leakage flux is used; this condition is close to the actual operation if its magnetic core does not reach saturation. It is worth mentioning that CT saturation is a situation that, in general, is convenient to avoid, since it may cause a distortion in the secondary current that could cause an incorrect operation in related equipment.

Keywords: Current Transformer, error, Time constants

INTRODUCCIÓN

Se puede establecer en forma general que el origen de los errores, cuando se realiza una medición con un transformador, radica principalmente en que por las condiciones propias del funcionamiento del mismo circula por el bobinado primario una corriente denominada corriente de excitación que no se refleja en el bobinado secundario. De acuerdo con (IEC 60044-1, 1996), (Lin, 1989) y (Ras, 1972) los errores en condiciones estables de funcionamiento se pueden evaluar a través del error de relación, dado por la ecuación (1) considerando que la relación de transformación efectiva no es igual a la relación de transformación nominal, y el error de fase, dado por la diferencia en ángulo entre los fasores de corriente primaria y secundaria.

$$\text{error de relación} = \frac{(K_n I_s - I_{pr})}{I_{pr}} 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

donde K_n es la relación de transformación nominal, I_{pr} el valor eficaz de la corriente primaria [A]

o I_s el valor eficaz de la corriente secundaria cuando la I_{pr} está siendo medida. [A].

Cuando el TA se encuentra en un régimen de funcionamiento estable pero ha sufrido una saturación magnética se deforma la corriente secundaria y no es posible representar fasorialmente a la misma. En esta condición y de acuerdo con (IEC 60044-1, 1996) el error puede ser evaluado a través de la ecuación (2) que permite obtener el valor del error compuesto ε_c .

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_{pr}} \left| \frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_{pr})^2 dt \right| \quad (2)$$

donde i_{pr} es el valor instantáneo de la corriente primaria [A], i_s el valor instantáneo de la corriente secundaria [A] y T la duración de un ciclo (período) [s].

En condiciones estables de trabajo y con el núcleo ferromagnético del TA saturado, el error compuesto también representa el apartamiento de las condiciones ideales de funcionamiento del TA, en lo que

se refiere a la presencia en el secundario de armónicos, que no existen en el lado primario.

Cuando el TA se encuentra funcionando en condiciones transitorias de trabajo, (como sucede cuando es sometido a corrientes de falla de cortocircuito que presenten una componente exponencial decreciente) el error puede variar punto a punto, dependiendo dicha variación de las características del TA, del grado de saturación del núcleo y del tipo de transitorio en cuestión. Por este motivo, y en función de lo establecido en (IEC 60044-6, 1992) y (Poljak and Kolibas, 1988), es posible evaluar el error en este tipo de regímenes de trabajo a través de la denominada corriente de error instantánea i_ε , dada por la ecuación (3).

$$i_\varepsilon = K_{nl}s - i_{pr} \quad (3)$$

El análisis de los errores en condiciones de trabajo transitorias tiene vital importancia en el área de protecciones, debido a que frente a una perturbación del sistema eléctrico en la que se presentan valores elevados de corrientes, los TA's deben responder con un error que no supere ciertos límites, ya que de lo contrario se podría producir la actuación incorrecta de alguna protección determinada.

Considerando que por las características de los sistemas eléctricos de potencia, las corrientes de falla de cortocircuito pueden presentar una componente exponencial decreciente, es importante evaluar la dependencia de los errores involucrados en la medición de estas corrientes, con la constante de tiempo de la mencionada componente exponencial y la constante de tiempo que presenta el circuito secundario del TA empleado para la medición. Por tal motivo es objeto del presente trabajo analizar el comportamiento del error en condiciones estables y transitorias, con respecto a las constantes de tiempo primaria y secundaria, y presentar una nueva forma de cuantificar el error para un TA trabajando en condiciones lineales y con un flujo disperso despreciable.

COMPORTAMIENTO LINEAL DE UN TA.

Con el objeto de evaluar los errores de un TA se analiza su comportamiento, en condiciones de trabajo lineal (característica B-H lineal), cuando es sometido a una corriente que contiene una componente exponencial decreciente como la mostrada en la Fig. 1 ($I_{psc} = 1000A$, $T_p = 0,1s$ y $f = 50Hz$) y dada por la expresión (4) que representa una forma de onda típica de la corriente que se presenta en un sistema eléctrico de potencia de características inductivas cuando se produce una falla

de cortocircuito.

$$i_{pr}(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[e^{-t/T_p} - \cos(\omega t) \right] u(t) \quad (4)$$

donde I_{psc} es el valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito primaria [A], T_p la constante de tiempo primaria [s] y ω la frecuencia angular $2\pi f$, donde f es la frecuencia de red en Hz. [rad/s]

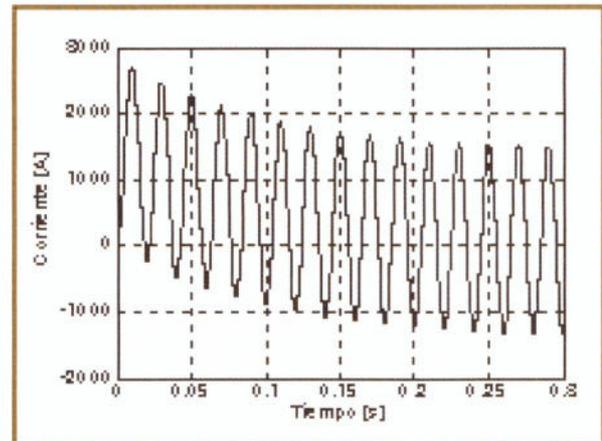


Fig. 1 - Forma característica de la corriente de cortocircuito en un sistema de tipo inductivo

Para determinar la corriente secundaria y el flujo, cuando al TA se le aplica una corriente como la mostrada en la Fig. 1, se utiliza como herramienta la transformada de Laplace, que aplicada a (4) se obtiene (5).

$$I'_{pr}(s) = \sqrt{2} I_{psc} \frac{1}{s + \frac{1}{T_p}} - \sqrt{2} I_{psc} \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (5)$$

Siendo s el operador de Laplace y teniendo en cuenta la ecuación que representa el circuito equivalente del TA transformado al campo de Laplace se obtiene la ecuación (6) que es la corriente transformada en el secundario.

$$I'_s(s) = \frac{s M I'_{pr}(s)}{s L_s + R_s} \quad (6)$$

donde M es el coeficiente de inducción mutua [H], L_s la inductancia del circuito secundario [H], R_s la resistencia del circuito secundario [Ω], I'_{pr} la corriente primaria transformada al campo de Laplace e I'_s la corriente secundaria transformada al campo de Laplace.

Realizando la transformada inversa de Laplace de (6) para obtener la corriente secundaria en función del tiempo se obtiene (7):

$$i_s(t) = -\frac{\sqrt{2} I_{psc} M}{L_s} \left\{ e^{-t/T_s} \left[\frac{1}{\frac{T_s}{T_p} - 1} + \frac{1}{1 + T_s^2 \omega^2} \right] + e^{-t/T_p} \frac{1}{\frac{T_p}{T_s} - 1} - \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{T_s^2} + \omega^2}} \text{sen}(\omega t + \beta) \right\} \quad (7)$$

Para esta última ecuación, $\beta = \text{arctg}(-\omega T_s)$ [rad] y T_s es la constante de tiempo del circuito secundario ($L_s R_s$) [s].

La forma de onda de la corriente secundaria, teniendo en cuenta los mismos valores de I_{psc} y T_p utilizados para realizar el gráfico de la Fig. 1, y adoptando $T_s = 0,05s$, $L_s = 0,1H$ y $M = 1,25mH$, se observa en la Fig. 2.

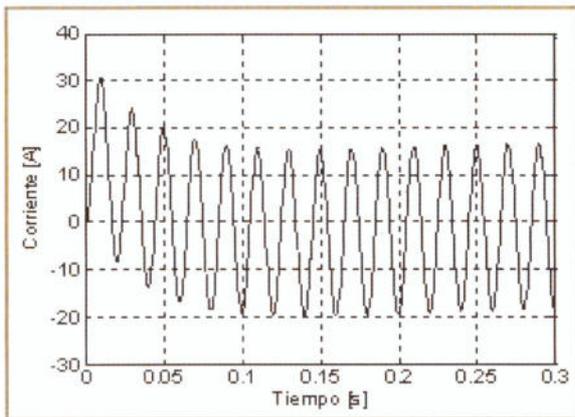


Fig. 2 - Corriente secundaria

La ecuación (8) representa el flujo en [Wb] enlazado por el secundario.

$$\Phi_s = -L_s i_s + M i_{pr} \quad (8)$$

Por lo tanto la variación del flujo secundario en función del tiempo estará dada por (9).

$$\Phi_s = \sqrt{2} I_{psc} M \left[J e^{-t/T_s} + \frac{T_p}{T_p - T_s} e^{-t/T_p} - \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{T_s^2} + \omega^2}} \text{sen}(\omega t + \beta) - \cos(\omega t) \right] \quad (9)$$

en la cual:

$$J = \frac{1 + T_p T_s \omega^2}{1 + T_s^2 \omega^2 - \frac{T_p}{T_s} - T_p T_s \omega^2}$$

La forma de onda del flujo enlazado por el secundario en función del tiempo, dado por (9), y teniendo en cuenta los mismos valores de I_{psc} , T_s , T_p y M utilizados para el trazado de las Figs. 1 y 2, se observa en la Fig. 3.

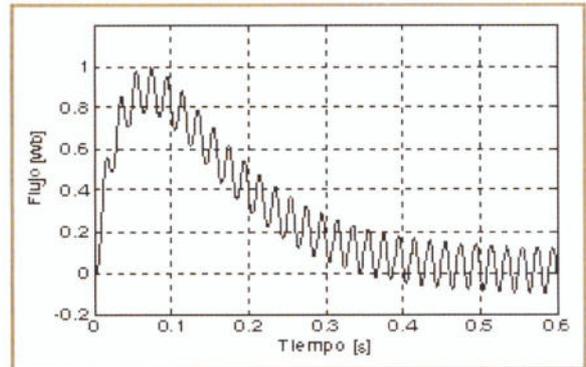


Fig. 3 - Flujo

Cuando se produce una perturbación como puede ser un cortocircuito, se origina una corriente elevada que puede contener una componente exponencial decreciente, la cual provoca que el flujo en el núcleo alcance un valor mayor que el flujo alterno requerido si no existiese dicha componente (como se aprecia en la Fig. 3). Es de considerar que para el tipo de TA destinado a sistemas de protecciones, se pretende lograr que el núcleo magnético no llegue a la saturación para que los errores no se incrementen producto de este hecho (Pascual et al, 2001), motivo por el cual es conveniente que los sistemas de protecciones evalúen y tomen decisión de la acción a realizar en un tiempo inferior al que le toma al flujo magnético alcanzar un valor elevado, o bien que el TA no se sature producto de su alto valor de flujo. Por lo dicho, para obtener un tiempo máximo representativo, se considera el máximo de la envolvente que se puede observar en la Fig. 4.

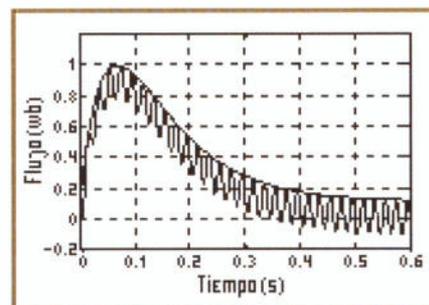


Fig. 4 - Envolvente del flujo

El tiempo que tarda en llegar al valor máximo la envolvente de la curva que representa el flujo teórico enlazado por el secundario, esta dado por (10).

$$t_{max} = \left[T_p T_s / (T_p - T_s) \right] \ln(T_p / T_s) \quad (10)$$

En esta última ecuación se observa que al incrementar la constante de tiempo del circuito secundario T_s , aumenta el tiempo que tarda el flujo en llegar al valor máximo, con lo que se incrementa la posibilidad de disponer de un tiempo mayor para la evaluación de la corriente primaria, antes de que el flujo tome valores considerables que pueden provocar la saturación del núcleo de la máquina y por ende aumentar el valor de la corriente de error.

EVALUACIÓN DEL ERROR

Considerando las ecuaciones desarrolladas en el punto 2 y tomando como referencia para el análisis a la corriente de error, ya que ésta permite evaluarlos tanto en condiciones estables como transitorias de funcionamiento, se presenta una forma nueva de cuantificar el error en un TA lineal y de flujo disperso despreciable, que permite extender algunas conclusiones a transformadores reales que se encuentren trabajando en la zona lineal de su correspondiente característica B-H.

Evaluación de la corriente de error en régimen estable de funcionamiento

Con el objeto de evaluar el comportamiento del error en régimen estable se determina el valor de la componente alterna de la corriente de error a través de una comparación entre la componente alterna de la corriente secundaria con respecto a la componente alterna de la corriente primaria, de (4) se obtiene la componente alterna de la corriente primaria (11):

$$i_{pac}(t) = - 2 I_{psc} \cos(\omega t) \quad (11)$$

y de (7) se obtiene la componente alterna de la corriente secundaria:

$$i_{sac}(t) = \frac{2 I_{psc} M}{L_s} \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{T_s^2} + \omega^2}} \sin(\omega t + \beta) \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que:

$$M = K L_p L_s \quad (13)$$

donde K es el factor de acoplamiento (número adi-

mensional que puede tomar valores entre 0 y 1) y L_p es la inductancia de la bobina primaria [H].

Contemplando que el TA en estudio tiene flujo disperso despreciable, el valor de K es igual a 1, luego se puede decir que la relación de transformación teórica cumple con la siguiente ecuación:

$$K_t = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, de (12) se llega a (15):

$$i_{sac}(t) = \frac{\sqrt{2} I_{psc}}{K_t} \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{T_s^2} + \omega^2}} \cos(\omega t + \arctg(-\omega T_s) - \frac{\pi}{2}) \quad (15)$$

La componente alterna de la corriente de error se expresa a través de (16)

$$i_{zac} = K_t i_{sac} - i_{pac} \quad (16)$$

Considerando las ecuaciones (11), (15) y (16) es posible decir que el factor dado por (17) y el ángulo dado por (18) son los que producen un incremento del error al alejarse de los valores 1 y $(-\pi/2)$ respectivamente, permitiendo evaluar el comportamiento de la componente alterna de la corriente de error i_{zac} en función del valor de la constante de tiempo del circuito secundario T_s .

$$\frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{T_s^2} + \omega^2}} \quad (17)$$

$$\arctg(-\omega T_s) \quad (18)$$

Evaluación de la corriente de error en régimen transitorio de funcionamiento.

Para poder evaluar el comportamiento del error en régimen transitorio se determina el valor de la componente transitoria de la corriente de error a través de una comparación entre la componente transitoria de la corriente secundaria con respecto a la componente transitoria de la corriente primaria, por lo tanto de la expresión (4) se obtiene la componente transitoria de la corriente primaria (19):

$$i_{pdc}(t) = 2 I_{psc} e^{-t/T_p} \quad (19)$$

La componente transitoria de la corriente secundaria se obtiene de (7) y teniendo en cuenta (14) se llega a (20)

$$i_{sdc}(t) = -\frac{\sqrt{2} I_{psc}}{K_t} \left\{ e^{-t/T_s} \left[\frac{1}{\frac{T_s}{T_p} - 1} + \frac{1}{1 + T_s^2 \omega^2} \right] + e^{-t/T_p} \frac{1}{\frac{T_p}{T_s} - 1} \right\} \quad (20)$$

La componente transitoria de la corriente de error se expresa a través de (21)

$$i_{alc} = K_t i_{sdc} - i_{pdc} \quad (21)$$

Considerando las ecuaciones (19), (20) y (21) se desprende que los factores dados por (22) y (23) son los que producen un incremento del error al alejarse de los valores 0 y (-1) respectivamente, permitiendo evaluar el comportamiento de la componente transitoria de la corriente de error i_{alc} en función de los valores de la constante de tiempo del circuito secundario T_s y la constante de tiempo primaria T_p .

$$e^{-t/T_s} \left[\frac{1}{\frac{T_s}{T_p} - 1} + \frac{1}{1 + T_s^2 \omega^2} \right] \quad (22)$$

$$\frac{1}{\frac{T_p}{T_s} - 1} \quad (23)$$

Para un valor de tiempo t determinado, cuando T_s se acerca al valor de T_p , desde valores de T_s menores que T_p , los factores dados por (22) y (23) tienden a $-\infty$ y $+\infty$ respectivamente, y viceversa cuando el acercamiento se produce desde valores de T_s mayores que T_p . Considerando lo dicho, los factores mencionados no son aplicables en el caso exacto de $T_s = T_p$, pero para valores de la constante de tiempo secundaria ubicados en un entorno cercano al valor de la constante de tiempo primaria, la combinación de (22) y (23) en (20) permite evaluar la componente transitoria de la corriente de error en ese punto.

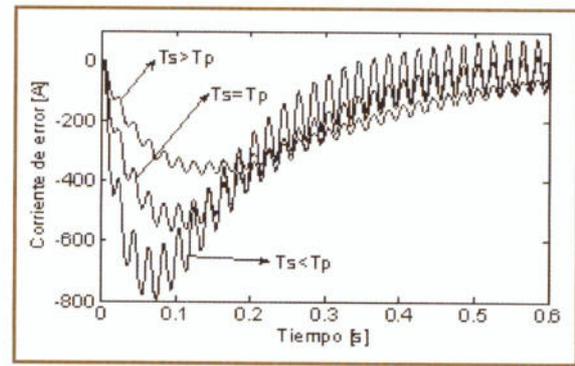


Fig. 5 - Corrientes de error

$T_s > T_p$	$T_s = T_p$	$T_s < T_p$
$T_s = 0,2 \text{ s}$	$T_s = 0,1 \text{ s}$	$T_s = 0,05 \text{ s}$

En la Fig. 5 se pueden observar distintas curvas de corrientes de error, correspondientes a un TA que posee las mismas características que el utilizado para obtener las Figuras 1, 2 y 3, al cual se le aplicó una corriente primaria que cumple con la ecuación (4). También se consideró un valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito primaria $I_{psc} = 1000 \text{ A}$, una constante de tiempo primaria $T_p = 0,1 \text{ s}$. y distintos valores de la constante de tiempo del circuito secundario T_s (mayor, igual y menor que la constante de tiempo primaria T_p) con el objeto de comparar el comportamiento del TA en estas situaciones.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la componente alterna de la corriente de error o régimen estable de funcionamiento se determina que a medida que la constante de tiempo del circuito secundario T_s sube, esta componente disminuye. Se puede observar que el factor dado por (17) expresa el error en módulo, ya que a medida que el mismo se aparte de la unidad, se produce un crecimiento de la corriente de error instantánea debido a que el producto de la relación de transformación K_t por el valor de pico de la corriente secundaria da un resultado menor que el valor pico de la corriente primaria. El término dado por (18) se relaciona con el error en ángulo ya que se puede notar que a medida que la constante de tiempo del circuito secundario T_s aumenta, el resultado de dicho término se va acercando a $(-\pi/2)$. Esto provoca que se reduzca el desplazamiento angular entre la corriente primaria y secundaria, por lo que disminuye el valor de la corriente de error.

Desde el punto de vista de la componente transitoria de la corriente de error se determina que

a medida que la constante de tiempo del circuito secundario T_s sube con respecto al valor de la constante de tiempo primaria T_p , el valor máximo de la componente transitoria de la corriente de error va disminuyendo y los factores que introducen error en este caso están dados por (22) y (23) al apartarse de los valores de 0 y (-1) respectivamente.

Por lo establecido anteriormente se desprende que para poder reflejar una corriente primaria, del tipo dada en la expresión (4), en el secundario del TA, con una corriente de error pequeña se tiene que cumplir que la constante de tiempo del circuito secundario T_s sea lo más grande posible respecto al valor de la constante de tiempo primaria T_p .

BIBLIOGRAFÍA

Ras E., "Transformadores de potencia, de medida y de protección", 2º edición, Marcombo, Barcelona, (1972).

Poljak M. and Kolibas N., "Computation of Current Transformer Transient Performance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, 1816-1822, (1988).

Lin Z., "A Simple Method for Fast Routine Testing and Dynamic Ratio Error of Current or Potential Transformer and its Instrument", IEEE 6th Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC-89, 57-61, (1989).

IEC Instrument transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance, IEC 60044-6 (1992-03).

IEC Instrument transformers - Part 1: Current transformers, IEC 60044-1 (1996-12).

Pascual H., Dampé J., Rapallini J., "Behaviour of Current Transformers (CT's) under severe saturation conditions," International Conference on Power Systems Transients IPST2001, Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, (2001). 