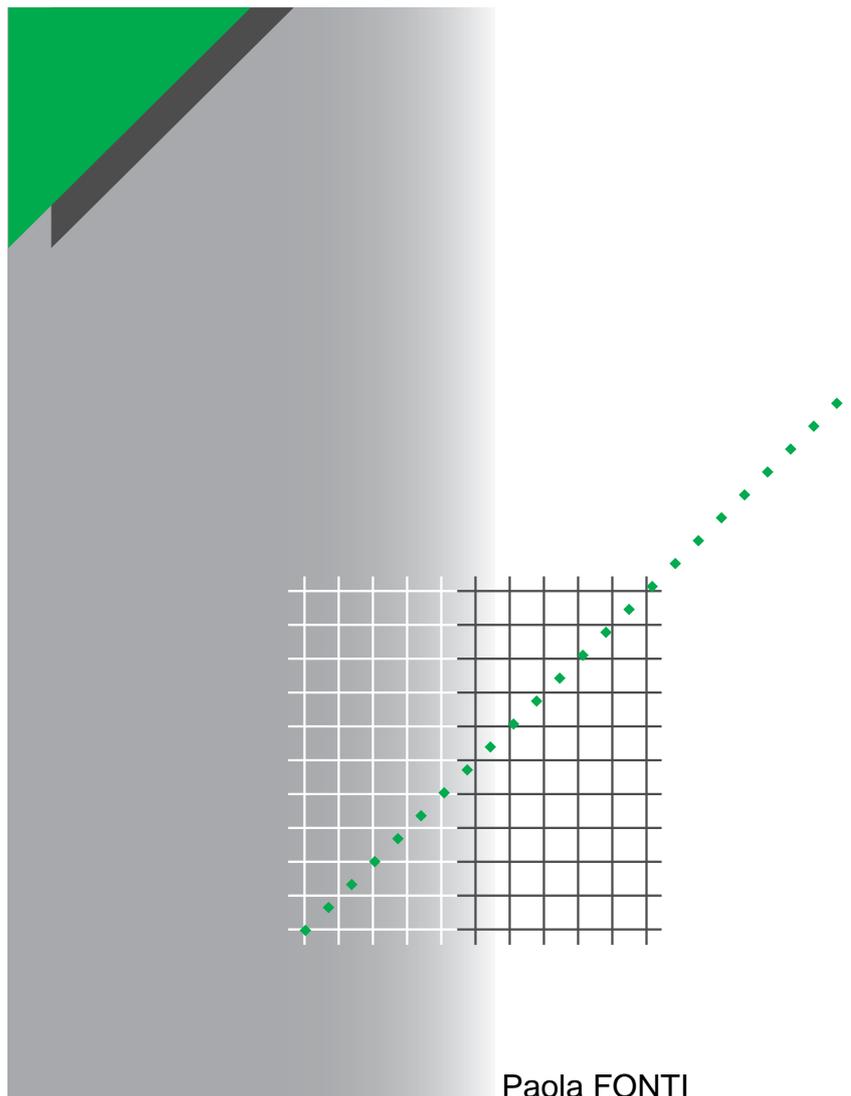


Cuaderno Técnico nº 195

Transformadores de intensidad: errores de especificación y soluciones



Paola FONTI

Merlin Gerin
Eunea Merlin Gerin
Modicon
Telemecanique
Mesa
Himel
Square D

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complementa la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider

C/ Miquel i Badia, 8 bajos

08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80

Fax: (93) 219 64 40

e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 195 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 195

Transformadores de intensidad: errores de especificación y soluciones



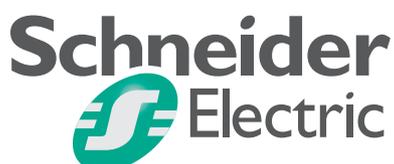
Paola FONTI

Ingeniera INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble). Diplomada en 1970. Entró en Merlin Gerin en 1981, como consejera y responsable del departamento de estudios de exportación MT. Actualmente es responsable del grupo de apoyo a la oferta y desarrollo de proyectos MT en el Grupo Schneider.

Trad.: J.M. Giró

Original francés: diciembre 1998

Versión española: diciembre 2001



Terminología

I_f: intensidad de corriente máxima que atraviesa una zona protegida.

I_s: margen de ajuste de intensidad de corriente.

k_n: factor límite de precisión (FLP) nominal de un TC (asociado a su carga de precisión).

k_r: FLP real de un TC, asociado a su carga real.

P_i: ($= R_{ct} I_n^2$). Pérdidas internas del captador de corriente con I_n .

P_n: ($= R_n I_n^2$). Potencia de precisión del captador de corriente.

P_r: ($= R_r I_n^2$). Consumo de la carga real del captador de corriente con I_n .

R_L: resistencia del cableado.

R_p: resistencia del relé de protección.

Sobrecalibración de un TC: elección de un TC cuya I_n primaria es superior a la I_n inmediatamente superior a la I_n del receptor.

TC adaptadores, auxiliares o intermedios: TC de baja tensión conectado al secundario de los TC principales para corregir la razón de transformación y/o el defasaje de corriente.

Transformadores de intensidad: errores de especificación y soluciones

Después de repasar las características de los transformadores de intensidad (TC), la autora explica los errores que se presentan más frecuentemente en la definición de los reductores de corriente, nexo de unión imprescindible y poco conocido entre la red eléctrica y los relés de protección.

Aporta ideas para salir airoso de situaciones difíciles: TC no construible, retrasos en la entrega, costes adicionales, funcionamiento inadecuado, ...

Este Cuaderno Técnico puede ser de utilidad a los técnicos electricistas que diseñan una instalación, a los especialistas en protecciones, a los fabricantes de celdas y también a los fabricantes de TC. Todos ellos están interesados en proporcionar el total de los datos necesarios para la seguridad y optimización de los TC.

Este estudio es un complemento operativo del Cuaderno Técnico nº 194 «Transformadores de intensidad: cómo determinar sus especificaciones».

Índice

1	Especificar correctamente los TC	1.1 Introducción	p.	6
		1.2 Repaso de los TC	p.	6
2	Ejemplos de errores de especificación	2.1 Optimización y seguridad	p.	9
		2.2 Cuando los TC no son adecuados...	p.	10
		2.3 Errores más frecuentes	p.	11
		2.4 ¿Y si un TC no se puede fabricar?	p.	14
3	Equivalencia entre diversas definiciones posibles de un mismo TC	3.1 Cómo pasar de Pn1 -5Pk1 a Pn2 -5Pk2	p.	18
		3.2 Cómo pasar de de Pn1 -5Pk1 a Pn2 -10Pk2	p.	18
		3.3 Qué valor tiene Vk de un TC: Pn-XPk	p.	19
		3.4 Cómo pasar de una clase X (Vk, Rct) a una clase 5P: Pn-5Pk	p.	19
4	Conclusión		p.	20
	Bibliografía		p.	21

1 Especificar correctamente los transformadores de intensidad

1.1 Introducción

Los transformadores de intensidad clásicos (Cuaderno Técnico nº 164) o híbridos (Cuaderno Técnico nº 170) son un enlace indispensable en la cadena de protección de las redes eléctricas.

Aunque es un trabajo de especialistas, está frecuentemente lleno de errores y poco optimizado.

Esto lleva, muy frecuentemente a «imposibles tecnológicos», retrasos en la instalación, costes adicionales, fallos en el funcionamiento de las protecciones, e incluso pone en peligro la seguridad de las instalaciones y de las personas.

Dar especificaciones correctas de un TC (Cuaderno Técnico nº 194) requiere un buen conocimiento:

- del esquema de la instalación eléctrica,
- de los datos eléctricos (tensión, corriente nominal, corriente de cortocircuito, etc.),

- de las protecciones asociadas,
- del conjunto de las protecciones de la red (plan de protección), de la carga que representan para los TC, sin olvidar el cableado y los ajustes.

No es infrecuente que, por falta de datos, por desconocimiento de su funcionamiento, un fabricante de TC diga: «no sé fabricarlo» cuando podría utilizarse un TC estándar.

Este Cuaderno Técnico destaca la optimización, pero, sobre todo, las equivalencias entre las diferentes definiciones de un mismo reductor de corriente. En efecto, hay que saber que la potencia, la clase y el factor límite de precisión son magnitudes interdependientes y que no tiene sentido proporcionarlas por separado. Este conocimiento permite resolver muchas situaciones sin solución.

Antes de entrar en el tema, se recuerdan a continuación algunas características de los TC.

1.2 Repaso de los TC

Según las normas CEI, entre otras, los TC pueden caracterizarse por:

a - su razón de transformación, por ejemplo: 2000/5 A.

b - su potencia de precisión, por ejemplo, 15 VA.

c - su clase de precisión, por ejemplo:

□ 5P, 10P para un arrollamiento de protección,

□ clase 0,5, 1, etc., para un arrollamiento de medida,

d - características dependientes de su saturación:

d-1 factor límite de precisión (FLP) para un arrollamiento de protección,

d-2 factor de seguridad (FS) para un arrollamiento destinado a la medida.

e - Otras características:

- resistencia térmica, por ejemplo, 50 kA - 1 s,
- tensión de aislamiento,
- etc.

En todo lo que sigue, nos referiremos únicamente a las características **a**, **b**, **c**, **d** y a todo lo que de ellas se deriva (**figura 1**).

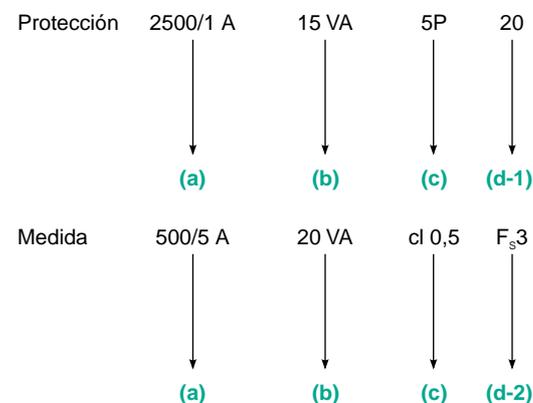


Fig. 1: Principales magnitudes características de un TC.

Recordemos que un TC 15 VA-5P20, cuando está sometido a una intensidad 20 veces mayor que su corriente nominal y que alimenta a su carga nominal (15 VA con I_n), tiene un error garantizado inferior al 5%.

Cada una de las características **b**, **c**, **d** depende de las otras dos.

Un mismo TC puede tener una potencia diferente, una clase de precisión diferente y un FLP diferente.

En cambio, un determinado TC tiene una única curva de magnetización y una única resistencia de su arrollamiento secundario (a una determinada temperatura).

Cuando se conocen estos dos últimos datos (curva + resistencia) podemos encontrar todas las correspondencias entre **a**, **b**, **c**, que pueden afectar a un TC y, sobre todo, los conjuntos de las tres:

$$(b_1, c_1, d_1) \Leftrightarrow (b_2, c_2, d_2) \Leftrightarrow (b_i, c_i, d_i).$$

Todas las equivalencias se pueden deducir de las leyes simples de la electricidad y, especialmente, de la ley de Ohm.

Esquema equivalente de un TC (figura 2)

- Razón del TC: $\frac{I_{n1}}{I_{n2}}$,
- L_m : autoinducción de magnetización (saturable) equivalente de un TC,
- I_m : corriente magnetizante,
- I_1 : intensidad primaria,
- I_2 : intensidad secundaria que corresponde a un TC perfecto, o sea: $I_2 = I_1 \frac{I_{n2}}{I_{n1}}$
- I_s : intensidad secundaria que realmente circula por el secundario del TC: $\overline{I_2} = \overline{I_s} + \overline{I_m}$.

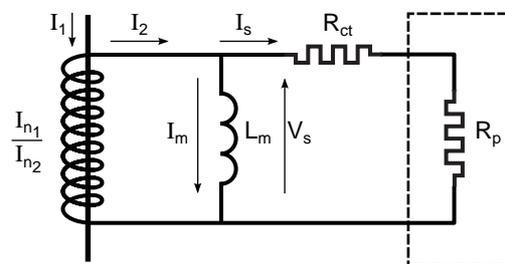


Fig. 2: Esquema equivalente de un TC.

Es la intensidad de magnetización I_m la que provoca un error en la medida. Si el TC fuera perfecto, se tendría $I_m = 0$.

La gráfica de magnetización del TC representa la variación del valor de esta corriente magnetizante en función de la tensión V_s desarrollada en el secundario del TC y puede dividirse en 3 zonas (figura 3):

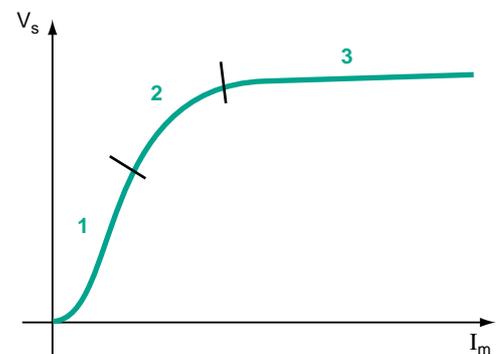
- 1 - zona no saturada,
- 2 - zona intermedia,
- 3 - zona saturada.

En la zona 1, la corriente I_m es baja y la tensión aumenta de forma casi proporcional a la corriente primaria.

La zona 2 es una zona intermedia entre la zona no saturada y la zona saturada. No se aprecia un corte o inflexión importante en la curva de magnetización. En realidad, es difícil situar de forma precisa el punto de la curva que corresponde a la tensión de saturación.

En la zona 3, la curva (V_s I_m) resulta casi horizontal. El error respecto a la razón de transformación es importante y la corriente secundaria se deforma debido a la saturación.

Hay un conjunto de valores característicos de tensión que corresponden a la zona 2 de un determinado TC; evidentemente es necesario conocerlos cuando hay que cambiar la definición de un TC.



- 1 - Zona no saturada
- 2 - Zona intermedia
- 3 - Zona saturada

Fig. 3: Curva de magnetización (de excitación) $V_s = f(I_m)$ de un TC.

Tensiones características de un TC

■ Tensión de codo o «knee point», definida por la norma BS 3938: V_k en caso de clase X (PX en la norma CEI 60044-1).

V_k queda determinada por el punto de la curva $V_s(I_m)$ a partir del valor en el que un aumento del 10% de la tensión produce un aumento del 50% de la corriente magnetizante:

- tensión que depende del límite de precisión del TC de clase 5P: $V_{(5P)} = V_{s1}$,
- tensión que depende del límite de precisión del TC de clase 10P: $V_{(10P)} = V_{s2}$,
- tensión que depende del factor de seguridad F_s : $V_{(Fs)} = V_{s2}$, puesto que el factor de seguridad depende de un límite de precisión del 10% como en el TC de clase 10P.

Estas diversas tensiones $V_k < V_{(5P)} < V_{(10P)}$ dependen cada una del valor de la inducción. Con los materiales que se utilizan normalmente en la fabricación de los TC, se tiene, por ejemplo:

- V_k correspondiente a 1,4 tesla,
- $V_{(5P)} = V_{s1}$, correspondiente a 1,6 tesla,
- $V_{(10P)} = V_{s2}$, correspondiente a 1,9 tesla,
- $V_{(Fs)} = V_{s2}$, que corresponde también a 1,9 tesla.

Se pueden deducir las siguientes razones:

$$\frac{V_k}{V_{s1}} = \frac{1,4}{1,6}; \frac{V_k}{V_{s2}} = \frac{1,4}{1,9}; \frac{V_{s1}}{V_{s2}} = \frac{1,6}{1,9}; \text{ etc.}$$

Cuando se conoce una de estas tensiones, es sencillo deducir las otras.

Cómo calcular las tensiones características a partir de un TC definido en clase 5P ó 10P

■ Por ejemplo:

Supongamos un TC 10 VA-5P15 con una razón de transformación 2000/5. «10 VA-5P15» significa que, cuando tiene una carga igual a su

carga nominal $R_p = \frac{P_n}{I_n^2}$, se garantiza que la

precisión del TC es mejor que el 5% hasta $15 I_n$. A partir de aquí basta referirse al esquema equivalente del TC y a la ley de Ohm para tener el valor $V_{(5P)}$ o V_{s1} (figura 4).

Simplemente: $V_{s1} = (R_{ct} + R_p) I_s$,

o sea: $V_{s1} = (R_{ct} + R_p) 15 I_n$.

Esta relación indica que el conocimiento de la resistencia interna del arrollamiento secundario del TC es absolutamente necesario para hacer la correlación entre las diversas definiciones posibles del TC.

Solemos decir que una buena definición de un TC implica, en todos los casos, el valor R_{ct} . En nuestro caso, si suponemos que $R_{ct} = 0,6 \Omega$,

con un $R_n = \frac{10}{5^2} = 0,4 \Omega$, el cálculo da:

$$V_{s1} = 15 \times 5 (0,6 + 0,4) = 75 \text{ voltios.}$$

Con los valores de inducción citados anteriormente para las clases 10P y la clase X se pueden calcular V_{s2} y V_k .

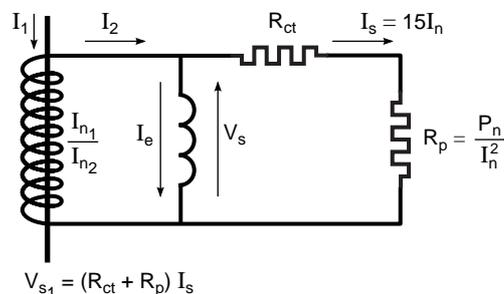


Fig. 4: Cálculo de la tensión característica de un TC.

2 Ejemplos de errores de especificación

2.1 Optimización y seguridad

El análisis de un plan de protección indica que se han previsto para las salidas de los transformadores, a nivel de cuadro, TC con razones de transformación diferentes 50/5 y 1000/5, que tienen una misma definición 15 VA-5P20.

Estos TC están asociados a un mismo relé de protección de intensidad máxima con ajustes a $15 I_n$ (de los TC) para las derivaciones de 50 A y a $12 I_n$ (de los TC) para las derivaciones de 1000 A. Puesto que los dos tienen la misma carga (0,05 VA), el mismo cableado (1,25 VA) y los relés ajustados a valores próximos, parece lógico pensar que los dos TC tienen que tener la misma definición. Pero un cálculo rápido de las potencias necesarias indica que no es así...

■ TC de 1000/5

El FLP necesario (Cuaderno técnico nº 194) es $\frac{2I_r}{I_n}$, o sea, $k_r = 24$.

Sabiendo que $k_r = \frac{k_n(P_i + P_n)}{P_i + P_p}$,

tomando:

- una resistencia interna $R_{ct} = 0,6 \Omega$,
 - $k_n = 20$,
 - pérdidas internas del TC con $I_n = P_i$, o sea: $P_i = R_{ct} \times I_n^2 = 0,6 \times 5^2 = 15 \text{ VA}$,
 - una carga real del TC con $I_n = P_n = 1,3 \text{ VA}$,
- se obtendrá un $k_r = 36,8 > 24$.

El TC es, por tanto, más que suficiente.

■ TC de 50/5

El FLP necesario es $15 I_n \times 2$, o sea, $k_r = 30$.

□ A primera vista, su resistencia interna tendría que ser del orden de $0,02 \Omega$, pero un TC así es, a priori, irrealizable.

□ Además, con $R_{ct} = 0,02 \Omega$, $P_i = 0,5 \text{ VA}$, y con $k_n = 20$ y $P_p = 1,3 \text{ VA}$, se obtiene $k_r = 172 \gg 30$, lo que significa que el TC, incluso con $15 I_n$,

está por debajo de la saturación: está sobredimensionado en potencia.

Pero aún peor, en caso de no desconexión de la salida del transformador, la corriente de cortocircuito (I_{th} del cuadro 40 kA/1 s) hará circular por el secundario del TC una corriente eficaz superior a:

$$172 \times 5 \text{ A} = 860 \text{ A.}$$

(Sin saturación $40000 \text{ A}/50 \text{ A} \times 5 \text{ A} = 4 \text{ kA}$). Tanto el relé como el cableado se quemarán y también el propio TC. Un TC 5 VA resulta por tanto más que suficiente ($k_r = 67 > 30$); un TC 2,5 VA también sirve, es más barato, menos voluminoso y, sobre todo, factible.

■ Conclusión

Es necesario calcular bien la potencia de los TC de baja relación de transformación, porque su R_{ct} , naturalmente baja, implica un riesgo de sobredimensionamiento peligroso.

La **figura 5** aclara las interacciones entre k_r , P_p , P_i .

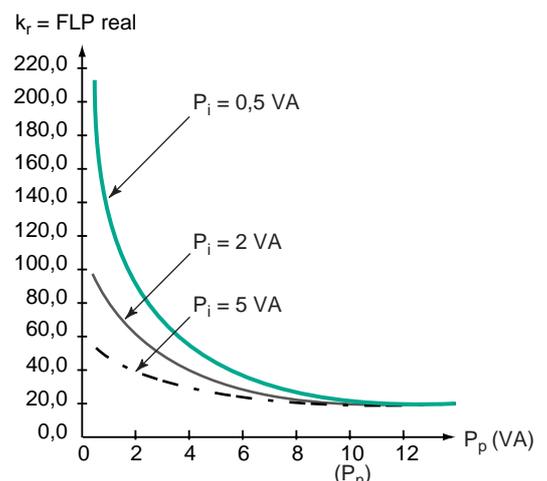


Fig. 5: Variación del factor límite de precisión de tres TC (de R_{ct} diferentes) de 10 VA-5P20 en función de la carga real cableada en el secundario P_p .

2.2 Cuando los TC no son adecuados...

En este apartado se analizan todas las dificultades que se presentaron al intentar fabricar un TC para un cuadro de la red pública de 33 kV con 8 salidas, sin haber tenido en cuenta las necesidades finales. El problema se presentó en el lugar de la instalación, justo antes de la conexión, cuando los TC ya estaban montados en las celdas MT (**figura 6**).

- En el pedido se decía que hacían falta un doble primario 300-600 y tres secundarios de 1A:
 - uno de 5 VA-5P20, para alimentar una unidad de protección Sepam 2000,
 - uno de 15 VA clase 0,5, para medida exterior,
 - y uno de clase X, para una protección a distancia.
- El material proporcionado

Puesto que era imposible realizar un único TC funcional de estas características con tres arrollamientos, serían necesarios TC's complementarios. Optaron por los de «clase X»

y decidieron instalarlos aguas abajo del TC de doble secundario.

- El error comprobado en el lugar de la instalación

Los TC que trabajan con una protección distante deben de instalarse siempre lo más cerca que se pueda del interruptor automático para proteger así la mayor zona posible, sin embargo, los TC de clase X quedarían demasiado separados.

- ¿Qué hacer?

¿Sería necesario cambiar todos los TC, o sea: 2 TC por fase y 6 TC para cada derivación, que en total son, para las 8 salidas, 48 TC!

El desmontaje, la fabricación de nuevos TC y el volver a instalarlos, lleva necesariamente a retrasos y sobrecostes...

- ¿Había otra solución?

□ Una primera reflexión permite pensar en el uso de TC complementarios (clase X) para alimentar el Sepam 2000. El suministrador

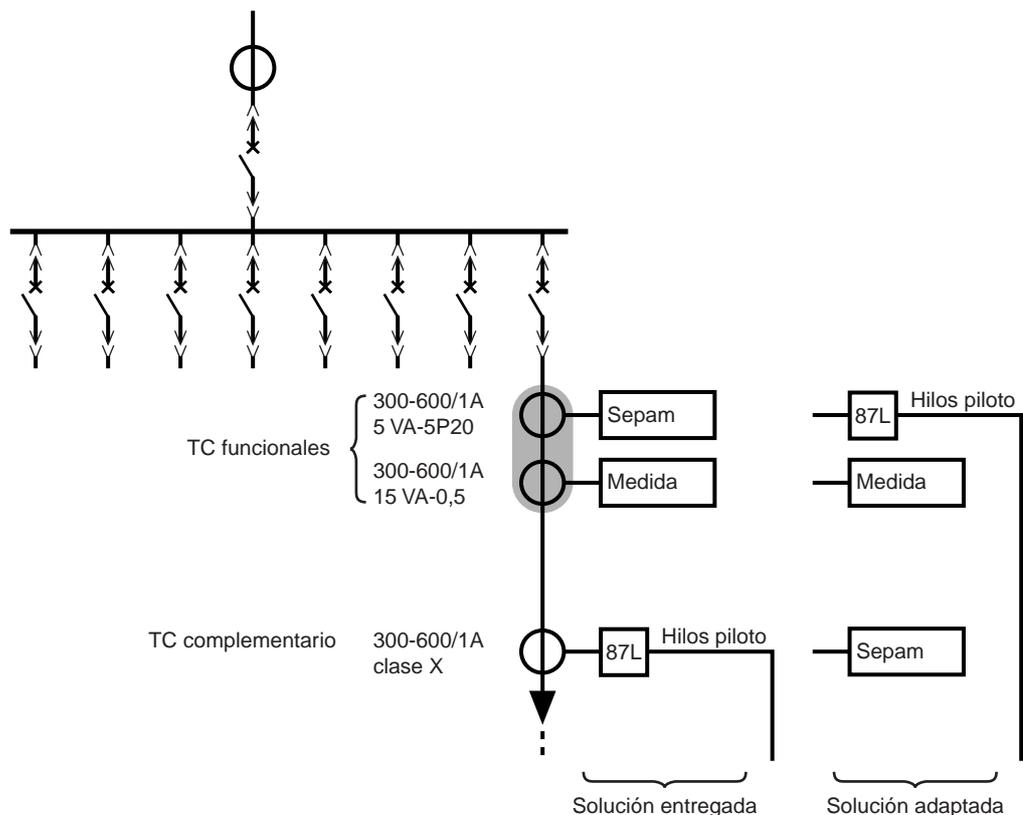


Fig. 6: Colocación de un TC en un cuadro de 33 kV: solución no satisfactoria y solución de replanteamiento.

confirma esta posibilidad: el TC destinado a la protección distante (clase X) corresponde a 10 VA-5P20, con la razón de transformación 300, y a 20 VA-5P20, con la razón de transformación 600/1. Por tanto, es posible asociar los TC complementarios al Sepam 2000. ¡Uf, 24 TC menos que cambiar...!

□ Una segunda reflexión se refiere a los TC con dos arrollamientos: ¿servirían para la protección a distancia los arrollamientos 5 VA-5P20?

El hecho es que todos los TC eran voluntariamente idénticos y correspondían al caso más desfavorable, puesto que las líneas eran de longitudes diferentes (de 2 a 38 km). Las líneas cortas tenían una sección de 50 mm² y las otras de 150 mm².

Volviendo a las necesidades reales de las protecciones a distancia, se ve que para las 6 derivaciones la clase 5 VA-5P20 correspondía a una clase X, suficiente con independencia de la elección de los primarios de los TC (300 ó 600). ¡Para las otras dos salidas, la clase X proporcionada sólo era aceptable con la razón 600/1! Solución que el cliente acepta para las dos salidas de 150 mm².

■ Esta situación, que pone de manifiesto todas las consecuencias de una elección inadecuada de los TC, tiene una conclusión: la primera idea es sustituirlo todo, pero, con la ayuda de los especialistas es posible evitar pérdidas inútiles de tiempo y de dinero.

2.3 Errores más frecuentes

Estos errores suelen llevar a un sobredimensionamiento de los TC, lo que aumenta los costes y puede ser peligroso.

Muchos errores de especificación de los TC se deben a que no se conoce bien su funcionamiento y a que se desconocen en todo o en parte las características de los elementos y componentes de la red a proteger y de las protecciones asociadas. Cuanta más información tenga el fabricante, menos errores se producirán y mejores podrán ser los TC.

Protecciones y TC clásicos

Con estas protecciones, que no necesitan TC definidos en clase X, los «errores» más frecuentes son:

■ utilizar dos TC o un único TC con dos secundarios, porque su clase de precisión es diferente. Hay que saber que el fabricante de TC sabe hacer la conversión 5P ↔ 10P (en función de los valores de inducción correspondientes),

■ utilizar dos TC o un único TC con dos secundarios, porque su FLP es diferente. El fabricante sabe pasar de un FLP a otro jugando con su potencia.

■ tener en cuenta la resistencia del cableado si el fabricante de la protección ya la ha integrado en las necesidades que indica para el TC.

Pongamos un ejemplo con dos relés cuyas fichas técnicas indican para los TC de 1 A:

TC₁ para relé 1: 5 VA-10P15 (con la hipótesis $2R_L < 1,5 \Omega$),

TC₂ para relé 2: 10 VA-5P15 (con la hipótesis $2R_L < 2 \Omega$).

Un único TC puede servir para los dos relés, a priori un 10 VA-5P15. Es necesario:

□ Abstenerse de sumar las potencias (5 + 10 VA) requeridas por cada relé. En efecto, para el TC₂, el relé 1 no representa más que una carga (como la del cableado) y viceversa.

□ Comprobar, aquí para el TC₂, que: $2R_L + R_{p1} \leq 2 \Omega$; y si la elección se hiciera sobre el TC₁, sería: $2R_L + R_{p2} \leq 1,5 \Omega$. Si esto no se ha tenido en cuenta, el proveedor del relé puede proponer sumar «x» VA por ohmio adicional.

Sumar la potencia prescrita para varias protecciones unidas a una misma aplicación lleva a necesitar TC que frecuentemente son imposibles de fabricar o que cuestionan la seguridad en caso de cortocircuitos.

Los relés digitales multifunción permiten evitar estos errores. Es suficiente dimensionar el TC para la protección más exigente (Cuaderno Técnico nº 194).

■ Cambiar las características solicitadas sin comprobar las consecuencias.

□ Un fabricante de TC no fabrica TC de baja razón de transformación y propone aumentarla; por ejemplo:

– Solicitud: TC 30/1 - 2,5 VA-5P20,

– Propuesta del fabricante del TC: 60/1,

– Con una $I_{n-motor} = 16$ A y ajuste al mínimo de la protección: 40% de I_n del TC, o sea, $60 \times 0,4 = 24$ A. Por tanto, resulta imposible el ajuste de la protección a 16 A (normalmente se ajusta a I_n del motor). La solución consiste en

aumentar el calibre y disminuir la exigencia de valor del FLP: 40/1 - 2,5 VA-5P10. Este TC, ahora posible, permite el ajuste adecuado ($40 \times 0,4 = 16 \text{ A}$).

□ Un comprador acepta una resistencia electrodinámica de 0,1 s propuesta por el fabricante del TC en lugar de la de 0,5 s prevista. Consecuencia probable: cuando se produzca un cortocircuito, si la duración real del defecto es superior a 0,1 s, la resistencia electrodinámica será insuficiente y se producirá la destrucción del TC.

■ Por falta de información sobre las necesidades reales

Supongamos el siguiente caso, muy ilustrativo: se solicita un TC de dos primarios y tres secundarios (200-1000/1-1-1) con:

- el primer secundario: 1 A, clase X (V_k dado),
- el segundo secundario: 1 A 15 VA, clase 0,5 para medida,
- el tercer secundario: 1 A 10 VA-5P20.

El proveedor puede proponer un TC con tres núcleos magnéticos y tomas secundarias para responder a las necesidades de 200 ó 1000 A del primario. ¡Pero este TC es difícil de fabricar, porque, para obtener 15 VA-clase 0,5 y 10 VA-5P20 con las razones de transformación 200/1, hacen falta 5 x 15 VA clase 0,5 y 5 x 10VA-5P20 con las razones 1000/1! ¡Además, tiene que respetar la clase X para las dos razones de transformación!

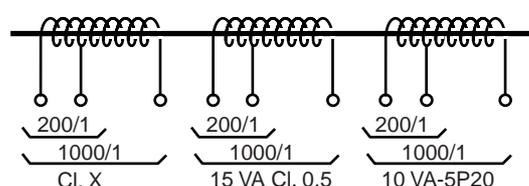
En este caso, si la clase X se aplica únicamente a la razón 1000/1 (diferencial de juego de barras) y las razones 200/1 son para la medida y las protecciones clásicas (figura 7), entonces el TC que hay que fabricar es muy simple, menos voluminoso, más barato y seguramente realizable.

Este ejemplo indica que la falta de información recíproca entre los implicados es fuente de errores, no de optimización. Una consulta mal entendida puede conducir a un TC imposible de fabricar.

■ Tener en cuenta la impedancia de los relés R_h para el cálculo de la carga real (figura 8) en el cálculo de los TC para máxima I o en los TC de clase X.

Atención, no se tiene en cuenta R_h en el cálculo de los TC para protecciones de máxima I_h (Cuaderno Técnico nº 194).

a - Visión del fabricante del TC



b - Necesidades reales

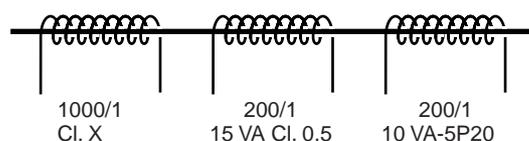


Fig. 7: Ejemplo de mala comprensión entre el cliente y fabricante de un TC.

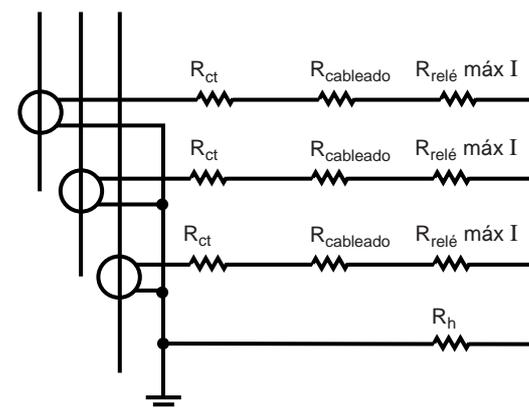


Fig. 8: Impedancias internas y de carga de un TC.

Para las protecciones diferenciales de alta impedancia, R_h no debe de intervenir en el cálculo de V_k , que da la expresión $2 I_f (R_{ct} + 2R_L + R_a)$, donde R_a corresponde a otras cargas. Evidentemente, se trata de la carga de una sola fase y suponiendo que no circula ninguna corriente por el neutro.

En efecto, V_k se calcula para cuando el relé está en condiciones de estabilidad, es decir, no hay ningún defecto de fase o a tierra, ni hay ningún falso desequilibrio, y, por tanto, I_f en conexión diferencial, es igual a cero y la tensión de esta conexión también es igual a cero.

Protecciones diferenciales y clase X

■ Pedir al fabricante de los TC que suministre TC con V_k máxima, que puedan utilizarse en un montaje estándar.

Este caso se presenta cuando el relé diferencial (marca, tipo) no está definido.

Tres consecuencias:

- sobrecoste,
- posibilidad de sobretensiones y sobreintensidades importantes en el secundario del TC, que pueden provocar tanto la destrucción del circuito como de la aparamenta,
- si no se exige nada sobre la R_{ct} del TC, no es seguro que se respete el valor de V_k correspondiente al relé utilizado.

Para aclarar este caso, pongamos el ejemplo del diferencial de un juego de barras de alta impedancia. El TC que se suministra es 2000/5, con $V_k = 400$ V y $R_{ct} = 2,5 \Omega$.

Para el relé utilizado, la expresión que hay que cumplir es: $V_k \geq 200 R_{ct} + 20$, o sea, 520 V. ¡La tensión $V_k = 400$ V es insuficiente!

¡Pero aún peor, la necesidad de una V_k demasiado elevada obliga a la fabricación de un TC no estándar (ver las dos primeras

consecuencias antes citadas) que necesita una resistencia estabilizadora y un dispositivo contra sobretensiones específicamente calculados y fabricados, y además, requiere la utilización de una celda más profunda!

■ Error en la intensidad que recorre el TC

Este error es muy frecuente. Pongamos de nuevo el caso de un relé diferencial de alta impedancia en el que I_{cc} del cuadro se tiene en cuenta en lugar de la corriente máxima que circula. Se trata de proteger un motor, los TC tienen una razón de transformación 100/1.

□ Resultado obtenido utilizando la corriente que circula

(7 I_n del TC):
 $V_k \geq 14 (R_{ct} + 2R_L)$.

□ Resultado obtenido con la I_{cc} del cuadro ($I_{cc} = 40$ kA):
 $V_k \geq 800 (R_{ct} + 2R_L)$.

¡No es necesario alargarse más para comprender el interés de elegir el dato idóneo!

La tabla de la **figura 9** indica los valores de corriente que hay que aplicar cuando esta corriente es básica para calcular el TC (Cuaderno Técnico nº 194).

Aplicaciones	$I_{m\acute{a}x}$ que atraviesa el sistema	$I_{m\acute{a}x}$ que atraviesa el sistema, con sobrecarga	Comentarios
Diferencial JdB	I_{cc} real del cuadro	I_{th} del cuadro	Tomar I_{cc} real, si no hay incremento posible. Si no, tomar I_{th}
Diferencial motor	I arranque motor	7 I_n (motor); por defecto, se toma 7 I_n (TC)	Si no se conoce ni la I de arranque ni la I_n del motor, tomar 7 x I_n TC
Diferencial generador	I_{cc} del generador, solo, o sea: $I_n (100/X'')$	7 I_n (generador); por defecto, se toma 7 I_n TC	X'' = reactancia subtransitoria en % del generador. Si no se conoce, se puede suponer X'' % ≥ 15 , o sea: $100/15 = 6,67$ (por exceso, se toma 7)
Diferencial de tierra resistente	I_{cc} vista por el primario del TC, para un defecto en el secundario del transformador, o sea: $I_{cc} = P_{sc} / U \sqrt{3}$ $P_{cc} = (P_t \cdot P_a) / (P_t + P_a)$	Si no se conoce P_a , se toma: $P_{cc} = P_t$ $P_t = P_n (100/U_{cc})$	P_a = potencia de cortocircuito aguas arriba y P_t = potencia limitada por el transformador $U_{cc}\%$ = tensión de cortocircuito del transformador
Diferencial de línea	I_{cc} para el 80% de la línea	Por defecto, I_{cc} del cuadro	Por defecto, I_{th} del cuadro

Fig. 9: Determinar claramente la corriente que circula.

- Con protecciones diferenciales de líneas, hay que tener presente los hilos piloto en el cálculo de R_{cableado} .

En efecto, R_L depende del cableado de conexión del TC con los relés situados al mismo lado (extremo) de la línea (figura 10).

No hace falta tener en cuenta la longitud de los hilos piloto que van hasta el otro extremo de la línea supervisada.

Repaso

Respecto a los diferenciales de alta impedancia:

- Para el cálculo de V_k mínima, tener en cuenta la corriente que circula (figura 9).

- El cálculo de la resistencia estabilizadora R_{st} es función de V_k mínima y de la corriente de ajuste de los relés.

- El cálculo de la tensión de cresta (V_p) se hace a partir de la I_{cc} interna de la zona protegida y de la V_k real del TC.

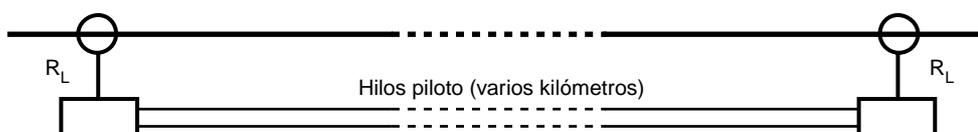


Fig. 10: R_L depende del cableado entre el TC y el relé situado en el mismo lado de la línea.

2.4 ¿Y si un TC no se puede fabricar?

Cuando un fabricante dice que no sabe fabricar el TC solicitado, nueve de cada diez veces es porque el TC está mal especificado. Para eliminar todos los márgenes de seguridad acumulativos que han tenido en cuenta cada uno de los implicados, hay que redefinir el TC a partir de las necesidades reales:

- intensidades de corrientes reales en la instalación,
- tipos de protección, potencia necesaria,
- estudio de la selectividad y plan de protección (ajustes).

Este proceso debe de hacerse cada vez que la especificación lleva a un TC no estándar. Todo esto afecta a los costes, los retrasos y la seguridad.

Por ejemplo:

Se ha calculado la clase X de un TC 1000/5 para la protección diferencial de un generador, suponiendo que $X'' = 15\%$.

Al no conocer las características concretas del generador, se toma la I_n del generador = I_n del TC, lo que da $I_f = \frac{100}{15} I_n$ del TC, o sea:

$V_k \geq 2 \times 6,7 \times 5 (R_{\text{ct}} + 2R_L)$ que de 6,7 se ha redondeado a 7.

Se ha supuesto que:

$2R_L = 300 \text{ m de } 2,5 \text{ mm}^2$, o sea $2,4 \Omega$ de donde: $V_k \geq 70 R_{\text{ct}} + 168$.

Puesto que el TC necesita otros dos arrollamientos, este valor no se podría conseguir con un molde estándar.

La solución se ha encontrado utilizando conexiones de 4 mm^2 y exigiendo que se precisen las características del generador.

Por tanto:

$2 R_L = 1,5 \Omega$,

I_n del generador = 830 A,

$X'' = 25\%$, de donde:

$$V_k \geq 2 \times \frac{830 \times 100}{25} \times \frac{5}{1000} (R_{\text{ct}} + 1,5)$$

$V_k = 33,2 R_{\text{ct}} + 50$.

La diferencia es importante y demuestra la necesidad tener buenas informaciones y conocer los márgenes de seguridad.

Si resulta imposible fabricar el TC, hay que encontrar una solución, un compromiso entre los diversos implicados. Con ayuda de los especialistas siempre se puede encontrar una salida.

A modo de ejemplo, he aquí algunas pistas:

- jugar con las equivalencias entre TC (capítulo siguiente),
- disminuir el coeficiente de seguridad (por ejemplo de 2 a 1,5 para una protección de máxima I),
- pasar el secundario de 5 a 1 A (figura 11),
- aumentar la sección del cableado,
- sobrecalibrar los TC (I_n primaria),
- desplazar el relé respecto al TC,
- utilizar los TC adaptadores de bajo consumo,
- ...

El sobrecalibrado de un TC puede resolver un problema de fabricación

Pongamos dos ejemplos:

- Un TC 100/1 cuya carga es de 2,5 VA necesita para una protección de máxima I, un FLP de 25.

Los TC estándar que se proponen tienen 2,5 VA-5P20. Si se propone un TC de razón de transformación 150/1 - 2,5 VA-5P20, la necesidad de FLP se reducirá según la razón de los primarios del TC, o sea que el FLP necesario será igual a $25 \times (100/150) = 16,7$; ¡por tanto, el valor 20 del FLP pasa a ser suficiente!

- Si la clase X solicitada para un TC es proporcional a la corriente que circula o a la I_{cc} primaria, estos valores quedan multiplicados por la razón de transformación del TC; de este modo, la tensión del codo será menor para un TC sobrecalibrado, salvo que el aumento de su resistencia R_{ct} , que aumenta, neutralice la ventaja de la razón de transformación.

En todos los casos, se tendrá que conseguir una tensión de codo mayor que con un TC con una razón de transformación baja, porque es proporcional al número de espiras del secundario.

Generalmente, la probabilidad de tener características que permitan su fabricación es mayor.

El mismo razonamiento puede aplicarse para un TC con secundario de 1 A comparado con uno de 5 A; sin embargo, la ventaja de aplicar el factor 5, obtenido de la fórmula de la razón de transformación, resulta frecuentemente anulado, y hasta invertido, con la aparición de un factor mucho más significativo: el aumento de la resistencia del arrollamiento del secundario. En efecto, el aumento de dimensiones necesario para multiplicar por cinco el número de espiras, lleva a reducir la sección del cableado, lo que evidentemente aumenta su resistencia lineal, con lo que la nueva resistencia puede quedar multiplicada por mucho más que 10 respecto a un TC de 5 A.

- Cuando se intenta proponer un sobrecalibrado de un TC, hay que verificar las consecuencias del cambio de la razón de transformación.

Por ejemplo:

□ Si el TC alimenta un diferencial con hilos piloto, hay que asegurarse que el TC correspondiente del otro extremo de la línea soporte también la misma transformación.

□ Si se trata de una protección de tierra con limitación (resistente), hay que asegurarse de que:

- también se modifique el TC del punto neutro,
- la detección del defecto a tierra no quede comprometida por el sobrecalibrado.

- Para todos los tipos de protección, habrá que comprobar que siga siendo posible el ajuste de la protección.

Longitud (m)	5	10	20	50	100	200	400
Pérdidas en el cableado (VA) por:							
$I_n = 1 \text{ A}$	0,04	0,08	0,16	0,4	0,8	1,6	3,2
$I_n = 5 \text{ A}$	1	2	4	10	20	40	80

Fig. 11: Pérdidas en el cableado de una sección de 2,5 mm² (8Ω/m a 20°C). Con 1 A, las pérdidas son 25 veces menores.

Optimización de los TC de una protección diferencial

Supongamos por ejemplo la protección diferencial de un transformador (**figura 12**).

■ Cálculo de la corriente que circula

La presencia del transformador limita la corriente que circula

$$\left(P_{cct} = \frac{5 \times 100}{8} = 62,5 \text{ MVA} \right)$$

□ La potencia de cortocircuito pasa a ser:

$$P_{cc} = \frac{600 \times 62,5}{600 + 62,5} = 56,6 \text{ MVA}$$

□ La corriente que pasa al secundario es:

– lado 11 kV:

$$I_{f1} = \frac{56,6 \times 10^6}{11\sqrt{3} \times 10^3} \times \frac{5}{300} = 49,5 \text{ A}$$

– lado 3,3 kV:

$$I_{f2} = \frac{56,6 \times 10^6}{3,3\sqrt{3} \times 10^3} \times \frac{5}{1000} = 49,5 \text{ A}$$

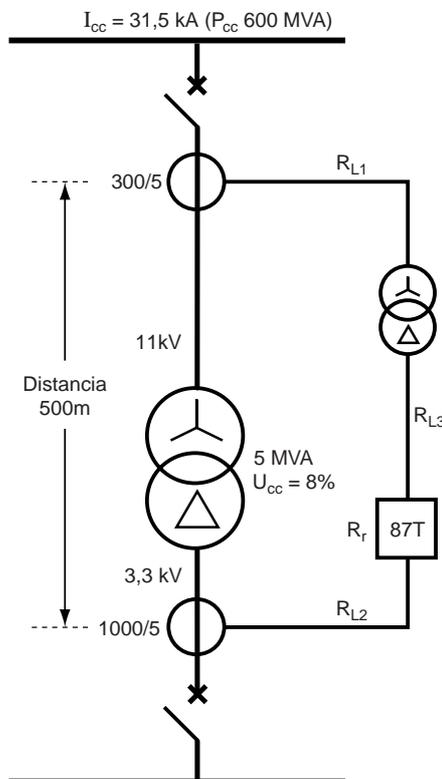


Fig. 12: Protección diferencial de un transformador.

■ Fórmulas a utilizar para V_k (protección clásica)

□ Cálculo de los TC adaptadores de la razón de transformación: $\frac{5}{5/\sqrt{3}}$:

$$V_{ka \text{ mini}} = \frac{4I_{f1}}{\sqrt{3}} [R_{sr} + 3(R_{L3} + R_p)]$$

□ Cálculo de los TC principales:

– lado 11 kV: 300/5

$$V_{k \text{ p1 min}} = 4I_f (R_{ct} + R_{L1} + R_{sp}) + V_{ka \text{ mini}} \frac{5}{5\sqrt{3}}$$

– lado 3,3 kV: 1000/5

$$V_{k \text{ pn2 mín}} = 4I_{f2} (R_{ct} + R_{L2} + R_r)$$

■ Gestión de la optimización

Analicemos el caso de un TC 300/5 situado en el cuadro de 11 kV.

□ Primera hipótesis

El TC adaptador $\frac{5}{5/\sqrt{3}}$ es el que propone

normalmente el fabricante de los relés de protección; está situado con el relé lado 3,3 kV. Todo el cableado es de 2,5 mm².

$$R_{L1} = 4 \Omega,$$

$$R_{L2} = 0,08 \Omega,$$

$$R_{L3} = 0,024 \Omega,$$

$R_{sr} = 0,25 \Omega$, resistencia del arrollamiento secundario del TC adaptador,

$R_{sp} = 0,15 \Omega$, resistencia del arrollamiento primario del TC adaptador,

$R_p = 0,02 \Omega$, resistencia del relé.

Se obtiene:

– $V_{ka \text{ mini}} = 43,7$ voltios, (V_{ka} del modelo estándar = 58 V),

– $V_{kp1 \text{ mini}} = 198 R_{ct} + 847$

□ Segunda hipótesis

Idéntica a la primera, excepto que el cableado de R_{L1} es de 10 mm², de donde $R_{L1} = 1 \Omega$.

Resultado:

– $V_{kp1 \text{ mini}} = 198 R_{ct} + 243$

□ Tercera hipótesis

El TC adaptador está al lado 11 kV, así el relé: $R_{L1} = 0,08 \Omega$.

– $V_{kp1 \text{ mini}} = 198 R_{ct} + 61$

□ Cuarta hipótesis

Idéntica a la tercera hipótesis, salvo que el TC adaptador no es estándar, sino que se ha hecho fabricar con estos datos:

$$R_s \leq 0,1 \Omega,$$

$$R_p \leq 0,1 \Omega,$$

lo que da como resultado:

$$- V_{ka \text{ mini}} = 26,5 \text{ V},$$

$$- V_{kp1 \text{ mini}} = 198 R_{ct} + 41$$

Se comprueba que modificando la sección del cableado, la posición y las características del TC adaptador, la ganancia en la tensión V_k del TC 300/5 es del orden de 800 V.

La misma solicitud efectuada para el TC 1000/5, situado en el lado 3,3 kV, da resultados semejantes en cuanto a V_k ; pero, teniendo en cuenta que un TC 1000/5 es más fácil de fabricar que un TC 300/5, es mejor colocar el relé y el TC adaptador en el lado 11 kV.

En el caso de que se utilice un TC de 1A, las mismas hipótesis que se acaban de utilizar permiten pasar de:

$$V_{kp1} = 39,6 R_{ct} + 249$$

a

$$V_{kp1} = 39,6 R_{ct} + 17$$

Los TC de 1 A pueden ser más fáciles de realizar que uno de 5, pero todo depende del peso relativo del R_{ct} y del cableado en el cálculo de V_k .

3 Equivalencia entre diversas definiciones posibles de un mismo TC

En muchos casos es necesario hacer malavarismos entre las diversas características de los TC: razón de transformación, potencia, clase, FLP. A veces, para salir de una situación difícil, pero también para poder utilizar TC estándar, disponibles en el mercado, más baratos y de comprobada eficacia.

Por tanto, en este capítulo vamos hacer un trabajo útil explicando cómo jugar con las diferentes características de un TC. A pesar de esto, hay que recordar que las únicas constantes de un TC son su curva de magnetización y su resistencia, y también, su razón de transformación.

3.1 Cómo pasar de $P_{n1} - 5Pk_1$ a $P_{n2} - 5Pk_2$

V_{s1} y R_{ct} son datos fijos.

$$V_{s1} = \left(R_{ct} + \frac{P_{n1}}{I_n^2} \right) k_1 I_n = \left(R_{ct} + \frac{P_{n2}}{I_n^2} \right) k_2 I_n = \left(R_{ct} + \frac{P_{n1}}{I_n^2} \right) k_1 I_n$$

Sabiendo que $P_i = R_{ct} I_n^2$ (pérdidas óhmicas internas del TC), se obtiene:

$$(P_i + P_{n1}) k_1 = (P_i + P_{n2}) k_2 = (P_i + P_{n3}) k_3.$$

A veces, hay quien pasa por alto P_i : es un grave error, porque P_i puede ser del mismo orden de magnitud, o incluso mayor, que P_n .

■ si P_{n2} es obligatorio, se tendrá:

$$k_2 = \frac{(P_i + P_{n1})}{P_i + P_{n2}} k_1 \quad \text{ó} \quad k_2 = \frac{(R_{ct} I_n^2 + P_{n1})}{(R_{ct} I_n^2 + P_{n2})} k_1$$

■ si k_2 es obligatorio, se tendrá:

$$P_{n2} = \frac{k_1}{k_2} P_{n1} + \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) P_i$$

o bien:

$$P_{n2} = \frac{k_1}{k_2} P_{n1} + \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) R_{ct} I_n^2$$

3.2 Cómo pasar de $P_{n1} - 5Pk_1$ a $P_{n2} - 10Pk_2$

Se tiene:

$$V_{s1} = \left(R_{ct} + \frac{P_{n1}}{I_n^2} \right) k_1 I_n$$

$$V_{s2} = \left(R_{ct} + \frac{P_{n2}}{I_n^2} \right) k_2 I_n$$

o sea

$$V_{s1} = \frac{1,6}{1,9} V_{s2}$$

■ si P_{n2} es obligatorio:

$$k_2 = \frac{1,9}{1,6} \frac{(R_{ct} I_n^2 + P_{n1})}{(R_{ct} I_n^2 + P_{n2})} k_1$$

o bien

$$k_2 = \frac{1,9}{1,6} \frac{(P_i + P_{n1})}{(P_i + P_{n2})} k_1$$

■ si k_2 es obligatorio, se tendrá:

$$P_{n2} = \frac{1,9}{1,6} \left[\frac{k_1}{k_2} P_{n1} + \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) R_{ct} I_n^2 \right]$$

Si se desea pasar de una definición 10P a una definición 5P, se pueden aplicar las expresiones anteriores; es suficiente invertir la razón de sus inducciones.

3.3 Qué valor tiene V_k de un TC: P_n -XPk

Cómo pasar de P_n -5Pk a V_k

Se ha visto que:

$$V_{s1} = \left(R_{ct} + \frac{P_n}{I_n^2} \right) k I_n$$

y que:

$$V_k = \frac{1,4}{1,6} V_{s1}$$

de donde:

$$V_k = \frac{1,4}{1,6} \left(R_{ct} + \frac{P_n}{I_n^2} \right) k I_n$$

Cómo pasar de P_n -10Pk a V_k

Del mismo modo:

$$V_k = \frac{1,4}{1,9} V_{s2}$$

de donde:

$$V_k = \frac{1,4}{1,9} \left(R_{ct} + \frac{P_n}{I_n^2} \right) k I_n$$

3.4 Cómo pasar de una clase X (V_k , R_{ct}) a una clase 5P: P_n -5Pk

■ Si suponemos que k es obligatorio, se tendrá:

$$P_n = \frac{1,4}{1,6} \left(\frac{V_k I_n}{k} \right) - R_{ct} I_n^2$$

Si el resultado es negativo, significa que no es posible conseguir con este TC el FLP solicitado, porque sus pérdidas internas son demasiado importantes.

■ Si suponemos que la P_n es obligatoria, se tiene:

$$k = \frac{1,4}{1,6} \left(\frac{V_k I_n}{P_n + R_{ct} I_n^2} \right)$$

Nota:

En este capítulo, los valores de inducción que se han dado (1,4 - 1,6 - 1,9) son a título de ejemplo, porque varían de un fabricante a otro.

4 Conclusión

Este Cuaderno Técnico sirve de complemento del Cuaderno Técnico nº 194 en su objetivo de sensibilizar, a todos los que intervienen en el proceso que va desde el diseño hasta la instalación y conexión de los TC, sobre las pérdidas de tiempo y de dinero que se derivan de una mala especificación de los mismos. Explica también algunos ejemplos de errores que no hay que cometer y da pistas de solución cuando la especificación original no es satisfactoria o cuando se ve a priori que no tiene solución.

Destaca también que la mejor solución se encuentra estudiando detenidamente las necesidades concretas de la instalación, aunque se ha de admitir que la comunicación con el fabricante del TC y especialmente el conocimiento de los niveles de inducción también permiten llegar a soluciones válidas jugando con las diversas equivalencias.

Esperamos por tanto que esta información pueda ser útil y de provecho.

Bibliografía

Normas

- CEI 60185: Transformadores de corriente. Características.
- CEI 60044-1: Transformadores de medida: Parte 1: Transformadores de corriente (sustituye la CEI 185).
- CEI 60044-8: Transformadores de medida. Parte 8: Transformadores de corriente electrónicos.
- NF-C 42-502: Transformadores de corriente. Características.
- BS 3938: Transformadores de corriente. Especificaciones.

Cuadernos Técnicos Schneider

- Protección de máquinas y de redes industriales AT. P. ROCCIA. Cuaderno Técnico nº 113.
- El transformador de corriente para la protección en AT. M. ORLHAC. Cuaderno Técnico nº 164.

- Protección de redes MT industriales y terciarias. A. SASTRE. Cuaderno Técnico nº 174.

- Las protecciones direccionales. P. BERTRAND. Cuaderno Técnico nº 181.

- Estabilidad dinámica de redes eléctricas industriales.

- B. DE METZ NOBLAT y G. JEANJEAN. Cuaderno Técnico nº 185.

- Transformadores de corriente: cómo especificarlos. P. FONTI. Cuaderno Técnico nº 194.

Obras diversas

- Guide de l'ingénierie électrique. ELECTRA - 07.86

- Protection des réseaux électriques. Ch. PREVE - Ed. Hermes - 06.98.