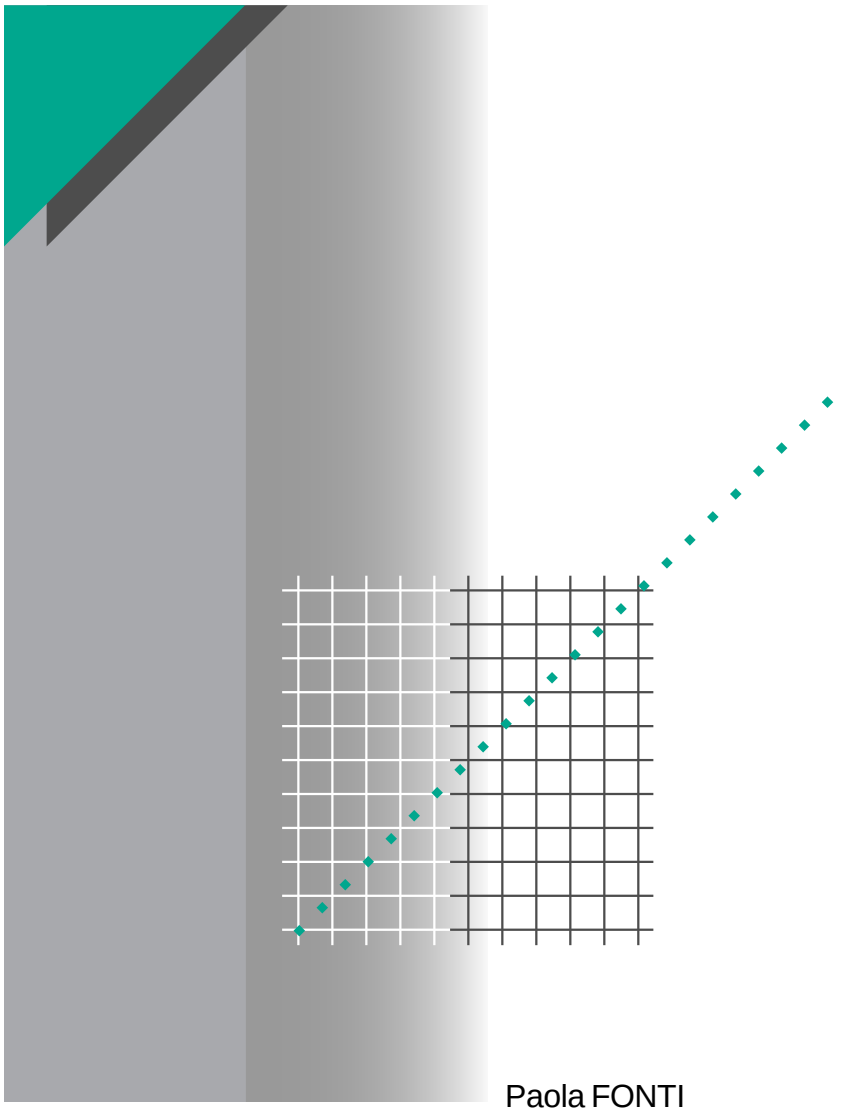
Cuaderno Técnico nº 194

Transformadores de intensidad: cómo determinar sus especificaciones



Paola FONTI

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

Schneider Electric

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 complemente 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» del **Schneider Electric**.

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 contenidas en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 194 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 194

Transformadores de intensidad: cómo determinar sus especificaciones

Paola FONTI

Ingeniera INPG (Instituto Nacional Politécnico de Grenoble), diplomada en 1970.

Entró en Merlin Gerin en 1981 como consejera y responsable de la unidad de estudios de exportación en MT. Actualmente es la responsable del Grupo de Apoyo a la Oferta y a la Realización de los proyectos MT que lleva a cabo el grupo Schneider.

Trad.: José Mª Giró

Original francés: diciembre 1998
Versión española: agosto 2000

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique

Schneider Electric

Terminología

I_f: corriente máxima que atraviesa una zona protegida.

I_s: umbral de reglaje en 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 (= $R_r\ I_n^2$): potencia absorbida por la carga real del captador de corriente con I_n.

R_L: resistencia del cableado.

R_p: resistencia del relé de protección.

Sobredimensionamiento 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 de carga, auxiliares o intercalados: TC de BT colocados en el secundario de los TC principales para adaptar su relación de transformación, y/o el desfase de la corriente.

Transformadores de intensidad: cómo determinar sus especificaciones

Para controlar la energía eléctrica es necesario instalar unidades de tratamiento de la información capaces de vigilar las redes o las instalaciones y, según las necesidades, poner en marcha actuaciones adecuadas…

Las unidades de protección y de control y mando tratan los datos que obtienen de los captadores, envían las órdenes oportunas de maniobra a la aparamenta y las informaciones convenientes al supervisor (que puede ser, por ejemplo, un centro de control).

La tarea de identificar y establecer las dimensiones de los captadores de corriente así como asociarlos a las unidades de protección y/o de medida siempre ha sido difícil tanto para el ingeniero eléctrico (sobredimensionado de las características) como para el proveedor e instalador (posibilidad de instalación compleja, tamaño excesivo, costes prohibitivos).

Este documento no vuelve sobre las demostraciones técnicas, ya ampliamente difundidas en otros estudios (Cuadernos Técnicos números 164 y 170); su objetivo es simplemente el de recordar algunas reglas sencillas que permitan definir lo mejor posible las características secundarias de los transformadores de intensidad (TC) según las protecciones y las aplicaciones para las que se usen.

En la práctica, este Cuaderno aporta una ayuda constructiva a los técnicos que lo necesitan:

- o porque no poseen las informaciones necesarias,
- o porque la conclusión a la que se ven abocados lleva a un tipo de captador que los posibles proveedores no pueden suministrar.

Índice

1 Introducción		**p.**	**6**
2 Perturbaciones y protecciones de las redes	2.1 Las perturbaciones	p.	9
	2.2 Las protecciones	p.	9
3 Los captadores de corriente	3.1 Repaso de los transformadores ferromagnéticos	**p.**	**11**
	3.2 Los captadores amagnéticos	p.	15
	3.3 Fabricación e instalación de los TC	p.	15
4 Elección de los TC según las protecciones y las aplicaciones	4.1 Elección de los FPL del TC según las protecciones	**p.**	**17**
	4.2 Caracterización de los TC según las aplicaciones	p.	19
	4.3 Caso particular de las protecciones diferenciales	p.	23
	4.4 Protecciones de distancia	p.	28
5 Ejemplos de especificación de TC	5.1 Protecciones de la conexión de un motor	**p.**	**30**
	5.2 Protecciones de salida de un transformador	p.	30
	5.3 Protección diferencial de un transformador	p.	31
	5.4 Protección diferencial de un juego de barras 87B	p.	32
6 Conclusión		**p.**	**35**
Bibliografía		**p.**	**36**

1 Introducción

El diseño de las redes eléctricas MT y AT es muy complejo y hay que tener en cuenta las necesidades que debe de satisfacer, como por ejemplo:

- la seguridad de las personas y los bienes,
- la continuidad de servicio,
- los costes de instalación y de explotación.

A partir de los puntos de consumo, de su coeficiente de simultaneidad y de los criterios anteriores, el diseñador establece el esquema de cableado unifilar y general de la instalación (**figura 1**).

Después ha de escoger el régimen neutro, determinar las canalizaciones, calcular las corrientes de defecto, definir el sistema de protección (selectividad, tipo de aparamenta... véase Cuaderno Técnico nº 174).

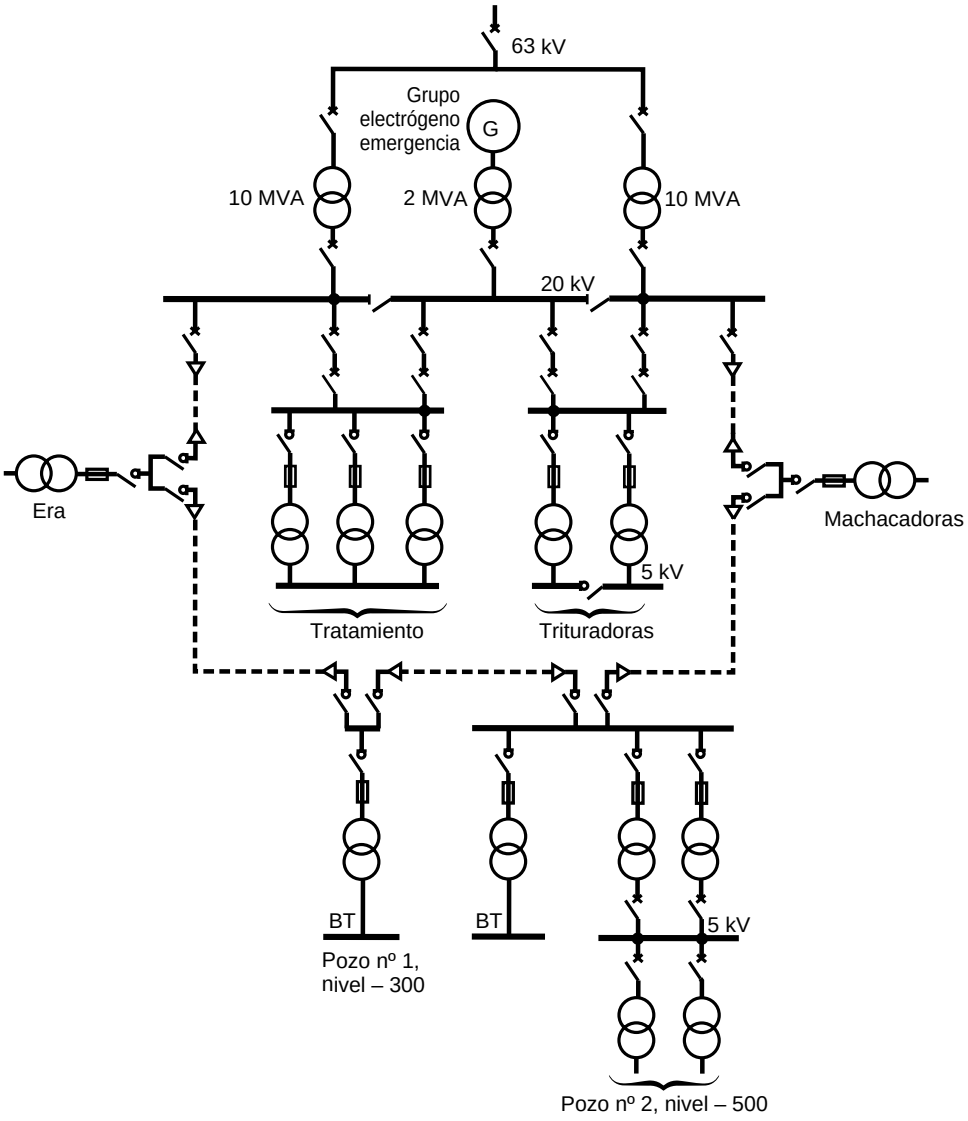


Fig. 1: Ejemplo de esquema general de cableado único de una mina.

La **figura 2** muestra un ejemplo de elección de protecciones para la fuente o grupo de emergencia del esquema de la **figura 1**.

El plan de protección ha de precisar las condiciones de actuación y no-actuación del conjunto de las protecciones durante un defecto y/o con los transitorios debidos a la explotación normal. Debe de indicar los valores de ajuste de las protecciones.

Sólo en raras ocasiones se necesitan las características del circuito de entrada de las protecciones y otros datos que sí son necesarios para definir los captadores de corriente (TC); de hecho, suele ser muy difícil para el diseñador reunir todas las informaciones necesarias.

Cuando se hace una instalación, las consecuencias de esa falta de información y definición pueden ser importantes: inadaptación, sobredimensionamiento, salirse del estándar, contratiempos de montaje y costes muy elevados, tener que añadir algún TC de adaptación, cambio del captador en el último momento… además de incumplimiento de los plazos de entrega, de puesta en servicio o de inicio de la producción, etc.

Peor todavía: una definición errónea puede producir un funcionamiento defectuoso de la cadena de protección, producir averías o deterioro de los equipos o, incluso, crear situaciones de peligro para las personas.

Algunos ejemplos:

- Sobrestimar la corriente de cortocircuito puede conllevar problemas de montaje, de tamaño y, por tanto, de coste adicional del captador.
- A la inversa, infravalorar la corriente de cortocircuito puede llevar a no detectar el fallo, con destrucción de equipos, peligro para las personas y paradas en la explotación.
- Un error en la potencia útil o de precisión necesaria puede dar lugar a un fallo en el funcionamiento o impedir que se produzca el disparo de las protecciones con la destrucción del material, peligro para el operador y paro en la explotación.

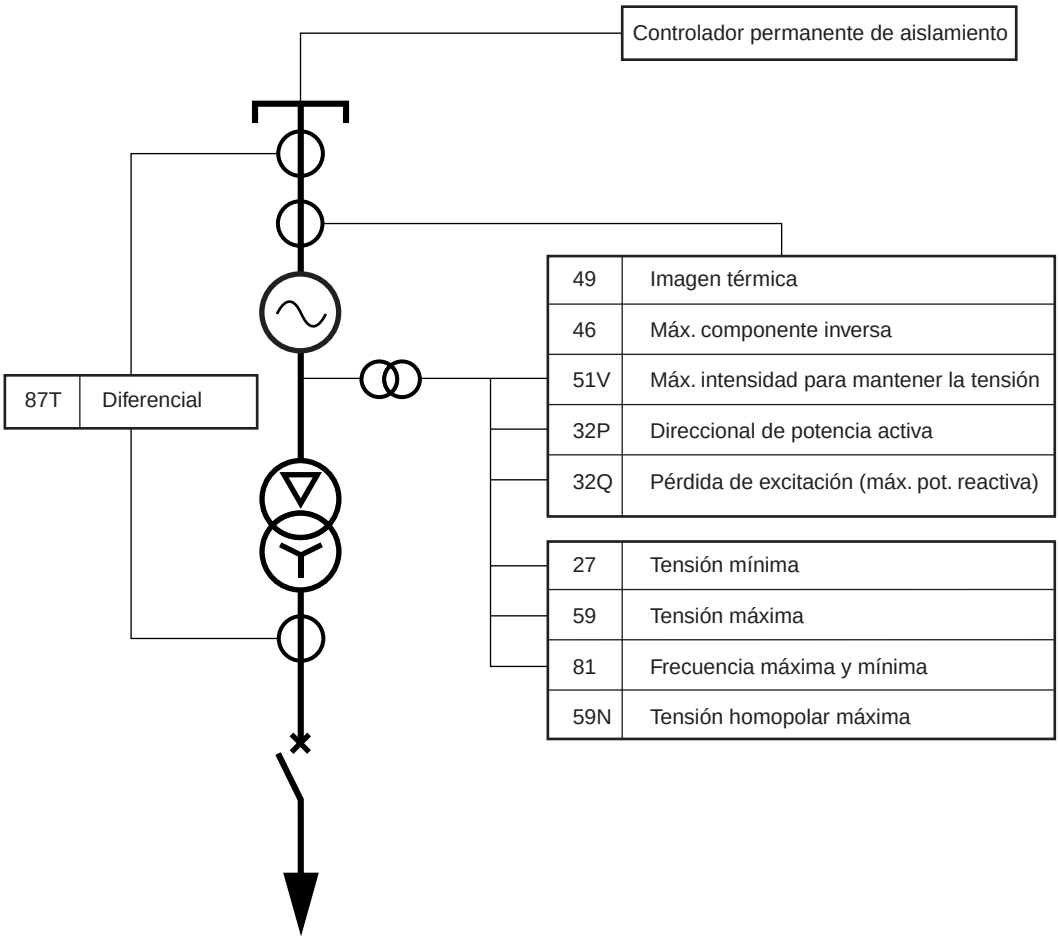


Fig. 2: Protecciones de un grupo bloque de media potencia.

■ Un error en la definición de la clase de precisión de un arrollamiento de medida puede producir un error en la facturación de la energía y una pérdida para el distribuidor o para el cliente.

■ Etc.

El objeto de este documento es pues el de aportar una ayuda en el proceso de definición de los captadores de corriente. Antes de entrar en la parte central del tema, puede ser útil recordar la información necesaria para definir un TC (tabla de la **figura 3**).

Información necesaria	**Abreviaturas**	**Unidades de medida**
Nivel de aislamiento	U_n	kV
Corriente de cortocircuito nominal Duración (1 ó 3 segundos)	I_{cc} t	kA s
Corriente primaria nominal	I_p	A
Número de arrollamientos (1 a 3)		
Para cada arrollamiento secundario: ■ Tipo ■ Protección o medida asociada y su ajuste ■ Potencia de precisión útil (consumo del equipo y del cableado) ■ Factor de precisión: □ de protección □ de medida	 $P_{útil}$ FLP FS	 VA
■ Intensidad secundaria nominal (1 ó 5 A)	I_s	A

***Fig. 3**: Datos necesarios para la especificación de un TC con un único arrollamiento primario.*

2 Perturbaciones y protecciones de las redes

2.1 Las perturbaciones

Recordemos brevemente que una red eléctrica MT o AT sufre perturbaciones frecuentes:

- excepcionalmente, por subidas de tensión causadas por rayos, o por calentamientos debidos a sobrecargas o cortocircuitos francos entre fases o entre fase y tierra,
- más frecuentemente, y de manera más natural, debido a subidas de tensión durante las maniobras (por ejemplo, la conexión de un transformador de potencia o de un condensador) o a causa de los regímenes transitorios naturales (por ejemplo, arranque de motores) que producen importantes incrementos de la intensidad pero que son temporales.

Las consecuencias de las perturbaciones

Las perturbaciones importantes, como las corrientes de cortocircuito, pueden tener consecuencias negativas importantes:

- fatiga o deterioro de los componentes de la red,
- peligro para las personas,
- pérdidas de alimentación y de producción…

Es necesario, pues, suministrar informaciones correctas a las protecciones para que sea posible una acción rápida, ya que cuanto más importantes son los daños, más largas y costosas serán las reparaciones y mayores las pérdidas.

Sin embargo, las perturbaciones transitorias y normales son un problema de difícil control y las instalaciones han de estar preparadas para poderlas soportar. Por otra parte, el o los pares captador/protección no deben de provocar desconexiones intempestivas.

La eliminación de los fallos

La supervisión permanente de las magnitudes eléctricas de la red que llevan a cabo los captadores fiables que alimentan a los relés de protección permite aislar rápidamente la zona con problemas. Estos relés han de ignorar una perturbación transitoria y normal y actuar sin demora cuando se trata de un fallo destructivo que se ha de eliminar.

2.2 Las protecciones

Definición de las protecciones

- Papel de las protecciones

Los elementos de protección de una red están destinados a controlar uno o varios parámetros de la instalación, por ejemplo: las corrientes, la tensión, la temperatura, la frecuencia…

Estas magnitudes se miden permanentemente y se comparan con valores de referencia o de ajuste que son los que determinan si una situación se define como anormal y peligrosa. Cuando aparece un fallo, la protección da las órdenes de desconexión o disparo para aislar de forma duradera la parte que ha fallado, y, para aislar la zona, impide la reconexión hasta que se haya reparado el equipo. También puede hacer enviar una alarma que informe al personal de mantenimiento para que intervenga.

- Las tecnologías

Con el desarrollo tecnológico, especialmente rápido en el campo de la electrónica, los relés de protección, originariamente electromecánicos, se han convertido en dispositivos estáticos: electrónica analógica y después digital gracias a los microprocesadores. Estos dispositivos realizan funciones cada vez más evolucionadas y se les considera unidades de tratamiento de datos.

El uso de la tecnología digital se extiende para todo tipo de aplicaciones (tanto para proteger los diversos segmentos de la red como para los receptores).

Esta tecnología tiene grandes posibilidades en el tratamiento de datos lo que permite el control y mando de las funciones de protección y la comunicación con un supervisor o con un sistema de mando centralizado.

Estas unidades llevan generalmente un programa estándar de protección, de mando y de señalización, que permite utilizarlas sin un estudio complementario y una programación; solamente es necesario hacer los ajustes propios de su puesta en servicio (por ejemplo, el ajuste de las protecciones).

Están diseñadas para satisfacer completamente las necesidades de una aplicación: basta con escoger en el catálogo la versión adecuada a las funciones que se necesitan. Ejemplos de aplicaciones:

- transformadores,
- generadores,
- condensadores,
- motores,
- subestaciones,
- etc.

Llevan incluidos aparatos de medida como amperímetro, voltímetro, vatímetro o contador de energía…, con lo que se ahorra en cableado y se tiene una importante reducción del volumen. Además, como absorben una potencia menor que la de los relés electromagnéticos, necesitan TC de menor potencia y, por tanto, más económicos. Además de sus funciones de protección suelen tener un visor o display para mensajes de alarma y de información normal.

- Los captadores de corriente

Las características de los TC se definen según la tecnología escogida para la unidad de tratamiento y las funciones previstas (protección, medida, control y mando, señalización).

- La instalación

La elección del ajuste de las protecciones es muy delicada lo que obliga a conocer muy bien los valores de magnitud. El ajuste debe de hacerse de manera el sistema de protección pueda distinguir entre una perturbación normal y transitoria u otra causada por un defecto que se ha de eliminar. ¡Es sabido que un cortocircuito en un punto de la red puede afectar hasta a la fuente!

El estudio de la coordinación de las protecciones permite no desconectar más que la parte de la red con el defecto.

Las protecciones relativas a cortocircuitos entre fases o entre fase y tierra necesitan, según los casos, una selectividad del tipo:

- amperimétrica,
- cronométrica,
- lógica,
- diferencial,
- direccional.

(Cuadernos Técnicos nº 174 y 113).

3 Los captadores de corriente

3.1 Repaso de los transformadores ferromagnéticos

TC medida y protección

Los transformadores de intensidad se utilizan para suministrar información a los «relés» de protección y/o medida de la corriente, de la potencia, de la energía. Por eso han de entregar una intensidad secundaria proporcional a la primaria que pasa por ellos. Por tanto, se han de adaptar a las características de la red: tensión, frecuencia y corriente.

Se definen por su razón de transformación, potencia y clase de precisión. Su clase de precisión (precisión en función de la carga del TC y de la sobreintensidad) se escoge en función del uso.

- Un TC de «protección» ha de tener su punto de saturación alto, de tal manera que permita medir, con suficiente precisión, una corriente de defecto para una protección cuyo umbral de disparo sea muy elevado. Generalmente, el Factor Límite de Precisión (FLP) de estos captadores de corriente tiene gran importancia. Hay que advertir que el relé asociado a ellos debe de ser capaz de soportar sobreintensidades importantes.
- Un TC de «medida» necesita una precisión muy buena en el margen próximo a la corriente nominal; en cambio, no es necesario que los aparatos de medida soporten corrientes tan importantes como los relés de protección. Es por eso que los TC de «medida» tienen, al contrario que los TC «protección», un Factor de Seguridad (FS) máximo para evitar sobrecargar fácilmente los aparatos de medida.
- Existen TC que tienen arrollamientos secundarios encargados de la protección y la medida. Estos TC de «medida» y «protección» se rigen por la norma CEI 60 044-1.

La adecuación de los TC a los relés de protección necesita un buen conocimiento de los TC; el resto de este capítulo recuerda algunos puntos importantes de este tipo de TC.

Datos característicos de los TC

- Ejemplo de un TC de protección:
  - intensidad primaria asignada: 200 A,
  - intensidad secundaria asignada: 5 A,

15 VA 5P 10
- → factor límite de precisión = 10
- → clase de precisión = 5P
- → potencia de precisión = 15 VA

  - potencia de precisión: P_n = 15 VA,
  - factor límite de precisión (FPL) = 10,
  - para I = FLP, su precisión es de 5% (5P) (**figura 5**).

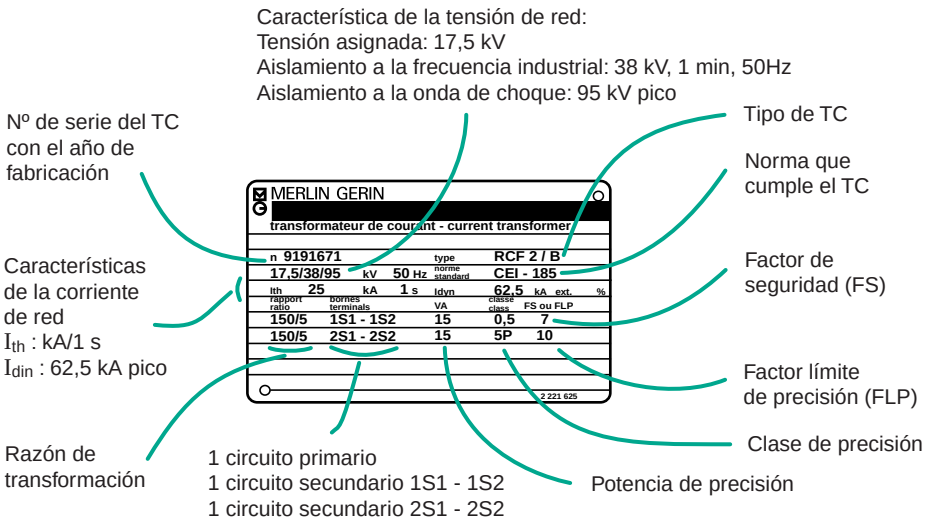


Fig. 5: Ejemplo de placa de características de un transformador de intensidad con dos secundarios.

Simplificando, si la carga consume 15 VA con I_n, el error sobre la razón de transformación es inferior al 5% con 10 I_n.

Pero los datos no son suficientes. También es interesante conocer los valores normalizados.

■ Algunas definiciones:

□ Corriente primaria asignada (nominal) I_1:

Es un valor normalizado; se escoge entre los valores discretos: 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A y sus múltiples decimales.

□ Corriente secundaria asignada (nominal) I_2:

Es igual a 1 ó 5 A.

□ Razón de transformación (I_1 / I_2):

Si las corrientes primarias y secundarias están normalizadas, estos valores son discretos.

□ Carga de precisión:

Valor de la carga sobre el que se basan las condiciones de precisión.

□ Potencia de precisión asignada (nominal) P_n:

Expresada en VA, corresponde a la potencia aparente que la corriente secundaria nominal (asignada) suministra al circuito secundario y a la carga de precisión. Los valores nominales son: 1 - 2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 VA.

□ Potencia real P_r:

En este Cuaderno Técnico, es la potencia que corresponde al consumo de la carga real del TC en I_n.

□ Clase de precisión:

Define los límites de errores garantizados sobre la razón de transformación y sobre el desfase en las condiciones definidas de potencia y de corriente.

La tabla de la **figura 6** expresa los límites para las clases de precisión nominales 5 P o 10 P.

□ Clase de precisión particular:

La clase X es una clase de precisión definida por la norma inglesa BS 3 938. Igualmente ha de ser definida en la futura norma CEI 60 044-1 bajo el nombre de PX. Esta clase necesita el valor mínimo de la tensión de V_k del TC.

Impone también un valor máximo de R_{TC} (resistencia interna del TC vista del secundario).

Algunas veces, necesita el valor máximo de la corriente magnetizante I_0 para la tensión en el codo de curva.

Si se considera la curva de magnetización V (I_0) del TC, la tensión de codo V_k se define como la correspondiente al punto de la curva a partir de la cual un aumento del 10% de la tensión implica un aumento del 50% de la corriente magnetizante I_0.

La clase X corresponde a una precisión de medida mejor que las clases 5 P y, necesariamente por tanto, que 10 P (**figura 7**).

Siempre es posible encontrar una equivalencia entre un TC definido en clase X y un TC 5 P, eventualmente 10 P (el Cuaderno Técnico nº 195 trata de las equivalencias).

□ Factores de precisión real (F_p o K_r)

Es la razón entre la sobreintensidad que corresponde al error nominal y la intensidad asignada del TC cuando soporta una carga real diferente de la carga nominal.

□ Factor límite de precisión (FLP o K_n)

Es la razón entre la sobreintensidad nominal (por ejemplo 10 I_n) y la corriente asignada (I_n).

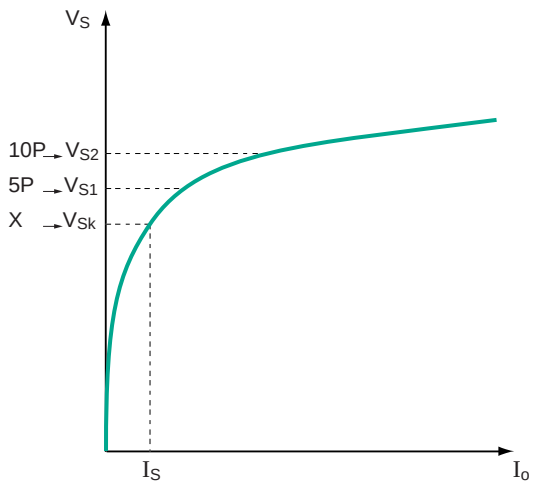


Fig. 7: Tensiones que corresponden a las diferentes clases de TC.

Clase de precisión	Error de corriente para la corriente nominal en %	Defasaje para la corriente nominal		Error compuesto para la la corriente límite de precisión en %
		minutos	centirradianes	
5P	± 1	± 60	± 1,8	5
10P	± 3	-	-	10

Fig. 6: Errores en el módulo y la fase en la corriente nominal según la norma CEI 60 044-1.

☐ Corriente de corta duración admisible

Expresada en kA, es la corriente I_{th} máxima admisible durante un segundo (con el secundario en cortocircuito). Representa la resistencia térmica del TC a las sobreintensidades (los valores nominales los dan las normas citadas en el anexo).

☐ Tensión asignada del TC

Es la tensión asignada que se aplica al primario del TC. Recordemos que el primario está conectado a AT y que el secundario (que no ha de ser abierto jamás) tiene generalmente uno de sus bornes conectado a tierra.

Como para el resto de los componentes, se define también una tensión máxima de resistencia durante un minuto a frecuencia industrial y una tensión máxima de resistencia a la onda de choque; las normas definen sus valores.

Ejemplo: para una tensión asignada de 24 kV, el TC ha de soportar 50 kV durante 1 minuto a 50 Hz y 125 kV en la onda de choque.

■ TC con varios secundarios

Algunos TC pueden tener varios secundarios dedicados a protección o a medida.

Los casos más típicos son los TC con 2 secundarios y, más raramente, con 3.

Físicamente, estos TC reúnen en un mismo aparato el equivalente de 2 ó 3 TC independientes que pueden ser de clases y de razones de transformación diferentes (**figura 8**).

Influencia de la carga en el factor límite de precisión

Recordemos que el esquema equivalente simplificado del captador de corriente magnética es el que está representado en la **figura 9**.

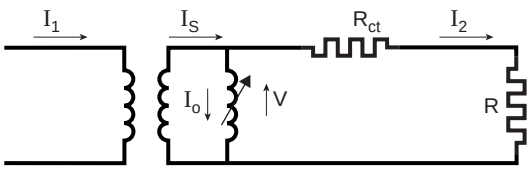


Fig. 9: Esquema equivalente de un TI.

Aplicando la ley de Ohm a este esquema, se puede escribir: $V = I_2 (R_{ct} + R)$,

siendo:

R_{ct}: resistencia del arrollamiento secundario del TC,

R: resistencia de la carga R_p, incluido el cableado,

☐ si $I_2 = k_n I_n$; y $R = R_n = P_n / I_n^2$,

$V_n = k_n I_n (R_{ct} + R_n)$ **(1)**

(k_n = FLP nominal)

☐ si $I_2 = k_n I_n$; y $R = R_p = P_r / I_n^2$,

$V_r = k_n I_n (R_{ct} + R_p)$.

En la **figura 10**, se puede ver que, si R_p es mucho menor que R_n, el codo de saturación del captador está lejos de alcanzar el factor límite de precisión k_n previsto.

El factor límite de precisión real que corresponde a la carga real (protección + cableado) se puede calcular. Se trata del $FPL_r = K_r$ en el que se alcanza el codo de saturación:

$V_n = k_r I_n (R_{ct} + R_p)$ **(2)**

Si R_p es inferior a R_n resulta que k_r es superior a k_n ($FLP_r > FLP$).

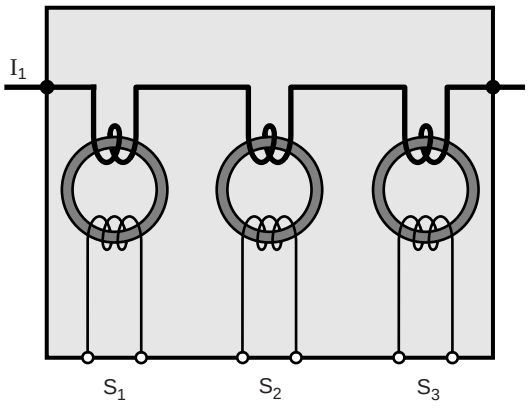


Fig. 8: Principio de construcción de un «TC con 3 secundarios» (con 3 arrollamientos en una única envolvente).

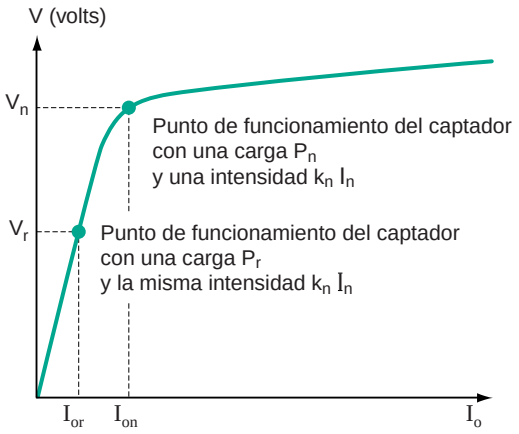


Fig. 10: Puntos de funcionamiento del TC según su carga.

Combinando las ecuaciones (1) y (2), se llega a la fórmula:

$$k_r = k_n \frac{R_{ct} + R_n}{R_{ct} + R_p}$$

o también: $k_r = k_n \frac{P_i + P_n}{P_i + P_r}$

donde:

$P_i = R_{ct}\ I_n^2$ = pérdidas internas del captador de corriente a I_n,

$P_n = R_n\ I_n^2$ = potencia de precisión del captador de corriente,

$P_r = R_p\ I_n^2$ = consumo de la carga real del captador de corriente con I_n.

Es evidente que el buen funcionamiento de un relé de protección está relacionado con el comportamiento del TC asociado y con su carga real; no al comportamiento del que está asociado a una carga nominal teórica.

La necesidad real permite determinar la potencia mínima de precisión que se debe escoger.

Usar un TC con una carga $P_r < P_n$ aumenta el FLP. De la misma manera, el FLP aumenta cuanto menor es el R_{ct} (las pérdidas internas P_i) (**figura 11**).

El cálculo del FLP real (k_r) de un captador, asociado a su carga real permite, en todos los casos clásicos, verificar la buena elección de un captador.

Nota: para las protecciones muy sensibles (por ejemplo las diferenciales), la definición de los transformadores de corrientes se hace a menudo en la clase X. La clase X siempre tiene en cuenta la carga real del TC y de sus propias pérdidas internas.

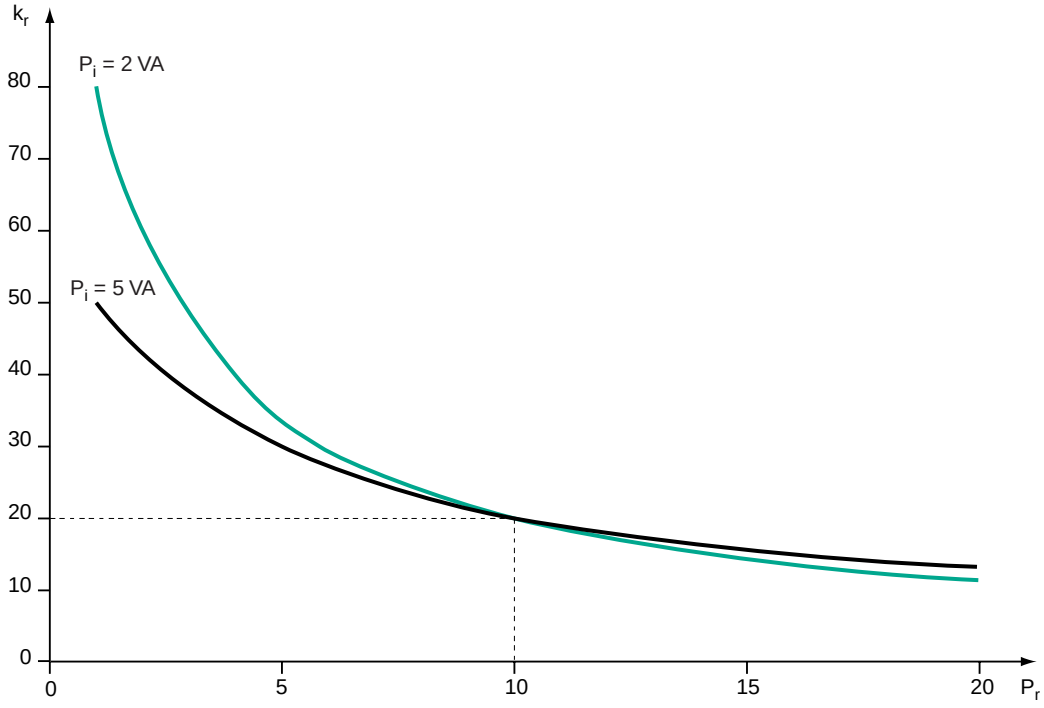


Fig. 11: Evolución del factor límite de precisión kr = f(P_r) de un TC de 10 VA-5P20, según la carga real que llega por cable al secundario con pérdidas internas (R_{ct}) diferentes.

3.2 Los captadores amagnéticos

La señal de salida que entregan los captadores amagnéticos (todavía llamados bobinas de ROGOWSKI), es una tensión proporcional a la derivada de la corriente primaria:

(ley de Lenz: $e = n \frac{d\phi}{dt}$).

Estos captadores no se saturan y su respuesta es lineal, por lo que se pueden utilizar para márgenes muy amplios de corriente; la única limitación es la dinámica y la linealidad del circuito de entrada de la protección asociada.

La tecnología de las unidades de protección y de control y mando conectadas a estos captadores amagnéticos es del tipo digital con microprocesador. Esta tecnología es adecuada para tratar las señales de poca amplitud.

Para un captador amagnético dado, teniendo en cuenta la linealidad de la señal de salida, la corriente nominal primaria se sustituye por un margen de, por ejemplo, 30 a 300 A.

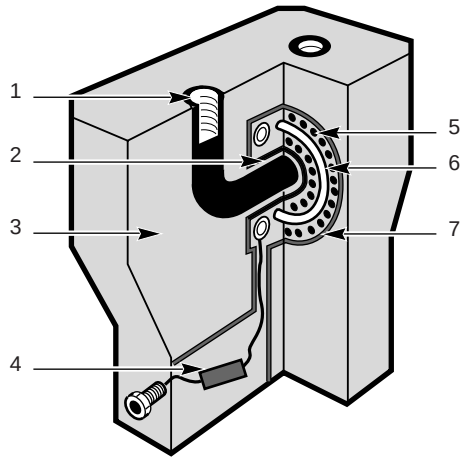
Además del interés de la linealidad, el uso de los TC amagnéticos:

- reduce los riesgos de error en la elección de corriente primaria al diseñar la instalación,
- reduce el número de modelos que hay que tener disponibles y minimiza el plazo de entrega.

Estos captadores se utilizan poco hoy en día; tendría que definirlos una norma (CEI 60 044-8). Schneider Electric utiliza estos captadores, (**figura 12**) juntamente con las unidades de protección, control y mando y medida Sepam desde 1 986.

Para determinar TC el necesario, sólo hace falta indicar:

- el nivel de aislamiento del captador, definido como para un TC clásico,
- la corriente de cortocircuito térmico asignada (I_{th}) y la corriente dinámica (I_{dyn}), establecidas según las mismas reglas que para los TC,
- la gama de uso (corriente primaria asignada y corriente de calentamiento).



1 - Arrollamiento primario
2 - Pantalla dieléctrica
3 - Aislamiento dieléctrico
4 - Resistencia de ajuste
5 - Arrollamiento secundario
6 - Soporte del bobinado secundario
7 - Blindaje magnético

***Fig. 12**: Corte de un captador no magnético usado en MT.*

3.3 Fabricación e instalación de los TC

Los TC son productos industriales que han sido diseñados respetando las normas. Se fabrican en serie, lo que permite disminuir los costes y garantizar sus características.

Su parte activa tiene un doble molde para respetar las definiciones de aislamiento, calentamiento, resistencia electrodinámica... El número de envolventes que corresponde a una gama estándar está necesariamente limitado.

Por otra parte, la aparamenta y los TC se instalan normalmente en las celdas que han sido optimizadas, estandarizadas y que han sufrido tests de calidad. En este caso, el uso de envolventes o moldes estándar es obligatorio porque los TC cumplen otras funciones, como puede ser el «paso» entre compartimientos cableados y el del interruptor automático (**figura 13**). Por eso, cualquier modificación de volumen o de la forma de un TC implica una inversión importante en estudio, fabricación y tests.

Para resolver los casos particulares, sin sobrecoste ni riesgo técnico suplementario, se aconseja buscar soluciones para «entrar en los moldes» de los TC estándar.

De esta manera, la estructura de las celdas se conserva intacta. Estas soluciones se basan:

- en el correcto dimensionado de las características eléctricas, evitando, por ejemplo, el sobredimensionado en potencia y en FLP,
- en el uso de TC de dos o tres arrollamientos,
- en el uso de «relés» que puedan actuar sobre varias protecciones con los mismos valores normalizados.

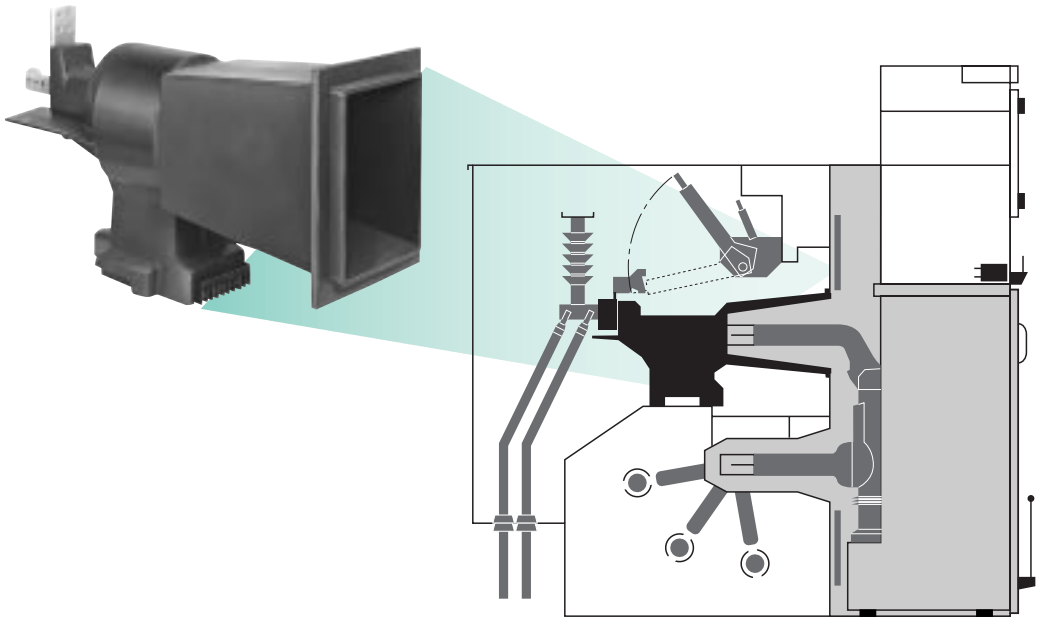


***Fig. 13**: Vista del corte de una célula y TC multifuncional.*

4 Elección de los TC según las protecciones y las aplicaciones

Tener un perfecto conocimiento de los TC, de sus posibilidades y de sus límites, sólo es útil si, además, se sabe con qué relé va asociado, sus características y el margen de intensidades de corriente a controlar.

Las protecciones que se instalan en una red eléctrica se definen en el plan de protección.

Esto requiere conocer, para las protecciones escogidas, su posición y sus datos de ajuste. Determina también la posición de los TC, su razón de transformación y, más raramente, la potencia, precisión y FLP. En efecto, para determinar completamente un TC se necesita saber también:

- la impedancia de entrada de las protecciones,
- la impedancia del cableado,
- los márgenes de funcionamiento de las protecciones (normalmente integrados en el estudio de coordinación de las protecciones).

Hoy en día, la mayor parte de las protecciones son de tecnología digital, muy precisas y fieles: la precisión de los TC es un factor determinante.

El tipo de protección influye también en la precisión requerida a los captadores:

- una protección contra sobreintensidad tiene simplemente en cuenta el valor de la corriente,
- una protección diferencial compara dos intensidades,
- una protección de tierra mide la suma de tres corrientes de fase.

4.1 Elección de los FPL del TC según las protecciones

Para la elección un TC entre los TC estándar, recordemos la relación entre el FPL nominal (relacionado con R_n) y el FLP real (relacionado con la carga real R_p):

$$k_n = k_r \frac{R_{ct} + R_p}{R_{ct} + R_n} \quad \text{o} \quad k_r = k_n \frac{R_{ct} + R_n}{R_{ct} + R_p}$$

Un TC puede alimentar varias protecciones diferentes independientes o unidas en un sistema multiprotección (por ejemplo el Sepam). Esto nos lleva a examinar el dimensionamiento de las protecciones.

Protección de I máxima de tiempo constante

El umbral I_s (reglaje de la protección) puede variar, por ejemplo, de 2 a 10 I_n del TC si el I_n del TC corresponde al I_n de la aplicación.

Para estar seguro de que el TC no va a comprometer la precisión de funcionamiento de la protección, es habitual tomar un «coeficiente de seguridad» de 2 (**figura 14**).

Así, el FLP_r (k_r) en la carga real será:

$$k_r \geq 2_n \frac{I_s}{I_n} = 20$$

si I_s máx = 10 I_n.

Ejemplo:

TC 200/5 - 10 VA - 5P10,
I_n del receptor: 160 A,
I_s = 8 I_n del receptor.
La pregunta es: ¿el TC propuesto es válido?

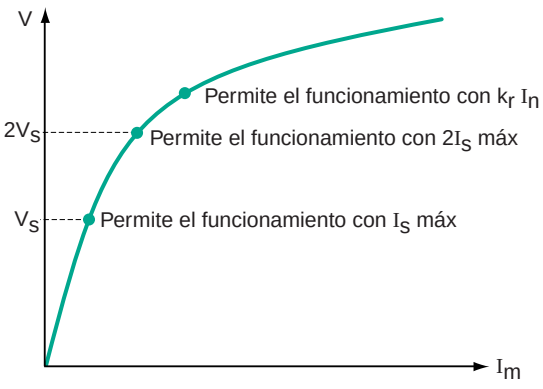


Fig. 14: Puntos de funcionamiento del TC en el umbral máximo.

Veamos:

$$\frac{I_s \text{ de la } I_{máx}}{I_n \text{ del TC}} = 8\,\frac{160}{200} = 6,4$$

el FLP_r (k_r) mínimo deseable es pues:
$k_r \geq 2 \times 6,4 = 12,8$.
Si se conocen la carga del TC y su resistencia interna, con, por ejemplo:

$$R_{ct} + R_p = \frac{1}{2}\left(R_{ct} + R_n\right)$$

se obtiene:
$k_r = 2$. $k_n = 20$: superior al valor mínimo necesario; por tanto, el TC en válido.

Protección de I máxima a tiempo inverso

Si se busca una precisión correcta en toda la curva del relé hasta 10 I_s siempre con I_n del TC igual a I_n de la aplicación, el mismo razonamiento anterior conduce a:

$$k_r \geq 2\,\frac{10\,I_s}{I_n}$$

Sin embargo, si la corriente de cortocircuito máximo de la instalación (I_{cc} máx.) es inferior a 10 x I_s, el k_r puede ser muy bajo:

$$k_r \geq \frac{I_{cc}\ \text{máx.}}{I_n} \text{ en lugar de } k_r\ 2 \geq \frac{10\,I_s}{I_n}.$$

Protección direccional de corriente

Las reglas, salvo casos particulares (Cuaderno Técnico nº 181), son las mismas que para las protecciones de I máxima.

Obsérvese que para las tres protecciones de corrientes tratadas anteriormente:

- si varias protecciones de corriente se alimentan desde el mismo TC, hay que dimensionar tomando como referencia la que tiene la curva más baja con grandes corrientes (la temporización más corta),
- en los casos difíciles, el coeficiente de seguridad de 2 se puede rebajar a 1,5.

Protección de I «homopolar» máxima

La protección se alimenta de la suma vectorial de las corrientes secundarias de 3 TC, conectados según el montaje de Nicholson, (**figura 15**). Es preferible utilizar TC idénticos y del mismo fabricante. De todas maneras, si cuando se mide una gran intensidad de corriente hay una componente continua (por ejemplo, por conectar un transformador), este montaje (con el secundario de 3 TC en paralelo) va a dar un valor falso de corriente homopolar que puede provocar el funcionamiento intempestivo de la protección.

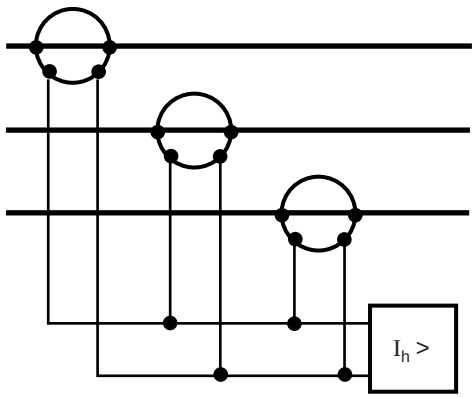


Fig. 15: La suma vectorial de las corrientes de fase da la corriente homopolar.

A título de ejemplo, con TC 5P10, un umbral de protección de 10% de I_n de los TC es un límite por debajo del cual existe el riesgo de disparo intempestivo de las protecciones a tiempo constante.

El factor límite de precisión de los TC viene dado por la expresión: $k_{rh} > X\,\frac{I_{hs}}{I_n}$.

El coeficiente de seguridad (X) generalmente es igual a 6 (dato de los fabricantes de relés). Esto se debe a que el TC de la fase con un defecto a tierra ha de ser capaz de desarrollar una tensión $V_h = X\ I_{hs}\ (R_{ct} + 2R_L + R_h)$.

Hay que destacar que:

- si un TC alimenta también a un relé de I máxima, R_h se sustituye por $R_h + R_p$.
- si se prevén inicialmente los TC para una protección de I máx, es aconsejable verificar cuáles son los más convenientes para alimentar de la misma manera una protección homopolar. Así, si tenemos un TC 100/1 - 10 VA-5P10, su k_{rh} viene dada por la expresión:

$$k_{rh}\ \frac{R_{ct} + P_n / I_n^2}{R_{ct} + 2R_L + R_p + R_h}\ k_n.$$

Sabiendo que la impedancia del relé utilizado depende del reglaje de I_h (aquí 0,1 A), al dar valores, se tiene:

$$R_n = \frac{1\,VA}{(0,1\,A)^2} = 100$$

$$k_{rh} = 10\left(\frac{3+10}{3+1+4+100}\right) = 1,2.$$

Al comparar este valor con la expresión:

$$k_{rh} = 6\,\frac{0{,}1}{1} = 0{,}6$$

se ve que el TC es adecuado.

Si la corriente de cortocircuito es muy fuerte y la temporización de la protección es corta, para evitar un funcionamiento intempestivo puede ser necesario conectar una resistencia de «estabilización» en serie con el relé homopolar; en el punto 4.3 se analizará más detalladamente la función de esta resistencia.

Frente a las dificultades que puede presentar la asociación de 3 TC, es preferible, siempre que sea posible, utilizar un toro que abarque las tres fases (**figura 16**). Señalemos que las tres fases han de estar situadas en el centro del toro para evitar una saturación local del material magnético.

El uso de un toro permite escoger umbrales de funcionamiento más bajos (de sólo algunos amperios).

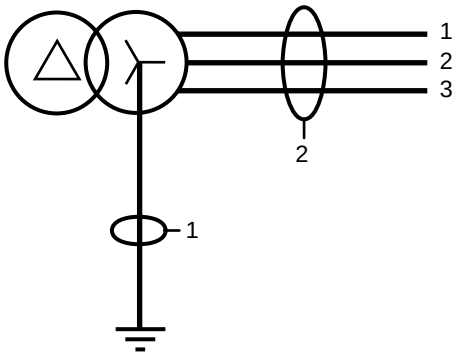


Fig. 16: El toro situado en (1) o en (2) da la misma información... pero el toro situado en (1) controla además los fallos situados hacia arriba del toro (2).

Protecciones diferenciales

Las protecciones diferenciales se usan cada vez más para la protección de los transformadores, máquinas rotatorias y juegos de barras, y tienen la ventaja de ser rápidas e independientes de otras protecciones en cuanto a la selectividad.

Estos «relés» intervienen a menudo durante el periodo transitorio de una corriente de falta. Del mismo modo que con las protecciones homopolares, también aquí una componente continua aperiódica puede saturar transitoriamente los TC apareciendo una falsa corriente diferencial.

Como que es delicado instalar las protecciones diferenciales, los fabricantes dan las informaciones necesarias sobre las características de los TC y de su instalación.

Conclusión

- El límite alto de funcionamiento de las protecciones de I máxima es el que determina el k_r (FLP real) mínimo que se ha de respetar.
- La estabilidad del relé ante los fenómenos transitorios determina el FLP o la clase X de las protecciones homopolares o diferenciales.

4.2 Caracterización de los TC según las aplicaciones

Aquí el término «aplicaciones» corresponde a los componentes de la red eléctrica que se ha de proteger: entrada y salida de líneas, transformadores, juegos de barras, alternadores, motores, banco de condensadores...

Cada componente necesita la instalación de varias protecciones. Tenemos un ejemplo en el esquema de la **figura 17**, en el que las protecciones se identifican por su código ANSI (American National Standard Institute).

Ahora bien, para optimizar la elección de un TC, hace falta conocer las protecciones que alimenta, sus ajustes, la impedancia real, la corriente de cortocircuito, etc.

La dificultad reside en el hecho de que la persona que ha de definir los TC rara vez conoce estos valores en el momento en que ha de hacer la elección final.

Por eso en este capítulo estudiaremos diversas aplicaciones en las que **los valores se pueden definir por exceso**. Estos valores su pueden manejar sin temor ya que necesariamente cubrirán las demandas. Tendrán siempre una definición menos restrictiva y más realista que la que proponen los proveedores de relés en sus catálogos.

En efecto, cada proveedor ofrece datos de elección del TC que cubren toda la gama de ajuste de sus relés asociados, suponiendo que tienen pérdidas internas importantes, y además, impedancias de cableado máximas.

Para las diversas aplicaciones, hemos recogido en una lista las funciones de protección usuales será la protección más restrictiva la que se usará de referencia para dimensionar los captadores de corriente.

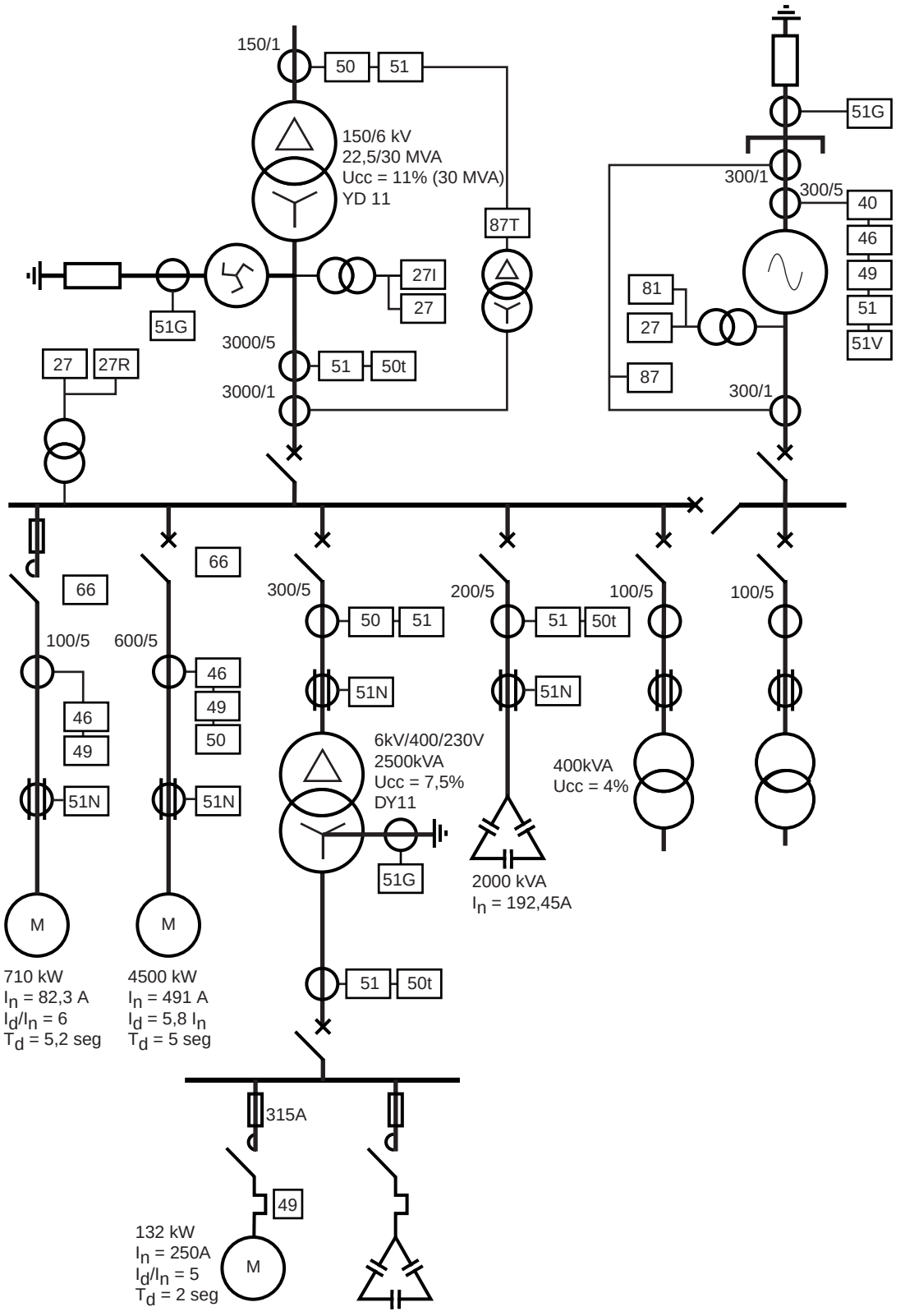


Fig. 17: *Ejemplo de un plan de protección.*

Nota: al principio no tendremos en cuenta las protecciones diferenciales ni las protecciones homopolares.

Aplicación con protecciones clásicas

El análisis de las protecciones instaladas habitualmente para las diversas aplicaciones (**figura 18**) muestra que siempre es la protección de I máx la que determina el dimensionado del TC, aunque con la excepción de los motores protegidos con fusibles en los que la protección de bloqueo del rotor es más restrictiva.

Para optimizar los TC es necesario tener en cuenta los ajustes de estas protecciones.

■ Entrada y salida de línea

Normalmente, la protección de I máx de margen alto se ajusta entre $3 \leq I_s \leq 10\ I_n$, obteniéndose un $k_m \geq 20 \frac{I_s}{I_n}$, con un máximo de $k_m = 20$.

En el caso de usar una protección a tiempo inverso, el ajuste de los productos del mercado permite un umbral máximo: $I_s = 2{,}4\ I_n$, de donde un $k_m \geq 20 \frac{I_s}{I_n}$ con un máximo de $k_m = 48$.

■ Entrada desde un generador

No hay ninguna razón para escoger un ajuste $> 7\ I_n$, teniendo en cuenta la corriente de cortocircuito relativamente baja de un alternador; por tanto, $k_m \geq 14$.

■ Entrada desde un transformador

En el caso de las protecciones aguas abajo de un transformador AT/MT, el umbral de ajuste ha de ser inferior, por ejemplo, al 70% de la I_{cc} secundaria; así, en una primera aproximación:

$$I_{cc} = 0{,}7\ I_{n2} \frac{100}{U_{cc}}.$$

Cod. ANSI	Protecciones usuales	Aplicaciones						
		Entrada y salida de línea	Entrada generador	Entrada transfor-mador	Salida transfor-mador	Salida conden-sadores	Motor (interruptor automático)	(contactor + fusible)
37	De corriente mínima						■	■
46	Desequilibrio		■				■	■
49	Imagen térmica		■		■		■	■
50	I máx. margen alto instantáneo				■		■	
50N	I máx homopolar				■			
51N	I máx homopolar	■	■	■	■	■	■	■
51N1	Desequilibrio (doble estrella)					■		
51LR	Bloqueo del rotor o arranque demasiado largo						■	■
51V	I máx para mantener la tensión		■					
51-1	I máx del margen bajo, con temporización	■	■	■		■		
51-2	I máx del margen alto, con temporización	■	■	■	■	■		
66	Número de arranques						■	■
67	I máx direccional	■	■	■				
67N	I máx direccional homopolar	■	■	■				

***Fig. 18**: Protecciones instaladas por aplicación, en los casos más corrientes.*

Si se aplica la regla: $k_m \geq 2 \frac{I_s}{I_n}$, entonces

$k_m \geq 1{,}4 \frac{100}{U_{cc}}$; este k_m es un valor máximo, es el estudio de selectividad de la red aguas abajo que, en realidad, fija el I_s, y por tanto, el k_m.

■ Salida hacia un transformador

La corriente de funcionamiento de la protección de I máx. de umbral alto (I_s), situado encima del transformador, ha de ser superior a la corriente observada en el primario (I_{cct}) cuando el secundario del transformador está en cortocircuito.

En una primera aproximación se puede decir que:

$I_{cct} \leq I_{n1} \frac{100}{U_{cc}}$, de donde:

$I_{n1} = I_{n1} \frac{P_n}{\sqrt{3}} U_{n1} = \text{intensidad nominal primaria}:$

siendo

P_n = potencia nominal del transformador de potencia,

U_{n1} = tensión primaria.

En realidad, también la impedancia de la fuente aguas arriba ayuda a limitar I_{cct}, por lo que se puede decir que:

$I_s \leq I_{n1} \frac{100}{U_{cc}}$.

Potencia del transformador en MVA	Ucc %
0,5	4
0,63	4
0,8	4
1	5
2,5	5
5	6
10	8
20	10
30	12
40	13
80	18
160	20

Fig. 19: Tensiones de cortocircuito típicas para los transformadores de potencia.

Si se aplica la regla general $k_m \geq 2 \frac{I_s}{I_n}$,

se tiene: $k_m \geq 2 \frac{I_{n1}}{I_n} \frac{100}{U_{cc}}$.

Los valores obtenidos para las tensiones de cortocircuito de los transformadores de potencia pueden ir desde el 4% para los pequeños al 20% para los más grandes (**figura 19**).

Esto llevaría a pedir un k_m mínimo, entre $10 \frac{I_{n1}}{I_n}$, para los transformadores más grandes hasta $50 \frac{I_{n1}}{I_n}$ para los más pequeños.

Estos valores pueden ser muy restrictivos para los pequeños calibres de TC sobre todo cuando la resistencia térmica es elevada (por ejemplo, 40 kA, 1 s). Así, en los casos difíciles, el problema de acoplamiento se podría resolver sobrecalibrando el primario del TC o utilizando un coeficiente reducido como indica el párrafo 4.1, lo que da:

$k_m \geq 1{,}5 \frac{I_{n1}}{I_n} \frac{100}{U_{cc}}$.

Si se ha escogido el sobrecalibrar el TC, habrá que vigilar que sea posible el ajuste de la protección térmica del transformador; si no, se ha de prever esta protección aguas abajo del transformador.

■ Salida hacia un condensador

El umbral alto con temporización aconsejado por los suministradores de condensadores es de $3 I_n$ (0,3 s). Si se toma I_s máx. = $5 I_n$; **$k_m \geq 10$**.

■ Salida hacia un motor

El umbral alto se ha de ajustar por encima de la corriente de arranque, que es siempre $\leq 7 I_n$.

Si se toma I_s máx. = $8 I_n$; **$k_m \geq 16$**.

Si la protección contra los cortocircuitos la realizan los fusibles, la protección de «arranque demasiado largo/inmovilización del rotor» es la más restrictiva. Su ajuste queda comprendido entre 2,5 y $4 I_n$; **$k_m \geq 8$**.

Nota: en todo lo anterior, hemos seguido la hipótesis I_n del TC = I_n de la aplicación; si este no es el caso, el k_m que se obtiene se ha de multiplicar por la razón $\frac{I_n \text{ (aplicación)}}{I_n \text{ (TC)}}$.

El cuadro de la **figura 20** resume los FLP mínimos que se tienen que respetar según las aplicaciones.

	k_r mínima para I máxima a tiempo constante	k_r mínima para I máxima a tiempo inverso
■ Se conoce I_S: en todas las aplicaciones:		
	$k_r = 2\frac{I_s}{I_n}$	$k_r = 20\frac{I_s}{I_n}$
■ No se conoce I_S:		
Salidas de transformador	$k_r = 2\frac{I_{n1}}{I_n}\frac{100}{U_{cc}}$	No intervienen
Entradas al transformadores Entradas y salidas de líneas	k_r = 20 (por exceso)	k_r = 48, si nunca es constante sobre un segundo margen
Salidas de condensador	k_r = 20 (por exceso)	No intervienen
Salidas motor (con int. automático)	k_r = 16	No intervienen
Salidas motor (contactor + fusible)	k_r = 8	
Entradas del generador	k_r = 14*	k_r = 14*

En esta tabla:

I_S es la corriente de ajuste del umbral de I máxima, cuyo tiempo de respuesta es el más corto para grandes corrientes,

I_n es la corriente nominal primaria del TC,

I_{n1} es la corriente nominal del transformador de potencia,

(*) = caso general.

***Fig. 20**: FLP real (k_r) necesario para máx. de I según las aplicaciones.*

4.3 Caso particular de las protecciones diferenciales

Aunque los fabricantes de relés de protección diferencial imponen las características secundarias de los TC necesarias para el buen funcionamiento de sus relés, es interesante, para comprender y evitar los errores, tener un mínimo de conocimientos de este tipo de protección.

Recordemos que una protección diferencial controla una zona que delimitada por los TC que miden sus corrientes de entrada y salida.

Si las corrientes de salida no se corresponden con las de entrada, indica normalmente que hay un defecto en la zona protegida.

A continuación examinaremos paso a paso las protecciones diferenciales de alta impedancia, las protecciones diferenciales con hilos pilotos, las protecciones diferenciales a porcentaje y las protecciones diferenciales de baja impedancia con sus exigencias en cuanto a los TC.

Según el tipo de protección y el uso que se haga de ella, los constructores de relés han tenido que utilizar principios diversos y más o menos complejos para asegurar la estabilidad de sus relés ante los fenómenos transitorios que pueden provocar la actuación intempestiva de esta protección.

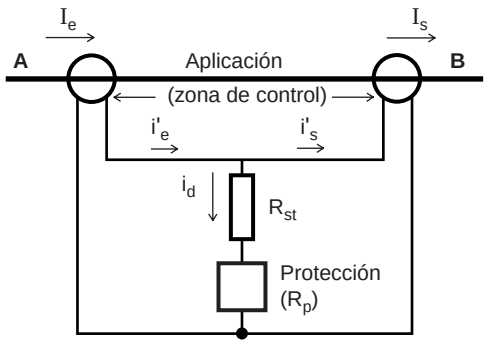


Fig. 21: Principio de funcionamiento de un diferencial de alta impedancia.

Protección diferencial en alta impedancia

Se utiliza generalmente para proteger motores, generadores, juegos de barras, y también para proteger la «tierra resistente» de los transformadores.

■ Generalidades:

Este tipo de protección se utiliza para proteger una zona con una misma tensión.

Si no hay ningún fallo, la corriente de entrada i'_e es idéntica a la corriente de salida i'_s y por tanto la corriente diferencial es $i'_d = 0$ (**figura 21**).

Una gran corriente de defecto puede atravesar la zona controlada, provocar la saturación de los TC y, por tanto, el disparo intempestivo (relé no estabilizado). La «estabilidad» del relé se obtiene al relacionarlo con una resistencia «de estabilización» R_{st}.

Esta resistencia se calcula para que la corriente derivada al circuito diferencial ($R_{st} + R_p$) no puede alcanzar el umbral de ajuste del relé cuando la corriente máxima que atraviesa la zona satura el TC debido a su componente continua. Esto se traduce en:

$$(R_{st} + R_p) \geq (R_{ct} + 2R_L)\frac{I_{scc}}{I_r} \qquad \textbf{(1)}$$

donde

I_{scc} = corriente máxima que puede atravesar la zona vista desde el secundario del TC,

I_r = corriente de ajuste secundario del relé,

R_{st} puede variar entre algunos ohms y algunas centenas de ohmios (excepcionalmente puede ser superior a 1 000 ohms).

Para que el relé funcione correctamente en I_r si se produce un defecto en la zona, es necesario que la tensión en el codo V_k sea superior a:

$2 (R_{st} + R_p + R_{ct} + 2R_L) I_r$.

En general $R_{ct} + 2R_L$ son despreciables respecto a $R_{st} + R_p$, de donde:

$$V_k \geq 2I_r\ (R_{st} + R_p) \qquad \textbf{(2)}$$

Combinando las relaciones **(1)** y **(2)** se obtiene:

$$\mathbf{V_k \geq 2\, I_{scc}\, (R_{ct} + 2\, R_L).} \qquad \textbf{(3)}$$

Estas relaciones demuestran que R_{st} (expresión 1) y V_k son mayores cuanto más elevado sea R_{ct}.

Una resistencia estabilizadora de valor elevado provoca sobretensiones importantes en el secundario de los TC; por eso, cuando se prevén sobretensiones superiores a 3 000 V, se añade una protección con una resistencia no lineal (ZnO).

De estas observaciones se deduce que los TC se optimizarán si R_{ct} y V_k son lo más bajas posible y si la corriente que atraviesa la zona (vista desde el secundario de los TC, es decir I_{scc}) se define sin exceso.

Cualquiera que sea la aplicación que utilice el diferencial de alta impedancia, todos los TC han de tener:

- ☐ la misma razón,
- ☐ la misma curva de magnetización,
- ☐ el mismo R_{ct},

y cumplir la expresión **(3);** si los TC del circuito no están a la misma distancia del relé, tomar, para V_k, el de R_L máxima.

Por otra parte, para esta protección se necesita un valor máximo de la corriente magnetizante I_0 de $V_k/2$ según la sensibilidad que se desee.

Para que el relé detecte una corriente I_r, en los bornes de cada TC en paralelo es necesario conseguir la tensión $V_s = V_k/2$; para esto, la corriente primaria I_{ef} mínima realmente detectada por el relé será
$I_{ef} = n(I_r + \rho\ I_o)$,
siendo:

n = la razón de transformación de los TC,

ρ = número de TC en paralelo (pueden ser varios, por ejemplo, en la protección de un juego de barras).

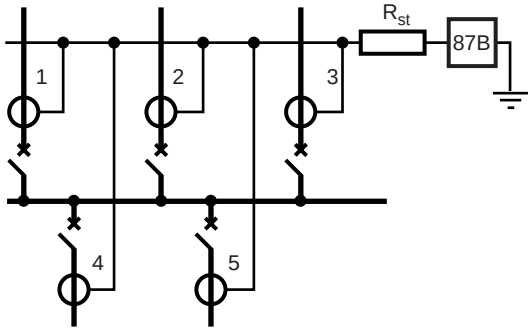


Fig. 22: Protección diferencial de un «juego de barras» en alta impedancia.

■ Aplicación: diferencial para un «motor»

La corriente máxima que circula por el sistema a la que el relé debe de permanecer insensible es, aquí, la corriente de arranque del motor:

$I_{scc} = I_{dm}$ (vista desde el secundario).

Si se desconoce la corriente I_{dm}, se sabe que:

$I_{dm} < 7I_{n\ motor}$

■ Aplicación: diferencial para un «grupo electrógeno»

En este caso, la corriente máxima que circula es la de cortocircuito que suministra el propio grupo. Si se conoce la reactancia subtransitoria del alternador X"%, se tomará:

$$I_{scc} = I_n \frac{100}{X"}$$

Si no se conoce este dato, se tomará X"% = 15

Nota: el cálculo de la tensión de pico en el secundario de los TC se obtiene con:

I_{scc} maxi = I''_{grupo} + I_{cc} red.

■ Aplicación: diferencial para un «juego de barras» (**figura 22**).

En este caso, la corriente que atraviesa la zona es igual al I_{cc} del cuadro:

$I_{scc} = I_{cc}$ del cuadro visto en el secundario de los TC.

■ Aplicación: diferencial de «tierra resistente» de los transformadores (REF)

☐ En el caso «a» de la **figura 23**, se detectan los fallos de aislamiento en los arrollamientos secundarios de los transformadores y hasta de los TC situados a este lado del transformador.

☐ En el caso «b» de la **figura 23**, se detectan los fallos de aislamiento en el primario del transformador y se mejora, con ventaja, la protección clásica de defecto a tierra que es sensible a las bruscas corrientes de arranque del transformador y a las corrientes de cortocircuito asimétrico aguas abajo.

Aquí también se calculará R_{st} y V_k partiendo de la corriente máxima que atraviesa los TC debido a un defecto de fuera de la zona protegida. En una primera aproximación, esta corriente es inferior a la corriente limitada por la impedancia del transformador,

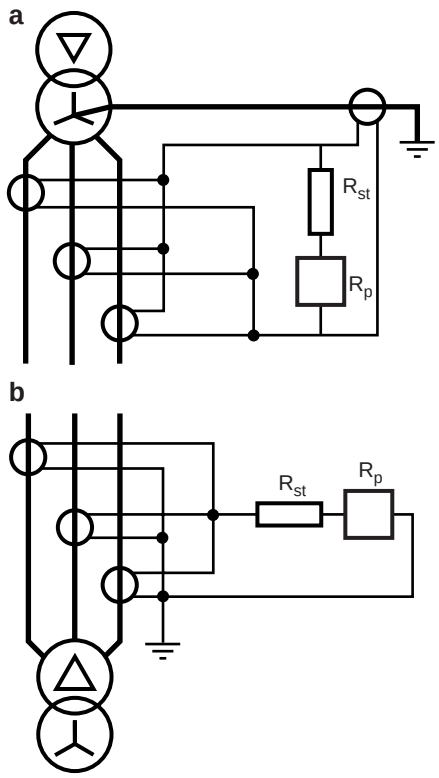


Fig. 23: Protección de «tierra resistente» de los arrollamientos secundarios o primarios de un transformador.

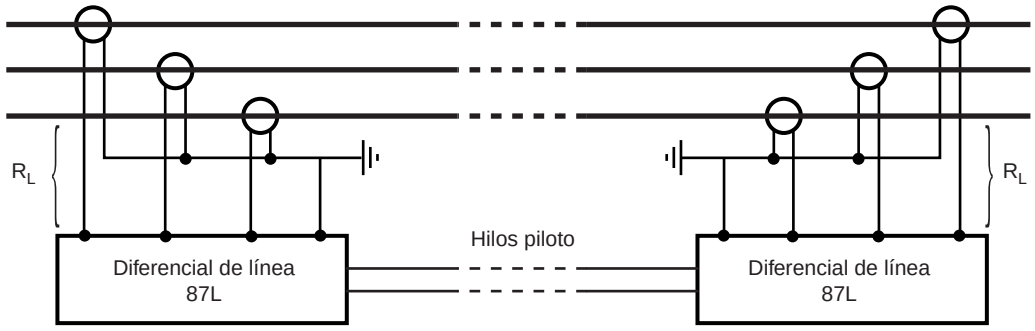


Fig. 24: Diferencial de línea o de cables con hilos pilotos.

sea $I_{pasante} = \frac{P_{cct}}{U_n \sqrt{3}}$,

con $P_{cct} = P_n \frac{100}{U_{cc}}$, (potencia de cortocircuito del transformador); si se conoce la potencia de cortocircuito aguas arriba (P_a), es suficiente sustituir P_{cct} por $\frac{(P_{cct}\ P_a)}{(P_{cct} + P_a)}$.

La corriente se convierte a continuación en I_{scc}, visto desde el secundario de los TC.

Protección diferencial de las líneas o cables, con hilos piloto (figura 24).

En cada extremo del cable o de la línea se instala un relé de este tipo.

Sobre los hilos piloto, cada uno de los relés produce una tensión que es la imagen de la suma:

$aI_1 + bI_2 + cI_3 + dI_h$.

Si las dos tensiones son diferentes, los dos relés se ponen en funcionamiento.

Nota:

Los coeficientes a, b, c y d son diferentes para que cualquier tipo de defecto dé una suma no nula; por tanto, el umbral de funcionamiento para un defecto bifásico o fase-tierra depende de la fase que falle.

Aquí todavía los TC se definen en clase X, y cada constructor da una fórmula empírica para la tensión V_k mínima.

Ejemplos de formulación:

V_k mín = 0,5 N k_t I_n (R_{ct} + X R_L)

donde N, k_t, X son constantes relacionadas con el tiempo de respuesta de los relés, su sensibilidad y su forma de cableado.

Otro ejemplo posible:

$$V_k \text{ mín} = \frac{50}{I_n} + I_f \left(R_{ct} + 2R_L\right)$$

donde:

I_n es la corriente nominal secundaria del TC (1 ó 5 A).

I_f es la corriente de cortocircuito que atraviesa la zona, vista desde el lado del secundario del TC.

La estabilidad de este relé se consigue en parte respecto a la tensión de codo requerido y en parte por el umbral de funcionamiento porcentual que aumentará con la corriente que atraviesa la zona gracias a los arrollamientos de retención. En los dos extremos de la línea, los TC han de tener la misma razón de transformación y respetar las V_k mínima e I_0 máxima indicadas por el fabricante. No es necesario que sus curvas de magnetización y R_{ct} sean siempre idénticas.

Protección diferencial porcentual para transformadores

El término «porcentual» se refiere a que el umbral de funcionamiento aumenta con la corriente que atraviesa la zona.

La comparación pura y simple de corrientes de cada fase aguas arriba con las corrientes de las mismas fases aguas abajo no es conveniente para las protecciones diferenciales de los transformadores.

En efecto:

- las corrientes aguas arriba y abajo de un transformador de potencia no tienen la misma amplitud y no están en fase,
- la corriente magnetizante del transformador conectado a la red se ve solamente aguas arriba,
- la presencia de un generador homopolar en la zona protegida (por ejemplo, conexión a tierra del neutro del transformador) puede provocar el funcionamiento de la protección, cuando el defecto queda, por ejemplo, en una salida aguas abajo.

■ Precauciones que se han de tomar para superar las dificultades:

Se trata de conseguir que, en funcionamiento normal, el relé vea las corrientes de entrada y salida del transformador en fase y de la misma amplitud; esto se logra gracias a una elección adecuada de la razón de transformación de los TC y de la forma de cableado. Los TC, llamados «colgados» o «flotantes» se utilizan para este fin y a menudo contribuyen a insensibilizar la protección contra los fallos a tierra exteriores a la zona protegida.

Sin embargo, la mayoría de los nuevos relés digitales son capaces de realizar internamente, por parametraje, las correcciones necesarias para «hacer flotar» las corrientes; su instalación es, evidentemente, más sencilla.

Además, todos los relés «diferenciales para transformadores» poseen una insensibilización al 2º armónico que bloquea su funcionamiento al conectar el transformador.

■ Tensión V_k de los TC

En el 99% de los casos, la demanda se hace en clase X.

Hay que tender a la tensión de codo mínima y ésta depende de la resistencia del arrollamiento secundario «R_{ct}» del TC y de la carga real R_r de éste último. Otros planteamientos más complejos hacen intervenir la razón X/R de la instalación o la corriente magnetizante del transformador de

potencia. Sin embargo, ante las dificultades que encuentran los usuarios para obtener todos estos parámetros, los suministradores de relés dan a veces fórmulas empíricas simplificadas que llevan a un ligero sobredimensionamiento.

Ejemplos de tensión mínima de codo usada por el Sepam 2000 D02 (Schneider):

V_k mini = A I_b (R_{ct} + 2R_L)

donde:

2R_L = resistencia total del cableado secundario,

R_{ct} = resistencia del arrollamiento secundario del transformador de corriente,

I_b = corriente nominal del transformador de potencia vista por el lado secundario del TC,

A = constante que depende de la potencia del transformador:

Algunos proveedores hacen intervenir la corriente que atraviesa la zona. Ejemplo:

$V_k \geq \frac{4I_f}{\sqrt{3}}(R_{ct} + 3(R_L + R_P))$, lado estrella del transformador de potencia y

$V_k \geq 4I_f(R_{ct} + 2R_L + R_P)$, lado triángulo del transformador de potencia.

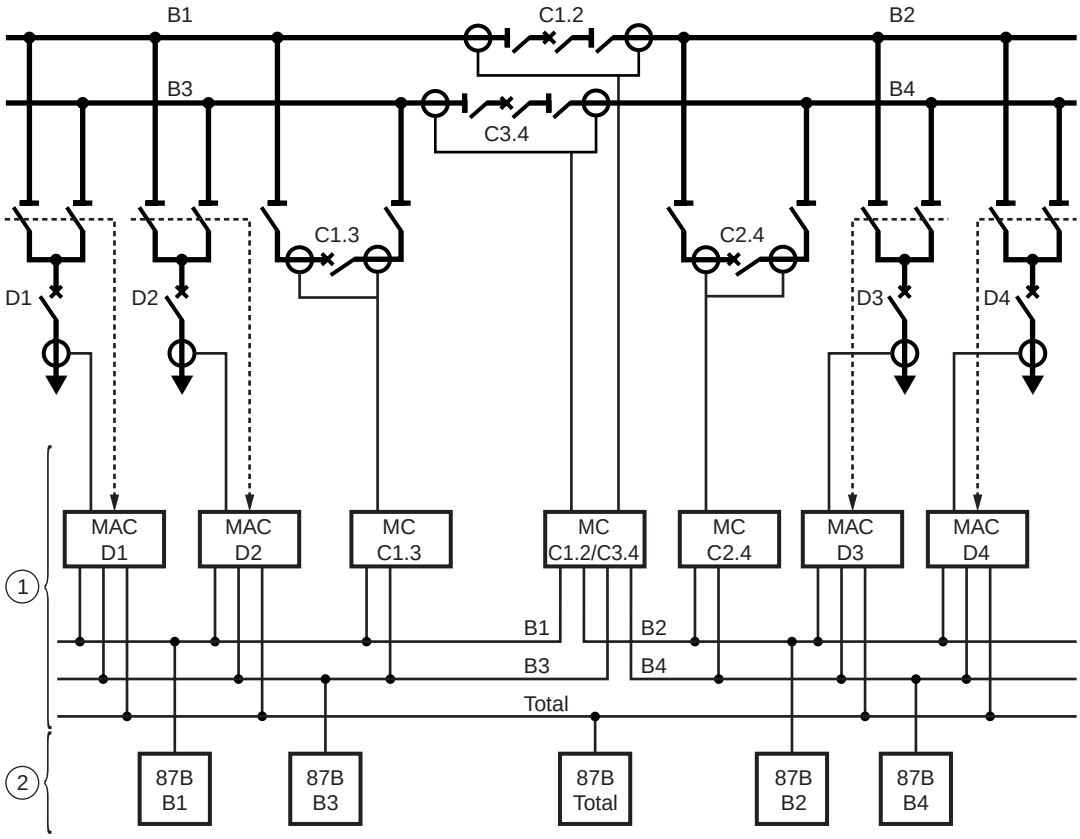
La corriente que atraviesa la zona se definirá de la misma manera que la protección de «tierra resistente».

Nota:

La presencia de TC flotantes lleva a expresiones diferentes de la tensión de codo de los TC principales, que han de tener en cuenta la carga adicional que representan.

En conclusión, la estabilidad de esta protección queda asegurada:

- porque el umbral aumenta al aumentar la corriente que atraviesa la zona (sistema de retención),



MAC = medida y maniobra de intensidades (para las salidas D1, D2, D3 y D4)
MC = medida de intensidades (para acoplamientos entre lado a lado y entre barras: C1.2, C1.3, C2.4 y C3.4)
1 = maniobra y medida
2 = protección

***Fig. 25**: Ejemplo de protección diferencial de baja impedancia para un doble juego de barras.*

- por una elección adecuada de la tensión de codo V_k de los TC,
- mediante un sistema de insensibilización al 2º armónico, debido a las corrientes de conexión,
- mediante relés más sofisticados que además están insensibilizados al 5º armónico que se presenta al producirse la sobreexcitación del transformador de potencia (saturación).

Protección diferencial de baja impedancia

Se utiliza para las protecciones diferenciales de juegos de barras.

Esta protección es muy cara y molesta, ya que hace intervenir un gran número de módulos y de TC «flotantes» que necesitarán uno o varios armarios según la importancia del cuadro (**figura 25**).

La protección, en el caso de un cuadro con doble juego de barras, debe de ser reasignada continuamente en función de la posición de los seccionadores de cambio, para dirigir las corrientes de cada salida y de cada entrada al relé asociado a la supervisión del juego de barras sobre el que está conectada esa salida o esa entrada.

Los TC asociados a esta protección sofisticada pueden tener razones de transformación diferentes. La mayoría de las veces, sus secundarios también se definen por la clase X, pero como que se puede admitir una cierta saturación, las exigencias en términos de tensión de codo son menos severas que para la protección diferencial de alta impedancia.

4.4 Protecciones de distancia

Estas protecciones, muy corrientes en alta tensión, se usan cada vez más en líneas de MT y de gran longitud, ya que no necesitan instalación de hilos piloto (**figura 26**).

La fórmula generalmente avanzada, para los TC definidos en clase X, es la siguiente:

$$V_k \geq I_f \left(1 + \frac{X}{R}\right)\left(R_p + R_{ct} + 2R_L\right)$$

A parte de los elementos habituales que ya hemos definido, también se pueden encontrar los parámetros siguientes:

X/R: razón reactancia/resistencia entre la fuente y un cortocircuito trifásico que aparece al final de la zona vigilada.

I_f es aquí igual a la corriente de cortocircuito trifásico en el extremo de la zona vigilada pero

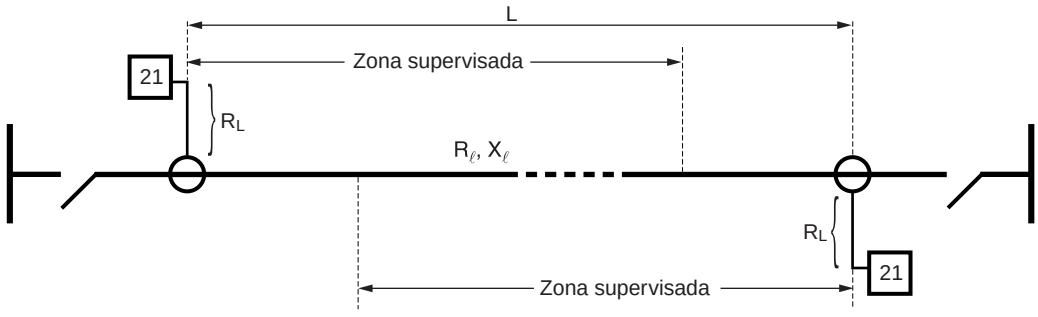


Fig. 26: Protecciones de distancia; en cada extremo de la línea un relé vigila el 80% de la línea con un funcionamiento instantáneo.

aplicada al secundario del TC situado aguas arriba de esta zona.

R_p: resistencia del relé.

En muchos casos, las indicaciones relacionadas con la línea que se ha de proteger (sección, longitud) son absolutamente inexistentes e imposibles de obtener antes de adquirir el cuadro. Se puede ver en el ejemplo de cálculo de la **figura 27** la diferencia considerable que hay entre las características de los TC en función de la longitud de la línea.

Entre 1 y 12 km, la razón entre las características es de 10.

Puesto que este tipo de relés se utiliza siempre para líneas muy largas, no tendría sentido que, a falta de otro dato, se utilizara para I_f el valor I_{cc} en la cabeza de la línea. En el ejemplo de la **figura 27** se ve que una corriente de cortocircuito de 26,2 kA pasa a ser de 13,37 kA a los 2 km y de sólo 3,8 kA a 12 km.

El conocimiento, aunque sólo sea aproximado, de la longitud de la línea es un dato muy importante para la optimización de los TC.

Fuente			**Línea**			**Cálculos**				
I_{cc} (kA)	R_s (Ω)	X_s (Ω)	L (km)	R_ℓ (Ω)	X_ℓ (Ω)	X_t/R_t	Z_t (Ω)	I_{cc} (kA)	I_f (A)	V_k (V)
26,2	0,015	0,727	1	0,12	0,338	7,925	1,073	17,75	29,59	(264,1 R_{ct}) + 108,28
26,2	0,015	0,727	2	0,2396	0,675	5,518	1,425	13,37	22,28	(145,23 R_{ct}) + 59,54
26,2	0,015	0,727	5	0,599	1,688	3,936	2,492	7,646	12,74	(62,90 R_{ct}) + 25,79
26,2	0,015	0,727	12	1,4376	4,051	3,29	4,994	3,815	6,358	(27,28 R_{ct}) + 11,18
26,2	0,015	0,727	24	2,8752	8,102	3,055	9,29	2,051	3,418	(13,86 R_{ct}) + 5,68
26,2	0,015	0,727	40	4,792	13,5	2,961	15,02	1,268	2,114	(8,37 R_{ct}) + 3,43

U = 33 kV

TI lado primario: 600

TI lado secundario: 1

R_p = 0,36 Ω

$2R_L$ = 0,05 Ω

Sección de la línea = 150 mm^2

R_ℓ = 0,12 Ω/km

X_ℓ = 0,388 Ω/km

R_s, X_s = resistencia e impedancia de la fuente

$X_t = X_s + X_\ell$

$R_t = R_s + R_\ell$

$$V_k \geq I_f \left(1 + \frac{X_t}{R_t}\right)\left(R_p + R_{ct} + 2R_L\right)$$

Fig. 27: *Cálculos de la tensión V_k de los TC para relés de distancia, para diferentes longitudes de líneas, mostrando todo el interés en tomar como referencia I_{cc} al extremo de la línea para definir estos TC.*

5 Ejemplos de especificación de TC

Vamos a tratar de manera incompleta, pero pedagógica, dos ejemplos de especificaciones relacionadas con las protecciones clásicas y dos ejemplos relacionados con protecciones diferenciales.

5.1 Protecciones de la conexión de un motor

Las protecciones para este tipo de aplicación son, por ejemplo:

- de I máxima,
- imagen térmica,
- desequilibrio.

Con los relés electromagnéticos, montados en serie en el secundario de los TC, la especificación mínima con que normalmente se trabaja es 20 VA-5P30.

Con los «relés» digitales multifunción, la especificación suele ser 5 VA-5P20... que está sobredimensionada.

El FPL mínimo es $2\,\frac{8\ I_n\ (\text{motor})}{I_n\ (\text{TC})}$, o sea $k_r \geq 16$.

Tomando una I_n motor (200 A) para un TC 300/1A, resulta: 16 x (300/200) = 12.

La potencia absorbida por el relé es, por ejemplo, de 0,025 VA (Sepam 2000), y 0,05 VA para el cableado (6 m de 2,5 mm^2); el TC 5 VA-5P20 tiene pérdidas internas de 2 VA.

Calculemos el k_r:

$$k_r = 20\,\frac{2+5}{2+0{,}075} = 67{,}5$$ ¡valor muy superior a 12!

Un TC 2,5 VA-5P10 (con P_i = 1,5 VA) es más que suficiente: su k_r es:

$$k_r = 10\,\frac{1{,}5+2{,}5}{1{,}5+0{,}075} = 25.$$

5.2 Protecciones de salida de un transformador

La protección que determina el TC es la protección de I máxima de margen alto (apartado 4.2)

$$kr \geq 1{,}5\,\frac{I_{n1}}{I_n}\,\frac{100}{U_{cc}},$$

siendo

$I_{n1} = I_{nominal}$ del primario del transformador

$I_n = I_{nominal}$ del primario del TC.

Tomemos como ejemplo un transformador 1MVA; U_{cc} = 5%; $U_{primario}$ = 22 kV, y por tanto, I_{n1} = 26,2 A.

Lo que da, con I_n = 30 A, un k_r mínimo de 26.

Sabiendo que la resistencia térmica del TC requerida es 50 kA -1s… el TC es irrealizable, empezando por $I_{th} / I_n > 500$, o aquí 50000/30 = 1 666!!!

Ante este tipo de problemas, es posible sobrecalibrar el primario del TC.

Teniendo en cuenta sus características, la **figura 28** muestra el sobredimensionamiento del TC que mejor satisface el FLP necesario y la posibilidad de construcción del mismo.

En el ejemplo se pasa de 30 a 50 A. El k_r mínimo de 26 a 15,7 y el TC es factible.

El grupo Schneider, que fabrica TC de protección y celdas MT, dispone de un TC estándar 2,5 VA-5P20 adecuado para las protecciones electrónicas y digitales y que consume menos de 0,5 VA con una resistencia de cableado $2R_L < 0{,}1\ \Omega$.

Transformador U = 22 kV				Características TC	
Potencia (MVA)	U_{cc} (%)	I_{cc}máx (kA)	TFO (A)	I_n (A)	FLP necesario (I_{cc}/I_n x 1,5)
0,5	4	0,3	13	40	12,3
0,63	4	0,4	17	40	15,5
0,8	4	0,5	21	40	19,7
1	5	0,5	26	50	15,7
2,5	5	1,3	66	100	19,7
5	6	2,2	131	200	16,4
10	8	3,3	262	300	16,4
20	10	5,2	525	600	13,1
30	12	6,6	787	1 000	9,8
40	13	8,1	1 050	1 500	8,1
80	16	13,1	2 099	2 500	7,9

***Fig. 28**: TC estándar para una salida de transformador 22 kV.*

5.3 Protección diferencial de un transformador

En este ejemplo el relé usado es un Sepam 2 000 D02 (Schneider). Este relé no necesita un TC intercalado (**figura 29**).

La tensión de codo mínima necesaria V_k viene dada por la fórmula: $V_k = A\ I_b\ (R_{ct} + 2R_L)$

donde:

I_b = corriente nominal del transformador de potencia en el secundario del TC,

R_{ct} = resistencia del arrollamiento secundario del TC,

R_L = resistencia de un conductor de conexión entre le TC y el relé.

A = constante que depende de la potencia del transformador:

- 30 para 2 MVA < P_n < 14 MVA,
- 24 para 15 MVA < P_n < 39 MVA,
- 16 para 40 MVA < P_n < 70 MVA.

Tomemos un ejemplo:

P_n = 50 MVA,

de donde: A = 16,

I_1 = 600 A U_1 = 63 kV I_{n1} = 1 A,

I_2 = 3 000 A U_2 = 11 kV I_{n2} = 1 A,

$$I_{b1} = \left[\frac{P_n}{V_3\, U_2}\right]\left(\frac{I_{n1}}{I_1}\right) = 0{,}764\ \text{A}$$

$$I_{b2} = \left[\frac{P_n}{V_3\, U_2}\right]\left(\frac{I_{n2}}{I2}\right) = 0{,}875\ \text{A}$$

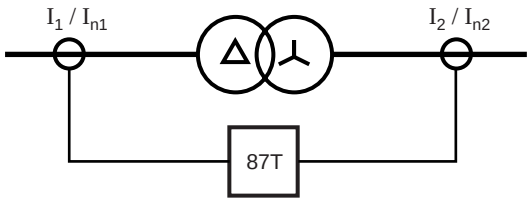


***Fig. 29**: Principio de la protección diferencial de un transformador.*

donde:

I_1 = corriente nominal del TC situado en el primario del transformador de potencia,

I_2 = corriente nominal del TC situado en el secundario del transformador de potencia,

I_{n1} = corriente nominal secundaria del TC situado en el primario del transformador de potencia,

I_{n2} = corriente nominal secundaria del TC situado en el secundario del transformador de potencia.

Cálculo de los TC

Se supone que el relé está situado en el cuadro aguas abajo, por lo que $2R_L$ se toma 1 000 m para la conexión hacia arriba y 10 m para la conexión hacia abajo.

■ TC situados en el primario del transformador de potencia

Si el cableado es de 2,5 mm^2 (de 8 Ω/km):

$2 R_L = 8 \times 1000/1000 = 8\ \Omega$.

Lo que da:

$V_k > 16 \times 0{,}764\ (R_{ct} + 8)$,

$V_k > 12{,}2\ R_{ct} + 98$.

■ TC situado en el secundario del transformador de potencia

Si el cableado es de 2,5 mm^2 (sea 8 Ω/km):

$2 R_L = 8 \times 10/1000 = 0{,}08\ \Omega$.

Lo que da:

$V_k > 16 \times 0{,}875\ (R_{ct} + 0{,}08)$,

$V_k > 14\ R_{ct} + 1{,}12$.

5.4 Protección diferencial de un juego de barras 87B

Para la protección diferencial del juego de barras 87B (**figura 30**) el relé usado es un Sepam 100 LD (Schneider). Para este relé, la tensión de codo mínima necesaria V_k viene dada por:

$V_k \geq 2I_f\ (R_{ct} + 2R_L)$

donde:

I_f = corriente máxima de defecto en el secundario del TC,

R_{ct} = resistencia del arrollamiento secundario del TC,

$2R_L$ = resistencia del bucle de cableado entre el TC y el relé.

Cálculo de $2R_L$

$2 R_L = \rho\ (2L/S)$

Longitud del bucle: 2L = 45 m,

Sección del cableado: S = 2,5 mm^2,

$\rho = 1{,}8 \cdot 10^{-8}\ \Omega m$,

de donde:

$2 R_L = 0{,}324\ \Omega$.

Cálculo de I_f

$$If = I_{sc} \cdot \frac{I_{2n}}{I_{1n}}$$

I_{1n} = corriente nominal primaria del TC,

I_{2n} = corriente nominal secundaria del TC,

I_{sc} = corriente de cortocircuito a nivel del cuadro,

I_{1n} = 1 250 A,

I_{2n} = 1 A,

I_{sc} = 25 kA,

I_f = 20 A.

Ahora se puede determinar V_k:

$V_k > 2 \cdot 20 \cdot (R_f + 0{,}32)$,

o

$V_k > 40\ R_{ct} + 13$.

Después de consultarlo, el TC propuesto tiene un R_{ct} de 6 Ω y un V_{kr} igual a 270 V.

Es válido, ya que:

40 x 6 + 13 = 252,96 V < 270 V.

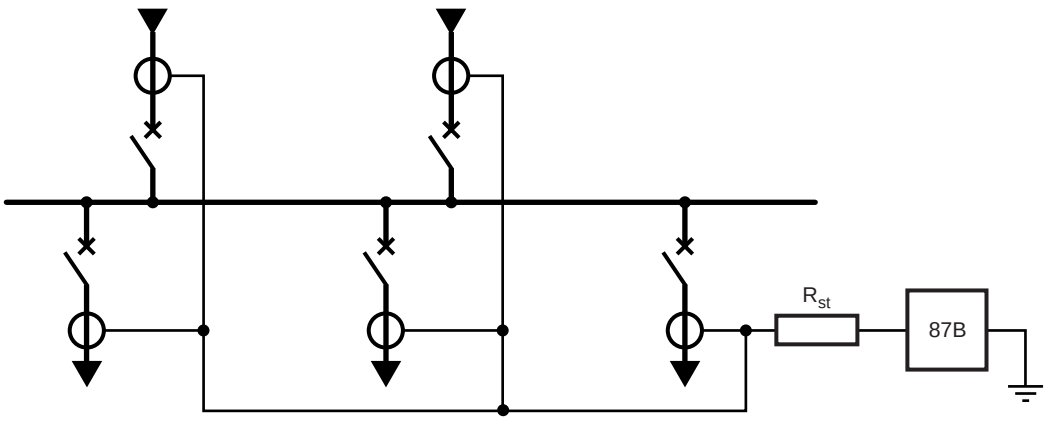


Fig. 30: Esquema de principio de una protección diferencial de juego de barras.

Cálculo de R_{st}

$$R_{st} = \frac{V_k}{2 I_r} - R_p$$

I_r = corriente de ajuste,

R_p = resistencia del relé,

V_k = tensión de codo mínima necesaria.

Se escoge:

I_r = 5% I_{2n} = 0,05 A.

Aquí se puede considerar que R_p = 0

R_{st} = 2 530 Ω

Cálculo de V_{pico}

$$V_p = 2\sqrt{2 V_{kr} (V_s - V_{kr})}$$

$V_s = (R_s + R_p) I_{scc}$

donde:

I_{scc} = corriente máxima de defecto, vista desde el secundario del TC: aquí $I_{scc} = I_r$

V_{kr} = valor real de la tensión de codo del TC (270 V),

V_s = 50 600 V,

V_p = 10 426 V.

V_p > 3 000 V, es necesario un limitador de sobretensión.

Cálculo de la corriente de defecto I_d realmente detectada

$I_d = I_d + I_d$ m

donde:

I_o = corriente magnetizante con $V_k/2$ (dato del fabricante del TC),

m = número de TC por fase usados para proteger el juego de barras, aquí = 5,

I_o = 0,006 A,

I_d = 0,08 A, es decir, lado primario = 100 A.

Así, se puede constatar que los defectos a tierra se detectarán de una forma satisfactoria ya que en esta instalación la corriente de fallo a la tierra está limitada a 300 A.

En este capítulo sólo se han visto algunos ejemplos de definición de especificaciones de TC (FLP o V_k) según las aplicaciones. Su especificación y optimización necesita la participación activa y coordenada de los varios elementos que intervienen. Las principales informaciones necesarias según las protecciones las podemos ver en la tabla de la **figura 31**.

Informaciones a facilitar	**Protecc. clásicas**	**Protecciones diferenciales**						**Unidad implicada**
		Diferenciales de alta impedancia (nota)				difer. de %	difer. con hilo piloto	
	I máx 51 + 51N	JdB 87B	Motor 87M	Gener 87G	Tierra 87N	Trafo 87T	Línea 87L	
I_{cc} real del cuadro		■	■	■	■	■	■	diseñador de la red
Corriente máx. que circula por la zona		■	■	■	■	■	■	
Corriente homopolar máxima I_{ht}, si hay detección de defectos a tierra	■	■	■	■	■	■	■	
Potencia del transform. U_{cc} del trafo					■ ■	■ ■		
Índice horario del transfo. de potencia						■		
Razón de transform.	■	■	■	■	■	■	■	diseñador del plan de protección
Fabricante y tipo relé	■	■	■	■	■	■	■	
Corriente de ajuste de relé Ir	■	■	■	■	■			
Corriente arranque motor			■					fabricante del motor
Reactancia de corto-circuito subtransitoria del grupo				■				fabricante del grupo
Distancia entre los TC y el relé	■	■	■	■	■	■	■	diseñador del cuadro
Sección cableado usada (o valor RL)	■	■	■	■	■	■	■	

Nota: Después de consultar a los suministradores de TC clase X, es absolutamente necesario pedir todos los valores de V_k mín, R_{ct} máx e I_0 máx: son indispensables para completar el estudio. Además V_k mín y el valor real de V_k son necesarios para el cálculo de la tensión de cresta.

Fig. 31: *Informaciones necesarias para definir un TC, que debe de facilitar cada unidad responsable implicada.*

6 Conclusión

Los transformadores de corriente son eslabones indispensables entre las canalizaciones eléctricas y las protecciones de los elementos de la red de media y alta tensión.

No es sencillo ni determinar sus especificaciones ni optimizar su uso. Hace falta conocer muy bien su funcionamiento y cómo se han de coordinar todos los elementos con los que se puede conectar

En general, la elección de los TC asociados a protecciones clásicas no tiene excesivos problemas; en cambio, asociados a protecciones diferenciales (clase X), requieren un estudio detallado y una buena comunicación con el fabricante del TC.

Sin embargo, es posible definir los TC, por exceso, según el tipo de protección y el uso a que se destine, tal como se ha demostrado en este Cuaderno Técnico. Esta solución puede evitar disgustos en cuanto a la seguridad, los costes y los plazos de entrega.

También hay que tener en cuenta la tecnología de su construcción y uso, ya que, según del tipo que sea, tendrá unas ventajas u otras, por ejemplo:

- los TC estándar funcionan correctamente y están siempre disponibles,
- los TC con varios secundarios permiten ahorrar espacio y costes,
- los TC multifuncionales, usados en las celdas estándar, permiten una importante reducción de costes.

Si, a pesar de todo, surgen problemas, siempre existe una solución; esto es precisamente lo que estudia el Cuaderno Técnico nº 195 que explica las trampas (errores, normalmente) y las soluciones posibles.

Finalmente, este Cuaderno Técnico demuestra que es indispensable que los diseñadores de una instalación presten atención a la definición de las especificaciones de uso de los TC, especialmente durante la elaboración del plan de protecciones y del estudio de selectividad.

Bibliografía

Normas

- CEI 60185: Transformadores de corriente. Características.
- CEI 60044-1: Transformadores de medida. Parte 1: transformadores de corriente (sustituye a la CEI 185)
- CEI 60044-8: Transformadores de medida. Parte 8: transformadores de corriente electrónicos.
- NF-C 42-502: Transformateurs de courant - Caractéristiques.
- BS 3938: Transformateurs de courant - Spécifications.

Cuadernos Técnicos Schneider

- Protección de máquinas y redes industriales en AT. P. ROCCIA. Cuaderno Técnico n° 113.
- Transformadores de intensidad para la protección en AT. M. ORLHAC. Cuaderno Técnico n° 164.
- Protección de redes AT-A industriales y terciarias. A. SASTRE. Cuaderno Técnico n° 174.
- Las protecciones direccionales. P. BERTRAND. Cuaderno Técnico n° 181.
- Estabilidad dinámica de las redes eléctricas industriales. B. DE METZ NOBLAT y G. JEANJEAN. Cuaderno Técnico n° 185.
- Transformadores de corriente: errores de especificación y soluciones. P. FONTI. Cuaderno Técnico n° 195.

Otras obras de interés

- Guide de l'ingénierie électrique. ELECTRA - 07.86.
- Protection des réseaux électriques. Ch. PREVE - Ed. Hermes - 06.98