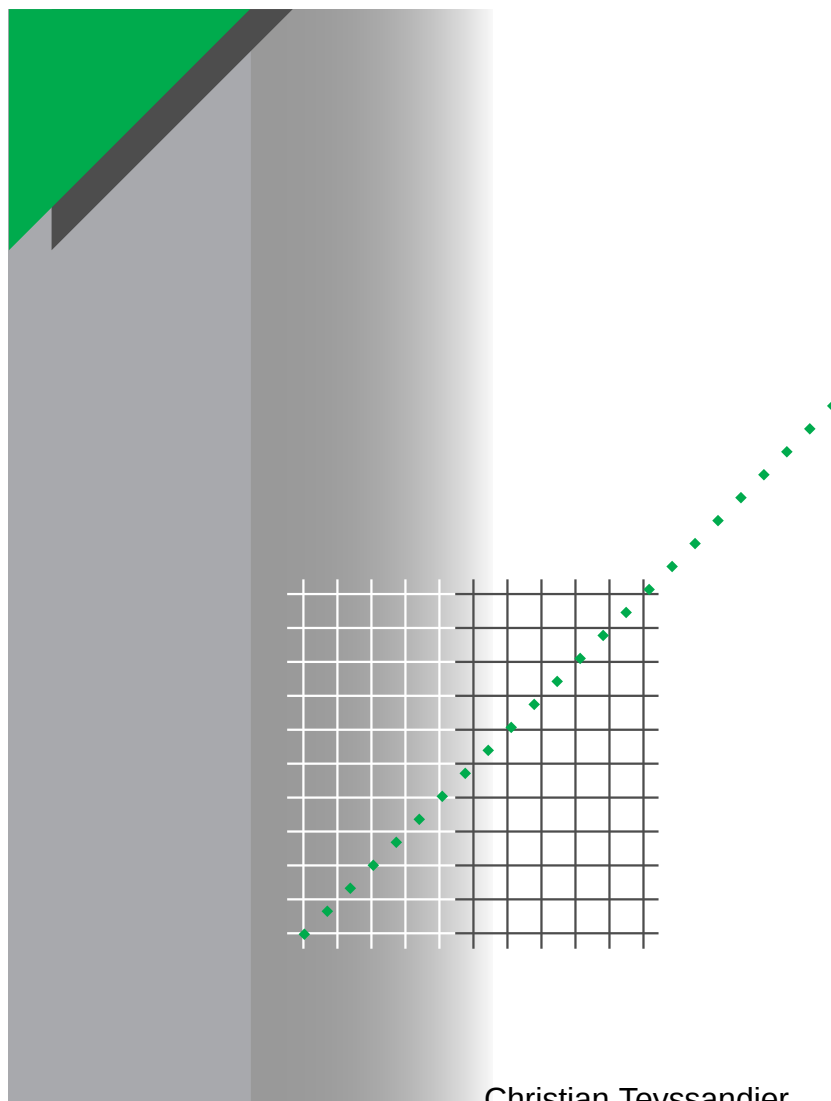


Cuaderno Técnico nº 170

De los transformadores de corriente a los captadores híbridos en AT



Christian Teyssandier

Merlin Gerin

Eunea Merlin Gerin

Modicon

Telemecanique

Mesa

Himel

Square D

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» 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 170 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 170

De los transformadores de corriente a los captadores híbridos en AT



Christian Teyssandier

Entró en Merlin Gerin en 1962, diplomándose ingeniero en 1967 por el INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble).

Hasta 1974 trabajó en la resolución de problemas de magnetismo relacionados con el motor lineal. A continuación ocupó diversos puestos de responsabilidad técnica en el campo de los condensadores de potencia AT, MT y BT.

Después, en 1993, pasó a ser jefe de proyecto de transformadores de medida en MT. En 1992 vuelve a la actividad de anticipación de la División MT de Merlin Gerin.

Trad.: José M^a Giró

Original francés: diciembre 1993

Versión española: junio 2001



Terminología

Captador híbrido:

Captador de corriente o de tensión que tiene por lo menos un elemento sensible a la magnitud a medir, acoplado a un sistema electrónico que entrega una señal secundaria (corriente o tensión) que es imagen en módulo y en fase de la magnitud primaria.

CEM:

La compatibilidad electromagnética es la capacidad de un dispositivo para funcionar correctamente en el seno de un entorno electromagnético sin producir perturbación intolerable por el hecho de estar dentro de este entorno (Cuaderno Técnico nº 149).

Birrefringencia:

Se denominan anisótropos o birrefringentes los materiales cuyo índice de refracción depende a la vez de la dirección de propagación, del estado de polarización y también de la frecuencia de la onda luminosa.

Nota:

Los valores de las tensiones alternas, y también las de más de 1 000 V, son objeto de múltiples decretos, normas y especificaciones particulares, como las de las compañías suministradoras:

■ el decreto francés de 14 de noviembre de 1988, define los siguientes valores de tensión:

AT-A = $1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$,

AT-B = $U > 50 \text{ kV}$.

■ el CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica) en su circular de 27 de julio de 1992, precisa:

MT = $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$,

AT = $U > 35 \text{ kV}$.

■ la publicación CEI 71 precisa varias escalas de tensiones más elevadas para el material:

gama A = $1 \text{ kV} < U < 52 \text{ kV}$,

gama B = $52 \text{ kV} \leq U < 300 \text{ kV}$,

gama C = $U \geq 300 \text{ kV}$.

Una revisión pendiente, deja sólo dos escalas:

gama: I = $1 \text{ kV} < U \leq 245 \text{ kV}$,

gama: II = $U > 245 \text{ kV}$.

■ la empresa suministradora nacional de Francia, EDF, utiliza actualmente la clasificación del decreto antes citado.

De los transformadores de corriente a los captadores híbridos en AT

La evolución técnica y tecnológica de los diversos equipos de protección y de control-mando que se instalan en las redes de distribución de energía eléctrica exige a su vez una evolución paralela de sus fuentes de información, que son los captadores de corriente o de tensión.

Este Cuaderno Técnico estudia principalmente los captadores de corriente para aplicaciones MT.

Después de repasar las necesidades de información sobre transformadores de corriente, se explican los nuevos captadores híbridos y en particular los diseñados partiendo de la bobina Rogowski. Se analizan también las ventajas e inconvenientes de todas las soluciones, según su aplicación.

1 Introducción		p. 6
2 Generalidades	2.1 Funciones de los captadores	p. 7
	2.2 Evolución de los captadores	p. 8
	2.3 Las magnitudes a medir	p. 9
	2.4 Los diversos tipos de captadores de corriente	p. 10
	2.5 La normalización	p. 12
3 Transformador de corriente	3.1 Utilización	p. 13
	3.2 Normalización	p. 13
	3.3 Especificación de un TC	p. 14
	3.4 Aplicaciones especiales	p. 18
	3.5 Comportamiento frente a la CEM	p. 20
	3.6 Un riesgo especial	p. 20
4 Captador de corriente con bobina Rogowski	4.1 Funcionamiento	p. 21
	4.2 Normalización	p. 23
	4.3 Funcionamiento en régimen permanente y transitorio	p. 23
	4.4 Especificación de los captadores de intensidad con bobina Rogowski	p. 25
	4.5 Comportamiento frente a la CEM	p. 25
5 Captadores híbridos	5.1 Captadores ópticos de efecto Faraday	p. 27
	5.2 Captadores de efecto Hall	p. 30
	5.3 Captador de corriente de flujo nulo	p. 32
6 Tabla comparativa. Síntesis		p. 33
7 Conclusión y futuro	7.1 Soluciones actuales	p. 34
	7.2 Soluciones futuras	p. 34
Anexo 1: Precisión de los TC según la CEI 185		p. 35
Anexo 2: Clasificación de los TC según la CEI 44-6		p. 36
Bibliografía		p. 36

1 Introducción

La correcta explotación y la seguridad de las redes de distribución eléctrica, desde la central eléctrica de producción de energía hasta el punto de utilización, se lleva a cabo mediante equipos de protección y de control-mando que necesitan conocer permanentemente las dos magnitudes eléctricas fundamentales, que son la tensión U y la intensidad de corriente I .

El conocimiento de estas dos magnitudes abarca varios aspectos:

- naturaleza de la corriente (cc o ca),
- valor de tensión (baja tensión: BT, alta tensión: AT-A y AT-B),
- evolución de los transitorios de estas magnitudes como consecuencia de los cambios

de estado que se producen natural o accidentalmente en la explotación de la red eléctrica.

Hay varios principios físicos que pueden utilizarse para medir las corrientes alternas. Estos métodos permiten alcanzar por sí mismos niveles de prestaciones más o menos compatibles con las requeridas en los distintos niveles de protección, explotación y seguridad buscadas.

Para poder decir cuál es el mejor captador que se puede instalar en una red, hay que poder valorar sus prestaciones y, para hacer esta evaluación, hay que conocer el funcionamiento de los diversos tipos de captadores.

2 Generalidades

2.1 Funciones de los captadores

Los captadores tienen tres funciones esenciales:

- generar una imagen exacta y lo más fiel posible de la magnitud eléctrica a medir,
- asegurar la separación entre las redes de potencia y las de medida, de protección y de control-mando,
- asegurar o bien la posibilidad de intercambio entre los distintos elementos de medida, de protección y de control-mando o bien responder a las exigencias específicas de estos mismos medios.

Generar una imagen exacta y fiel

A partir de las dos magnitudes características de toda red eléctrica, que son la corriente y la tensión, los equipos de medida, protección y control-mando calculan un cierto número de parámetros: $\cos \varphi$, «rebasamiento» de los umbrales, potencia instantánea, ...

Por tanto, por diversos motivos (financieros, de seguridad de protección, de seguridad de explotación) las señales que suministran los captadores que alimentan aquellos equipos han de ser exactas y fieles:

- exactas

Un captador es exacto si suministra, en condiciones específicas, una señal x_2 idéntica, con un factor de medida determinado, al que se utiliza para medir x_1 , o sea:

$$x_1 = k \cdot x_2$$

siendo:

k = factor de medida

- fieles

Un captador es fiel si el factor de medida k es independiente del tiempo y condiciones de empleo, con tal que éstas se mantengan dentro de los valores especificados:

$$\text{si para } t_1 \quad x_1 = k_1 \cdot x_2,$$

$$\text{y para } t_2 \quad x_1 = k_2 \cdot x_2,$$

$$\text{y si} \quad k_1 \neq k_2,$$

cuando el captador de medida no es fiel.

Más adelante, en este mismo Cuaderno Técnico, se darán ejemplos de captadores que no son ni exactos ni fieles en ciertas condiciones de funcionamiento, especialmente

en régimen transitorio, que difieren de las condiciones especificadas.

La razón de transformación, o generalizando, el factor de medida, permiten adaptar la señal a medir a las prestaciones del aparato de medida, al analizador o trazador de esta señal.

Los equipos de medida, de protección y de control-mando, que utilizan magnitudes de entrada de bajo valor, no pueden aceptar las perturbaciones que existen en las redes de potencia a las que están conectados a través de los captadores de medida.

Separar la red de potencia de la red de medida, protección y control-mando

Las redes eléctricas son el soporte de perturbaciones eléctricas y electromagnéticas importantes, especialmente severas en los centros de transformación AT. Estas perturbaciones se deben a las maniobras de la aparamenta (seccionadores, interruptores, interruptores automáticos y contactores), a las descargas atmosféricas a las que están expuestas las líneas aéreas y a la aparición o desaparición de defectos en las redes de explotación.

Estas perturbaciones se superponen local y temporalmente a las magnitudes nominales de corriente y de tensión, lo que provoca perturbaciones en estas dos magnitudes.

La transmisión de estas perturbaciones al secundario de los captadores debe de ser compatible con los valores de aislamiento y de impedancia de entrada de los equipos que constituyen la red de medida, protección y control-mando. El valor de esta transmisión es el resultado de un aislamiento galvánico más o menos perfecto entre el circuito primario y el circuito secundario de los captadores. El factor de transmisión es función de:

- las tecnologías de construcción de los captadores,
- los principios físicos aplicados (para efectuar la medida) que en ciertos casos llevan a un factor casi nulo.

El aislamiento galvánico juega un papel esencial en el comportamiento respecto a la CEM (compatibilidad electromagnética) de los diversos tipos de captadores.

Para cada tipo de captador de los que se presentan en este Cuaderno Técnico se tratará su comportamiento frente a la CEM. Esta compatibilidad depende también de los equipos asociados, puesto que los captadores sirven para adaptar a la red de potencia los diversos medios de medida, de protección y de control-mando.

Intercambiabilidad y cumplimiento de las especificaciones de los aparatos «alimentados» por los captadores

Los equipos de medida, de protección y de control-mando evolucionaron mucho durante los años 80. Esta evolución no ha terminado. Por esto, en un mismo cuadro se pueden encontrar estos equipos con tres tecnologías diferentes.

■ electromecánica

Esta tecnología es la más antigua. Utiliza los efectos electromagnéticos de las magnitudes eléctricas. Este principio exige que los captadores proporcionen una energía importante. Del orden de 15 VA en funcionamiento normal, pudiendo alcanzar puntualmente hasta 3 400 VA al producirse un defecto en el circuito primario del captador.

■ electrónica analógica

Esta tecnología más reciente apareció con el desarrollo intensivo de los semiconductores. La energía requerida por estos equipos es mucho menor, del orden de 1 VA en régimen normal y de hasta 225 VA durante un defecto. Así resulta posible tener varios relés de protección conectados a una misma salida de los captadores.

■ electrónica digital

Basada en los microprocesadores, es la tecnología actual y todavía está evolucionando. La energía que necesita es muy baja, del orden de mVA (0,001 VA) en régimen normal y de 0,25 VA durante un defecto. Por este motivo, normalmente, los captadores pueden no tener más que una única toma de muy baja potencia, que es suficiente para alimentar la unidad de protección y control-mando que se le asocia, aunque en ciertos casos y en particular para las protecciones diferenciales (de zona, de juego de barras, de transformador) los captadores deben de tener al menos dos salidas.

Esta evolución todavía no ha sido tenida en cuenta por los redactores de normas de los captadores, por lo que éstas no permiten actualmente aprovechar completamente todas las ventajas que ofrecen las tecnologías basadas en microprocesadores y los captadores desarrollados en los últimos años. Sin embargo, se pueden encontrar en el mercado, especialmente en AT-A y en AT-B cadenas de medida de protección y de control-mando que aprovechan estos adelantos. Estos equipos se asocian a captadores específicos que realizan una adaptación lo más perfecta posible entre la red de potencia y la cadena de control-mando.

Estos captadores sólo pueden utilizarse con los dispositivos de medida, de protección y de control-mando para los que han sido desarrollados y no con otros.

2.2 Evolución de los captadores

Además de que los equipos modernos de medida, protección y control-mando necesitan menos energía; en los últimos años, la evolución de los captadores está relacionada con tres necesidades o exigencias:

■ fiabilidad

Ha contribuido a esta evolución la búsqueda permanente de la continuidad del servicio y la limitación de los efectos exteriores en caso de incidente.

■ exactitud y fidelidad

La evolución de equipo y materiales para redes, sobre todo en AT-B, con la aparición de unidades con aislamiento gaseoso y la

búsqueda de la continuidad del servicio, han forzado el desarrollo de los captadores lineales, también llamados «linealizados». Estos captadores hacen posible y segura la actuación de los sistemas de protección y de control-mando en el periodo de régimen transitorio.

■ coste

La correcta explotación de la red con el objeto de mejorar la continuidad del servicio requiere el conocimiento de las magnitudes características de las redes en muchos sitios, de ahí la utilización de un número cada vez mayor de captadores. Por este motivo el coste de los captadores pasa a ser un elemento importante.

2.3 Las magnitudes a medir

Valor de tensión

Es una característica importante de la red en la que se instalarán los captadores. De este valor de tensión se derivan los valores dieléctricos que se utilizarán para dimensionar los captadores.

La CEI –Comisión Electrotécnica Internacional– en su norma 71 define la tensión más elevada para un material, U_m , como el valor máximo de la tensión entre fases que la red puede alcanzar.

A esta tensión U_m se le asocian, en la misma publicación y en las publicaciones que se refieren a los captadores de medida, el comportamiento dieléctrico a la frecuencia de red (50 Hz), la resistencia a la onda de choque (1,2/50) y según el caso, el comportamiento frente a las ondas de maniobra y a las ondas de ruptura.

Esta misma publicación divide en tres gamas los valores normalizados de U_m :

- la gama A, de 1 kV a menos de 52 kV,
- la gama B, de 52 kV a menos de 300 kV,
- y la gama C, de 300 kV o más.

El resto de este Cuaderno Técnico está dedicado esencialmente a los captadores para las redes de la gama A.

Tipos de magnitudes

La gestión, la supervisión, la protección y el telemando de cualquier tipo de red se llevan a cabo a partir de las dos magnitudes características de todo circuito eléctrico: la tensión y la intensidad de corriente.

■ tensión

El valor nominal de una red eléctrica AT-A varía desde algunos centenares de voltios a algunas decenas de miles de voltios. Las tensiones de defecto son generalmente bajas y frecuentemente próximas a cero.

■ intensidad de corriente

El valor nominal varía desde algunos amperios a algunos miles de amperios. Las corrientes de defecto pueden alcanzar varias decenas de kiloamperios.

En este Cuaderno Técnico sólo se analizarán los captadores de corriente, puesto que representan la mayor parte de los captadores de magnitudes eléctricas en una red. Es precisamente en AT-A donde su importancia económica es la mayor ... y por tanto debe de ser reducida en lo posible.

Para ello hay que:

- por una parte, conocer las prestaciones solicitadas para la aplicación a desarrollar y especificarlas lo más exactamente posible,

- por otra, conocer el funcionamiento y evaluar las prestaciones de los diversos tipos de captadores de corriente.

Utilización de las magnitudes

En la explotación de una red, estas magnitudes características se utilizan para diversos equipos. Y así, el conocimiento de estos equipos permitirá determinar las características del secundario de los captadores de corriente.

■ aparatos de medida

- los aparatos de cuadro, relativamente poco precisos, permiten leer el valor de las magnitudes a medir.

Téngase presente que en la cadena de control-mando, los aparatos de aguja tienden a ser sustituidos por sistemas con visualización numérica o digital. Son los amperímetros, voltímetros, vatímetros, frecuencímetros, ... De clase 1,5 ó 3, su asociación con captadores de clase 1 es normalmente suficiente para la función que se le asigna.

- los contadores y registradores son utilizados por los distribuidores-suministradores de energía para la facturación y para el reparto de gastos de consumo de energía entre los distintos talleres de un mismo abonado. Su precisión suele ser mejor que la de los aparatos antes citados. Para facturación, el captador asociado suele ser de clase 0,5. Para el reparto, la precisión que se pide es menor, siendo suficiente normalmente un captador de clase 1.

■ relés de protección

De tipo modular, cada elemento tiene una función perfectamente definida; estos elementos suelen agruparse para supervisar una parte de la red eléctrica (**figura 1**). Las funciones elementales más conocidas son:



Fig. 1: Relés de protección de tipo modular (Vigirack - Merlin Gerin).

- la protección de máxima corriente de fase (sobrecarga o cortocircuito),
- la protección de máxima corriente homopolar,
- la protección direccional de corriente (fase y homopolar),
- la protección diferencial de zona,
- la protección de retorno de potencia activa,
- la protección de retorno de potencia reactiva.
- unidades de protección y de control-mando

Son conjuntos integrados configurables basados en el uso de microprocesadores (**figura 2**). Estas unidades agrupan (a nivel de celdas: nivel 1 de un sistema de gestión técnica de la red eléctrica), con unas dimensiones muy pequeñas, las diversas funciones necesarias para la explotación de las redes eléctricas, que son:

- las medidas,
- las protecciones,
- los automatismos,
- las comunicaciones hacia niveles superiores 2 (subestaciones) ó 3 (centro de control).

Téngase presente que, en los circuitos de entrada de estos equipos de medida, hay que evitar tanto las grandes corrientes como las grandes tensiones. Precisamente el rol de los captadores es el adaptar los valores de las señales para los circuitos de las entradas (medida y/o protección).



Fig. 2: Unidad de protección y control-mando (SEPAM 2000 - Merlin - Merlin Gerin).

2.4 Los diversos tipos de captadores de corriente

Los captadores de corriente se clasifican en tres grandes familias:

- los transformadores,
- los captadores específicos,
- los captadores híbridos.

Transformadores de corriente –TC–

Este captador tiene dos circuitos eléctricos, primario y secundario, y un circuito magnético. Proporciona una señal secundaria de la misma naturaleza que la magnitud primaria a medir; es una fuente de corriente. A pesar de que no son lineales y de que su margen de utilización está limitado por los fenómenos de saturación magnética, son actualmente los captadores más utilizados en AT-A y AT-B.

Un TC puede tener varios secundarios, cada uno dedicado específicamente a una función determinada, medida o protección.

- secundario de «medida»

Su gama de precisión es estrecha, estando normalmente limitada a corrientes iguales o inferiores a la corriente primaria asignada.

- secundario de «protección»

En este caso, el margen de precisión es mucho más amplio, llegando normalmente a unas veinte veces la corriente primaria asignada. El diseño del secundario de este tipo de captadores es muy diferente, según el modo de funcionamiento, régimen permanente o transitorio, al que se destinan. Hay que indicar que el margen de funcionamiento de un TC es generalmente mucho más amplio que su margen de precisión, porque aquél debe de tener en cuenta la corriente de cortocircuito.

Captador específico –CS– o captador con bobina de Rogowski

El principio de funcionamiento de este captador fue descrito por Rogowski en 1912. Se distingue de sus predecesores porque en su constitución no interviene ningún material ferromagnético. Esta ausencia le confiere una perfecta linealidad en un margen muy amplio de valores de corriente. Esta linealidad no se ve afectada por las diferentes frecuencias presentes en las redes AT-A y AT-B. Este tipo de captador asociado a una impedancia de carga Z , de valor elevado ($\approx 10 \text{ k}\Omega$ a 50 Hz), es una fuente de tensión (**figura 3**).

Captadores híbridos –CH–

La definición de captador híbrido dada en la terminología abarca varios tipos de captadores. Aquí sólo se citan los más conocidos y los más utilizados en AT-A y AT-B.

■ captadores de corriente óptica

Su elemento sensible es una fibra óptica o un cristal óptico. En los dos casos se aplica el principio de Faraday, descubierto en 1845 por este físico.

■ transformador de flujo nulo

En este tipo de CH el elemento sensible es un TC en el que el flujo creado por el primario es

anulado para cada arrollamiento secundario por un arrollamiento auxiliar (figura 4). Esto anula los inconvenientes de la saturación, pero sólo para ciertos márgenes limitados de funcionamiento (corriente y frecuencia).

■ captador de corriente de efecto Hall (figura 5)

Su elemento sensible es una célula de efecto Hall (figura 5). Permite medir correctamente tanto corriente continua como alterna. Puesto que suele utilizar un circuito magnético para aumentar su sensibilidad, sufre, como un TC, las consecuencias de los fenómenos de saturación.

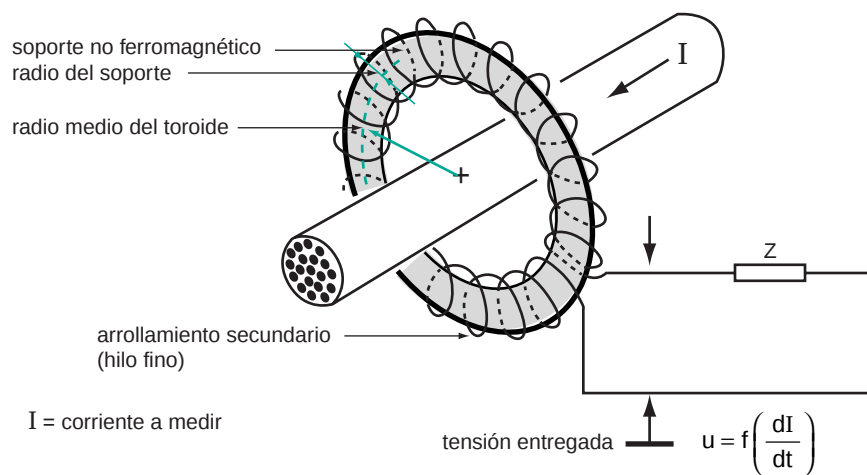


Fig. 3: Esquema de principio de un CS.

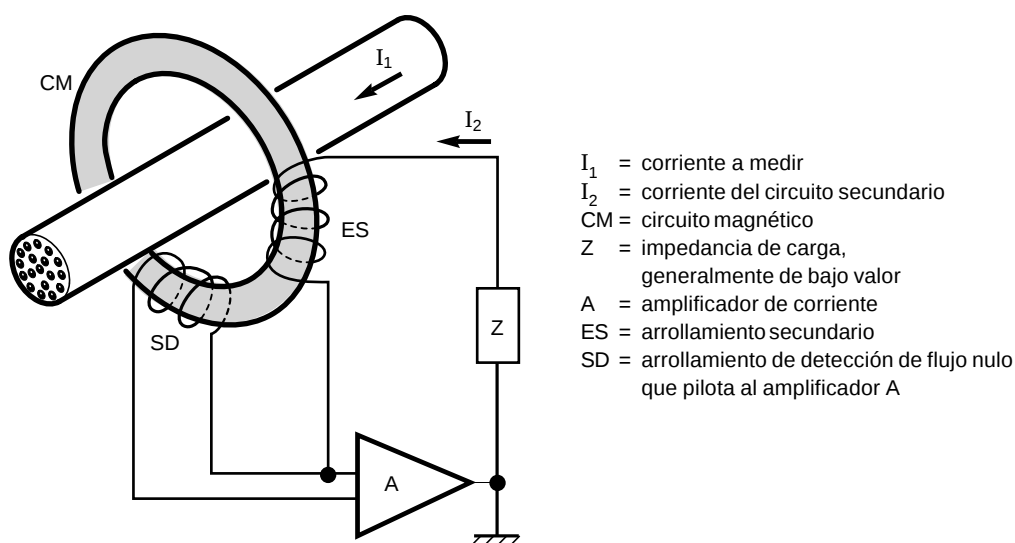


Fig. 4: Esquema de principio de un TC de flujo nulo.

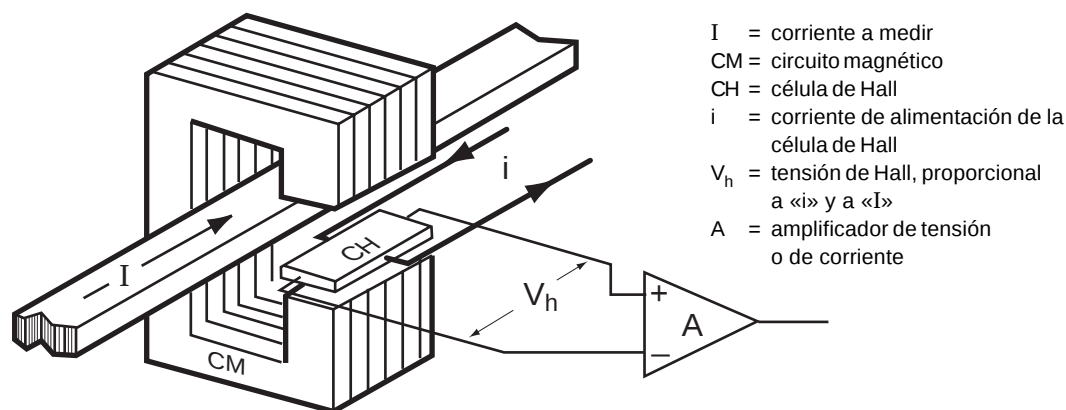


Fig. 5: Esquema de principio de un captador de corriente a efecto Hall.

2.5 La normalización

La normalización existente, nacional o internacional, sólo se refiere a los TC (transformadores de corriente). Se están realizando diversos trabajos para normalizar los captadores híbridos –CH–. Estos estudios todavía no afectan a los captadores específicos.

Normas nacionales

En la CEE las normas nacionales de los diversos países están en curso de armonización a través del CENELEC. Esta armonización se hace sobre las bases de la normalización internacional editada por la CEI.

Normas internacionales

La CEI, a través del Comité de Estudios nº 38 elabora normas que se refieren a los captadores de corriente y de tensión.

Precisión

A partir de las normas existentes para los TC, es posible definir un cierto número de términos genéricos que se pueden aplicar a todos los tipos de captadores. En esta normalización se agrupan bajo el término «precisión». Permiten especificar y evaluar las prestaciones y campos de utilización de los captadores de corriente.

■ razón de transformación teórica

Es la razón entre los valores eficaces asignados a las magnitudes primarias y secundarias. Suele representarse con la notación K_n . Para los TC es un número adimensional. Para los CS o los CH suele expresarse en:

$$\frac{\text{Amperios (primario)}}{\text{Voltios (secundario)}}$$

■ error

Todos los captadores tienen imperfecciones que provocan distorsiones en la reconstrucción de la señal secundaria.

En corriente alterna existen tres tipos de errores:

□ error de relación: expresado en %, se calcula a partir de la diferencia entre la razón de transformación real y teórica (anexo 1),

□ error de fase: suele expresarse en minuto de ángulo, y da, para π (TC) o para $\pi/2$ (CS), la diferencia de fase que existe entre el vector de la magnitud primaria y el de la magnitud secundaria (anexo 1),

□ error compuesto: expresado en % del valor eficaz de la corriente primaria, es, en régimen permanente, el valor eficaz de la diferencia entre:

- el valor instantáneo de la corriente primaria,
- y el producto de la razón de transformación asignada por el valor instantáneo de la corriente secundaria.

■ clase de precisión

La clase de precisión define para un captador de corriente los límites máximos de los errores (de relación y de fase) en condiciones especificadas.

■ carga de precisión

Expresada en ohmios, con un factor de potencia especificado, es el valor de la impedancia conectada en los bornes secundarios del captador sobre cuyo valor se basan las condiciones de precisión.

■ potencia de precisión

Expresada en VA, es la potencia aparente que el captador puede proporcionar a su carga de precisión, cuando está atravesado por la corriente primaria asignada.

3 Transformador de corriente

Su principio de funcionamiento (brevemente descrito en el capítulo 2) le confiere propiedades ventajosas pero también perjudiciales en ciertos casos para la explotación de las redes.

Tanto su descripción técnica así como su funcionamiento se describen detalladamente en el Cuaderno Técnico nº 164, que aborda sobre todo los problemas derivados del funcionamiento de las instalaciones eléctricas en régimen permanente.

3.1 Utilización

En AT-B, la aparición de equipos blindados con gas aislante y la búsqueda de la estabilidad dinámica permanente de las redes lleva a utilizar generadores de gran potencia que obligan a tener en cuenta su funcionamiento durante los períodos de cambio de estado de la red (régimen transitorio).

Los fenómenos de saturación y de histéresis, sin un sobredimensionamiento importante de los núcleos magnéticos de los TC, hacen que la respuesta en régimen transitorio de este tipo de captadores no sea exacta ni fiel. En general, para obtener una respuesta exacta, hay que esperar al final del régimen transitorio. Este tiempo de espera, en ciertos casos de explotación y defecto, no siempre es compatible con la seguridad de los equipos y de las personas.

A veces es necesario detectar el defecto en el primer período del régimen transitorio, que en ciertos tipos de redes puede durar 200 ms (o sea, 10 períodos).

En régimen transitorio, también son necesarias la exactitud y la fidelidad:

- en AT-B, para los equipos que se encuentran cerca de las centrales de gran potencia y en los juegos de barras de los centros de transformación importantes,

- en AT-A, en las proximidades de las fuentes, cuando una red AT-B de gran potencia está alimentada o por un transformador con una relación de transformación muy alta (220 kV/20 ó 36 kV, por ejemplo) o por generadores de muy gran potencia unitaria.

La normalización actual permite, para los TC y para los dos casos de funcionamiento (permanente y transitorio) y a partir de condiciones específicas, evaluar perfectamente las prestaciones de estos equipos.

3.2 Normalización

Funcionamiento en régimen permanente

Los TC destinados a funcionar siguiendo este régimen deben de cumplir normas internacionales, europeas y nacionales.

- normas internacionales

La CEI 185, segunda edición de 1987, en curso de revisión por el CE 38, se refiere a los TC de medida y de protección de clase P (anexo 2).

La revisión en curso tiene principalmente el objeto de refundir las cláusulas que se refieren a las características dieléctricas y la adición de un cierto número de disposiciones que se refieren únicamente a los TC para AT-B como son los esfuerzos mecánicos sobre las conexiones y las perturbaciones radioeléctricas.

- normas europeas

Esta normalización, editada por la CENELEC, se hace a partir de documentos CEI. Para los TC, en 1993, todavía no hay documentos EN. Sólo están en curso de discusión los documentos de armonización (HD).

- normas nacionales

Actualmente, en Europa, son muy diferentes unas de otras. En el futuro estarán más próximas porque todas deberán ser conformes con la norma EN que se refiere a los TC para funcionar en régimen permanente.

- Francia

La norma NF C 42-502 (febrero 1974) está prácticamente conforme con los documentos

CEI y lo estará con la norma EN excepto en el modo de nombrar los bornes secundarios.

Nota:

Según la norma NF C 42-502 el borne secundario conectado a masa de la instalación, siempre se referencia como S2; este borne es también el borne común a todas las razones de transformación en el caso de TC con varias razones de transformación obtenidas de tomas del arrollamiento secundario. Por otra parte, la misma norma indica que los arrollamientos destinados a la medida deben de tener un referenciado impar; en cambio, los arrollamientos destinados a la protección se referencian con cifra par.

□ Gran Bretaña

La norma BS 3938 (febrero 1973) es muy similar a la de la norma CEI y será prácticamente conforme con los documentos EN. Incluye además los arrollamientos clase X destinados a la protección. Este último tipo permite una especificación más precisa de los arrollamientos de protección. En un próximo futuro, esta clase podría quedar incluida en las normas europeas EN.

□ Italia

La norma CEI 1008 (Octubre 1987) (Comitato Elettrotecnico Italiano) es conforme a la CEI 185 y será también conforme con la norma EN cuando se publique.

□ USA

La norma ANSI/IEEE C57 13 (1978) es muy diferente de la CEI 185 y de las normas europeas:

- las clases y las potencias de precisión no están definidas en los mismos términos,
- las referencias de los bornes son muy diferentes,
- y los aparatos son normalmente más voluminosos.

Funcionamiento en régimen transitorio

Los grandes distribuidores de energía tienen desde hace mucho tiempo especificaciones de empresa que afectan al funcionamiento de los TC en modo transitorio. Estas especificaciones se cumplían, y todavía se cumplen en los procesos de fabricación especiales y son objeto de acuerdos directos entre los fabricantes y usuarios.

■ normas internacionales

A nivel internacional, las prescripciones que se refieren a los TC para protección, en cuanto a su respuesta en régimen transitorio, están actualmente incluidas en la norma CEI 44-6 (primera edición 1992-03).

■ normas europeas y nacionales

Todavía no existen estas normas. La norma europea, en curso de elaboración, estará muy próxima de la CEI 44-6. Las normas nacionales serán editadas por los diferentes organismos a partir del documento EN.

3.3 Especificación de un TC

Los diferentes elementos que intervienen

El usuario, el diseñador de la red, el fabricante del sistema de protección y el fabricante de los TC intervienen, a diferentes niveles, en la especificación de los TC, teniendo cada uno en cuenta preocupaciones diferentes:

■ **el diseñador de la red** que, por razones de seguridad de funcionamiento, tiene tendencia a aumentar los factores de dimensionamiento ligados al primario del TC:

□ la resistencia térmica y electrodinámica (representada por los valores eficaces y de cresta de las corrientes de cortocircuito) para aguantar durante un tiempo, generalmente igual a 1 segundo,

□ la duración del régimen asimétrico, dando constantes de tiempo o razones X/R sobredimensionadas.

■ **el fabricante de los relés** (de protección) que por razones de seguridad de funcionamiento de sus equipos tiene tendencia a especificar las prestaciones secundarias elevadas:

□ potencia de precisión, sobreestimando el valor de las impedancias de conexión entre el relé y el TC,

□ clase de precisión, exigiendo al TC que no introduzca error adicional en la cadena. Hay que tener presente que podría conseguirse una precisión global idéntica utilizando equipos algo más precisos y TC de menor precisión.

Por ejemplo:

un aparato de medida de clase 3 con un TC de clase 0,5 da una precisión global de clase 3,5. En ciertos casos es mejor (financieramente) coger un aparato de clase 2 y un TC de clase 1 que dan una precisión global de 3. Esto es especialmente válido en el caso de pequeñas corrientes primarias y de grandes corrientes de cortocircuito.

■ **el fabricante de los TC** que intenta conciliar las diversas demandas, teniendo en cuenta sus propios imperativos, para poder satisfacer la demanda. La razón I_{th}/I_n (resistencia térmica durante $1 s/I_{primaria asignada}$) da una buena idea

de la viabilidad del TC y esto independientemente de las prestaciones secundarias solicitadas.

Por ejemplo:

□ $I_{th}/I_n \leq 100$:

el TC obtenido puede considerarse estándar con prestaciones secundarias normales,

□ $100 < I_{th}/I_n \leq 400$:

el TC que responde a estas especificaciones es un TC cuya posibilidad de realización se ha de estudiar individualmente, sus prestaciones secundarias son reducidas,

□ $I_{th}/I_n > 400$:

este TC no siempre puede fabricarse, puesto que sus prestaciones secundarias son muy bajas.

Las magnitudes a especificar

Para fabricar un TC hay que especificar varias magnitudes. Algunas tienen valores normalizados (véanse las normas citadas en el apartado de normalización).

Para los TC que deban de tener una precisión específica en régimen transitorio hay que referirse o a la norma CEI 44-6 ó a las especificaciones de las empresas.

La siguiente enumeración sólo se refiere a los TC funcionando en régimen permanente.

■ primario

□ valores de aislamiento definidos para tres tensiones, la más elevada de la red (U_m), la tensión asignada de resistencia de corta duración a la frecuencia industrial y la tensión de resistencia a la onda de choque,

□ corriente de cortocircuito térmico asignada (I_{th}) y su duración, si no es de 1 s,

□ resistencia electrodinámica (I_{dy}) si su valor de cresta no es $2,5 I_{th}$,

□ la corriente primaria asignada

Según las reglas del arte de la profesión, suele preferirse que la corriente nominal de la red en la que está instalado un TC esté comprendida entre el 40 y el 100% de la corriente primaria asignada del TC.

■ secundario

Las funciones de medida y protección deben de especificarse, puesto que soportan sobreesfuerzos y requieren especificaciones diferentes. En ambos casos (medida y protección) hay que especificar la corriente secundaria asignada (1 ó 5 A).

□ medida

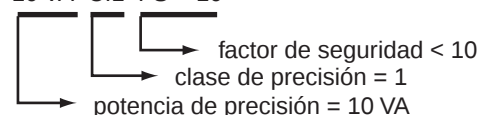
Hay que especificar la potencia de precisión (en VA), la clase de precisión y el factor de seguridad (FS) máximo, generalmente comprendido entre 5 y 10 y muy excepcionalmente inferior a 5.

Nota: El factor de seguridad es la razón entre la corriente primaria, para la que el error de relación de transformación es mayor o igual al 10% y la corriente primaria asignada.

Las diversas clases de precisión y las correspondientes exigencias vienen dadas por las diferentes normas.

Para los aparatos de cuadro de clase 1 es generalmente suficiente. La designación usual de un secundario de este tipo se hace como sigue:

10 VA C11 FS < 10



□ protección

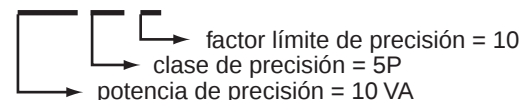
Existen dos maneras de especificar los arrollamientos destinados a la protección.

– Conforme a la CEI 185 y las normas europeas: se especifica la potencia de precisión (en VA), la clase de precisión (5P ó 10P) y el factor límite de precisión (FLP).

La clase de precisión da el error compuesto máximo admisible sobre la corriente secundaria para una corriente primaria igual a FLP veces la corriente asignada (5P = 5%, 10P = 10%). Las normas dan las características y exigencias asociadas a las diferentes clases de precisión.

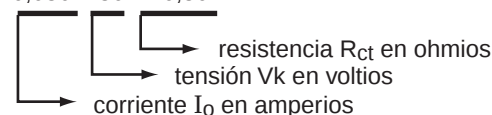
Entonces, los arrollamientos se designan así:

10 VA 5P 10



– Conforme a la norma BS 3938: se especifica el valor en voltios de la tensión de excitación en el codo de saturación (V_k), la resistencia máxima del arrollamiento (R_{ct}) y, si es necesario, la corriente de excitación máxima (I_o) para la tensión V_k . En este caso, los arrollamientos se designan de la siguiente forma:

0,050 150 R 0,50



Las imperfecciones de los TC

Las imperfecciones magnéticas (saturación, remanencia, pérdidas por corrientes de Foucault y por histéresis) generan imprecisiones en los TC: error de relación de transformación y de

fase, linealidad imperfecta, respuesta dependiente de situaciones anteriores... Otras imperfecciones son debidas a los entornos electromagnético y eléctrico del TC.

■ fenómenos magnéticos

Los dos fenómenos principales «perturbadores» son la saturación y la histéresis: un TC saturado entrega una señal que ya no es senoidal y su precisión no puede ser garantizada (errores de relación de transformación y de fase muy amplificados).

Estos fenómenos se presentan:

- durante el régimen transitorio, por ejemplo, al cerrar un circuito sobre un defecto con o sin componente continua, el estado de saturación alcanzado depende del estado magnético inicial del circuito magnético (existencia, más o menos importante, de magnetismo remanente),
- en régimen permanente de cortocircuito, si el valor de éste es superior a FLP veces la corriente primaria asignada,
- cuando el valor de la carga a la que está conectado el TC es superior a su carga de precisión, caso de que existan conexiones de gran longitud o de que se hayan añadido equipos en el circuito de carga del arrollamiento secundario,

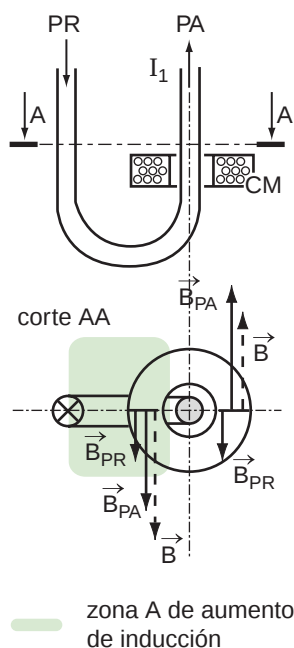
□ si la frecuencia de la red es inferior a la frecuencia asignada: la utilización en 50 Hz de un TC que tenga una frecuencia asignada de 60 Hz provoca un aumento de la inducción del 20%; por el contrario, la utilización en 60 Hz de un TC de frecuencia asignada 50 Hz, no tiene riesgos especiales.

El funcionamiento en régimen saturado no debe de mantenerse. La saturación provoca calentamientos anormales en los componentes activos del TC:

- del circuito magnético, porque las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault son importantes,
- del bobinado secundario, porque las corrientes, además de muy deformadas, son muy altas.

■ fenómenos externos

□ posición del conductor primario y de los conductores próximos. Sus geometrías y sus posiciones relativas respectivas pueden alterar de forma no despreciable la precisión de los transformadores de medida. Estas alteraciones se deben a la no linealidad de los materiales ferromagnéticos. El caso típico es el de los transformadores de corriente instalados en un bucle (figura 6) o en tresbolillo en los juegos de



El conductor de retorno o de la fase próxima (PR) crea un campo magnético perturbador en el circuito magnético (CM); este campo se suma vectorialmente al que crea la corriente I_1 , que es la que hay que medir y que atraviesa normalmente (PA). Esta suma vectorial produce un aumento de la inducción en la zona A.

Este aumento de la inducción depende de:

- la corriente que circula por el conductor perturbador,
- la distancia que hay entre el circuito magnético y esta corriente perturbadora.

Esto provoca saturaciones locales que provocan un aumento del valor de la corriente de excitación (I_e) y por consiguiente de los errores.

Fig. 6: Esquema de un TC de barra pasante cuyo circuito primario forma un bucle.

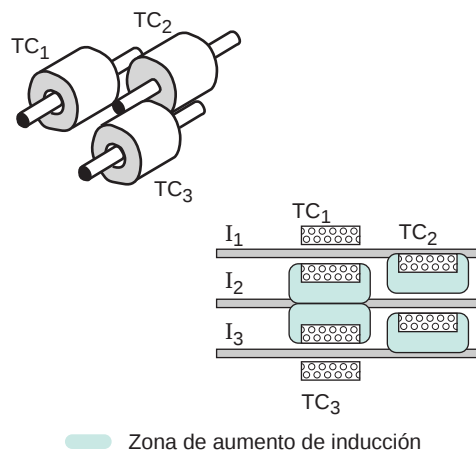


Fig. 7: Esquema de tres TC de barra pasante colocados en tresbolillo en el juego de barras.

barras (**figura 7**). Estos dos montajes provocan un incremento localizado de la inducción y de ahí la aparición del error.

□ ciclo de rearranques

Después de un corte de una corriente de cortocircuito primaria, el retorno al valor de remanencia de la inducción en el núcleo magnético del TC no es instantáneo. La disminución de esta inducción sigue una ley exponencial que tiene una constante de tiempo T_2 ; ésta última es función del circuito secundario y suele tener una duración comprendida entre uno y tres segundos. Por tanto, al producirse un reenganche rápido, hay en el circuito magnético del TC un magnetismo remanente que se suma vectorialmente a la inducción creada por la corriente que se está estableciendo (**figura 8**). Si las dos inducciones

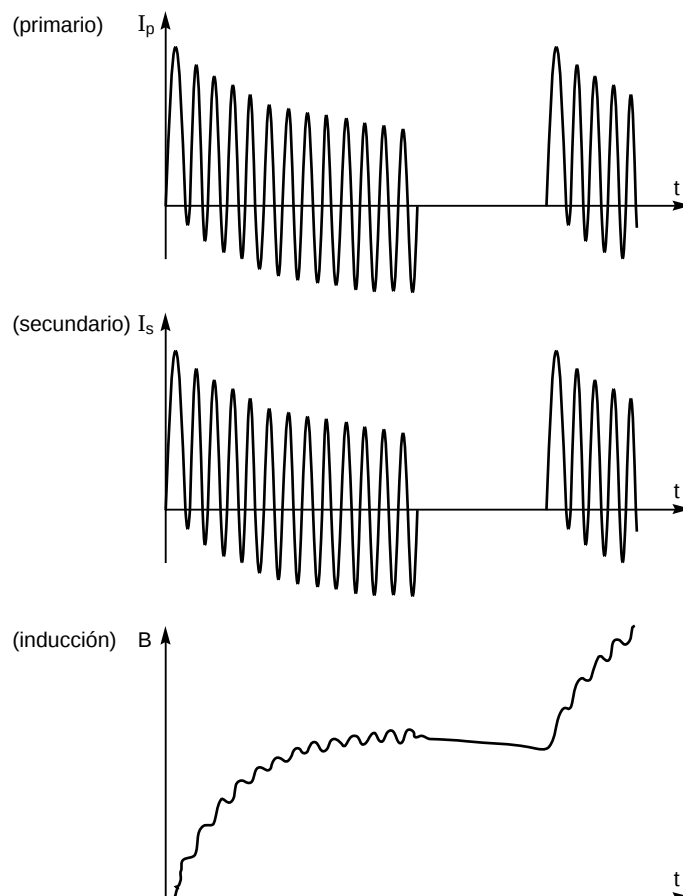


Fig. 8: Evolución de las corrientes y de la inducción en un TC no saturado.

tienen el mismo signo y si el TC no está dimensionado para garantizar la precisión en régimen transitorio, es muy probable que la señal secundaria suministrada por el TC no se parezca en nada a la corriente primaria que lo atraviesa.

■ precauciones a tomar con los TC

□ en régimen permanente:

- el dimensionamiento del TC debe ser compatible con el uso al que se destina,
- la suma de las impedancias de entrada de todos los relés y/o aparatos de medida además de la de los cables de conexión debe de ser inferior o, como mucho, igual a la impedancia de precisión. Ésta última se obtiene dividiendo la potencia de precisión asignada por el cuadrado de la corriente secundaria asignada,
- las condiciones de instalación no deben de provocar saturación local importante. Hay que suprimir las instalaciones en tresbolillo (figura 7).

□ en régimen transitorio, para los secundarios de protección únicamente:

– en el caso general de protecciones a tiempo constante, para tener en cuenta (en todo o en parte) los fenómenos de histéresis, es suficiente verificar que el valor de la corriente de ajuste de actuación (de la protección) dividida por el valor de la corriente secundaria asignada del TC, es inferior a dos veces el FLP del secundario afectado,

– para las protecciones a tiempo dependiente (diferencial, homopolar, ...) hay que estar seguro de que la especificación del TC es conforme a las recomendaciones del fabricante del relé.

– si en este período de funcionamiento se necesita una respuesta precisa, hay que especificar y diseñar los TC conforme a las diferentes clases definidas en la CEI 44-6 (anexo 1). Esta norma lleva siempre a un sobredimensionamiento importante de los TC. La necesidad de tener un bajo magnetismo remanente (caso de rearranques) lleva a la utilización de circuitos magnéticos con entrehierro. Los TC llamados «linealizados» se consiguen precisamente de esta forma (ver TPZ en la norma CEI 44-6).

3.4 Aplicaciones especiales

Medida de corrientes diferenciales residuales

En la red de distribución BT, la protección de personas suele hacerse supervisando el valor de la corriente diferencial residual. Esta protección, frecuentemente integrada en el interruptor automático BT, suele ser autónoma: la energía necesaria para el funcionamiento la proporciona el TC de detección de las corrientes diferenciales residuales.

Las prestaciones que se piden a estos TC necesitan generalmente materiales ferromagnéticos que tengan una permeabilidad relativa (μ_r) muy grande, a base de níquel, y, por tanto, son caros. Hay un método rápido de dimensionar este tipo de TC (anexo 3; bibliografía: artículo de la revista RGE nº 4).

Medida de la corriente homopolar (I_0)

Es la corriente resultante de la suma vectorial de las tres corrientes de fase de un circuito trifásico. Esta suma puede efectuarse de dos maneras:

■ sumando las corrientes secundarias de los tres TC (montaje de Nicholson).

Para esto hay que utilizar TC con la misma relación de transformación, asegurándose de que las conexiones primarias y secundarias se

hacen respetando las polaridades (sentido del bobinado) de los diferentes arrollamientos primarios y secundarios (figura 9). En este método hay dos fenómenos que limitan los umbrales de detección:

□ en régimen permanente, las diferencias de error de relación de transformación y de fase hacen que la suma vectorial no sea nula; por tanto, aparece una «falsa corriente homopolar» que puede no ser compatible con los umbrales de sensibilidad deseados.

En la práctica, emparejando los TC (en fase y módulo) se puede conseguir bajar los umbrales,

□ en régimen transitorio, la saturación y la histéresis de los circuitos magnéticos provocan el mismo defecto. Un sobredimensionamiento de los TC aleja el punto de aparición de estos fenómenos.

Estas soluciones (emparejamiento y sobredimensionamiento) no permiten generalmente la detección de una corriente I_0 inferior al 6% de las corrientes de fase.

■ mediante suma de flujos

Para paliar la falta de precisión del primer método y evitar los problemas que plantea, es posible hacer la medida de las corrientes I_0 mediante un único TC toroidal o «toro»: su circuito magnético es atravesado por las tres

corrientes de fase I_1 , I_2 e I_3 de la red trifásica (figura 10). Con un diseño adecuado (materiales ferromagnéticos, dimensionado y carga de precisión) y ciertas precauciones de instalación del toro (cables agrupados y centrados, eventual utilización de un manguito ferromagnético) este método permite medir valores muy bajos de corriente I_0 con buena precisión (error de módulo del orden de 1% y error de fase inferior a 60 minutos de ángulo): algunos centenares de mA en AT-A y algunas decenas de mA en BT.

■ detección del defecto

En las redes de distribución AT-A, la utilización de detectores de defectos facilita la localización rápida de éstos permitiendo así reducir al máximo tanto la parte de red no alimentada como la duración del corte. La señalización del

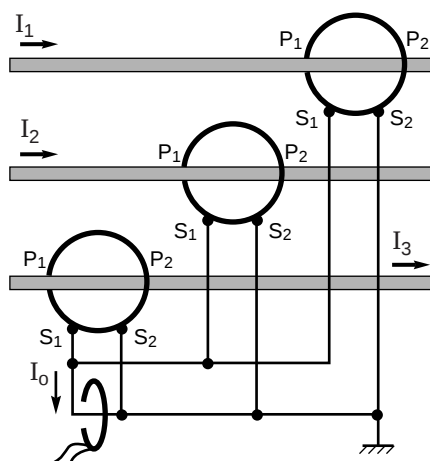
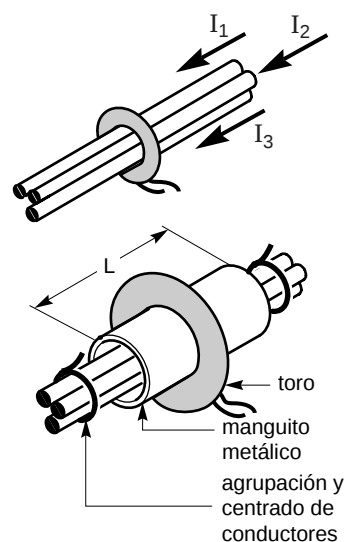


Fig. 9: Conexión de tres TC para la medida de corriente homopolar (montaje de Nicholson).

paso de la corriente de defecto, dada por estos detectores, puede visualizarse de dos maneras:

- por visores mecánicos o eléctricos, colocados en los puntos de fácil acceso para el personal de explotación (caso de los centros de transformación MT/BT en las redes urbanas o rurales subterráneas),
- por teletransmisión a un centro de explotación para los detectores de defectos situados en los interruptores telecontrolados de las redes de distribución pública.

Estos detectores de defectos se alimentan mediante TC que no están regulados por ninguna norma: son los conjuntos TC-detector de defecto que especifican los usuarios.



$$L \text{ manguito} \geq 2 \text{ diámetro del toro}$$

Fig. 10: Medida de la corriente mediante un toro.

3.5 Comportamiento frente a la CEM

En AT-A la CEM de los TC puede considerarse satisfactoria. En AT-B, las pantallas repartidoras de campo eléctrico, más o menos perfectas, pero obligatorias, pueden llevar a una CEM no satisfactoria del TC.

La capacidad de acoplamiento existente entre los arrollamientos primario y secundario del TC contribuye a la transmisión de las perturbaciones desde el circuito primario al secundario. El valor de

esta capacidad es función de la tensión de aislamiento del TC, de las características del secundario y de la tecnología de aislamiento utilizada. Ciertas especificaciones de empresas para las tensiones $U_m > 123 \text{ kV}$ dan un valor máximo del factor de transmisión de las perturbaciones. Esta magnitud se mide mediante un ensayo de tipo descrito en la especificación. La introducción en la normalización internacional de esta noción está actualmente en discusión en el seno del CE 38.

3.6 Un riesgo especial

Es peligroso abrir el circuito secundario de un TC.

El flujo de inducción magnética que circula por el núcleo magnético es la suma de dos flujos de signos opuestos: uno resultante de la presencia de una corriente primaria y el otro de una corriente secundaria. Si se anula éste último abriendo el circuito secundario, aumenta mucho el flujo en el núcleo, lo que provoca un gran aumento de la tensión en bornes del secundario, pudiendo alcanzarse valores de tensión de pico o instantáneos

superiores a 5 kV. Estas tensiones pueden ser mortales para las personas y provocar la destrucción del equipo.

Conclusiones prácticas

- no hay que abrir en ningún caso el circuito secundario de un transformador de corriente en servicio,
- antes de cualquier actuación sobre la carga de un TC en funcionamiento hay que hacer un cortocircuito de la menor impedancia posible en los bornes del secundario.

4 Captador de corriente con bobina Rogowski

El principio de funcionamiento de este captador de corriente fue descubierto por ROGOWSKI en 1912. Este tipo de captador (que a partir de

ahora representaremos como CS) se ha desarrollado a partir de 1986 para su aplicación industrial en redes AT-A.

4.1 Funcionamiento

Principio físico

La aplicación del teorema de Ampère a una bobina Rogowski (**figura 3**) indica que la tensión que aparece en los bornes de una carga Z, de valor elevado, es función de la corriente $I = i(t)$. La corriente I a medir crea localmente, en cada espira, una inducción $b = \mu_0 \cdot h$, siendo μ_0 la permeabilidad del vacío, puesto que el soporte de los bobinados no está realizado con materiales ferromagnéticos, y h el campo magnético correspondiente a la corriente I . El flujo abarcado por el conjunto de la sonda tiene la expresión:

$$\Phi = \sum_{\text{espiras}} \pi \cdot r^2 \cdot b$$

Si todas las N espiras son de sección idéntica y si sus centros están situados dentro de un mismo círculo de diámetro R , que puede considerarse como muy grande respecto a su propio radio r , es posible escribir:

$$\Phi = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu_0 \cdot h$$

y por la aplicación del teorema de Ampère:

$$\Phi = N \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{i(t)}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

La fuerza electromotriz desarrollada en el bobinado es:

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = \left(\frac{N \cdot r^2 \cdot \mu_0}{2 \cdot R} \right) \left(\frac{di}{dt} \right)$$

Si

$$i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

por tanto

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

y

$$\begin{aligned} e(t) &= - \left(\frac{N \cdot r^2 \cdot \mu_0}{2 \cdot R} \right) \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \\ &\quad \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= -K \cdot \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

Componentes electromagnéticas

Un captador CS está formado por cinco partes (**figura 11**):

- un arrollamiento primario constituido por un único conductor de cobre cuya sección viene determinada por:
- una corriente primaria de calentamiento,
- una corriente de cortocircuito asignada,
- un soporte del bobinado secundario, generalmente toroidal, y constituido por un material no ferromagnético,
- un arrollamiento secundario, bobinado sobre el soporte,
- una resistencia de ajuste conectada al arrollamiento secundario,
- un blindaje magnético que protege la bobina de las posibles perturbaciones debidas a campos magnéticos exteriores al captador.

Componentes dieléctricos

- aislamiento dieléctrico
- Como para los transformadores de corriente, el primario y el secundario de un captador CS están aislados el uno del otro mediante una resina dieléctrica sólida en AT-A.

- pantalla dieléctrica

Con el objeto de mejorar el comportamiento frente a la CEM del sistema, se coloca una pantalla dieléctrica conectada a masa entre el primario y el bobinado secundario.

Modelización

De la misma manera que con los TC, para el estudio del funcionamiento de un CS es práctico diseñar y explotar un modelo. El modelo propuesto a continuación sólo es aplicable a frecuencias industriales. En el caso de frecuencias elevadas (varios centenares de kHz) hay que añadir las capacidades repartidas del bobinado secundario así como las diferentes capacidades de acoplamiento primario-secundario, primario-masa y secundario-masa.

Esquema equivalente

Se pueden diseñar dos esquemas equivalentes:

■ el primero (figura 12) se inspira en el de los TC por la presencia de un transformador ideal, con:

□ L = valor de la inductancia del cableado de conexión del captador a su carga M ,

□ L_f es la inductancia de fuga del bobinado. El arrollamiento secundario de los captadores CS tiene sus espiras contiguas muy bien repartidas sobre el soporte. Por tanto, su inductancia de fuga, de muy bajo valor, puede despreciarse.

□ $L_1 \cdot \omega$ = impedancia magnetizante del generador de corriente equivalente,

□ R_t = suma de las resistencias del bobinado y de conexión,

□ R_a = resistencia de ajuste,

□ Z_c = impedancia de la carga M a la frecuencia considerada,

■ El segundo (figura 13) incluye un generador de tensión que se deriva del estudio teórico. Es este esquema el que se seguirá a partir de aquí.

En el esquema equivalente:

$$E_0(t) = -K \cdot i = -K \cdot \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

□ $E_0(t)$ es una fuente de tensión proporcional a la corriente primaria. Está defasada en retardo $\pi/2$ respecto a la corriente $i(t)$, con

$$K = \frac{N \cdot r^2 \cdot \mu_0}{2 \cdot R},$$

donde

□ el producto $K \cdot \omega$ representa la razón de transformación, y se expresa en voltios por amperio (V/A).

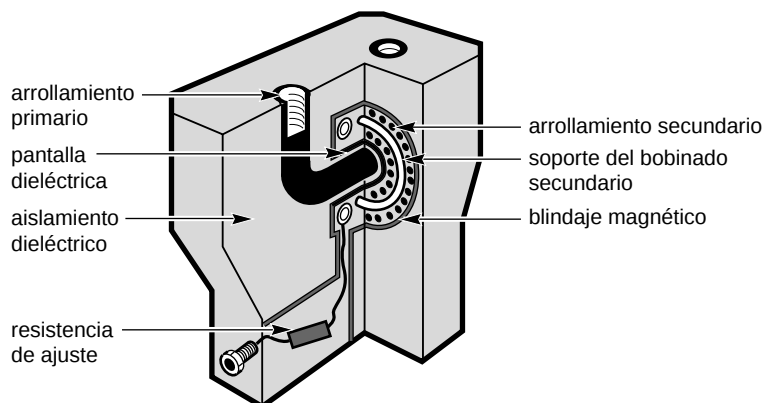


Fig. 11: Corte de un captador CS para AT-A.

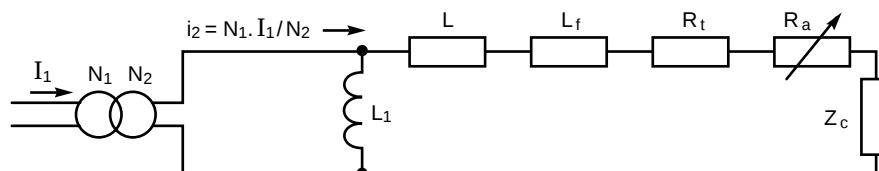


Fig. 12: Circuito equivalente de tipo TC de un captador CS.

4.2 Normalización

Hasta este momento no hay ninguna norma internacional o nacional que regule este tipo de captador. Así, los captadores CS actualmente comercializados satisfacen la norma CEI 185 salvo para los parámetros que se refieren a la señal secundaria que alimenta unidades de protección y de control-mando perfectamente especificadas. Estas unidades, con tecnología basada en el uso de microprocesadores, mediante una configuración simple hecha con un

teclado o un display, permiten realizar un conjunto de funciones (protección, medida, automatismo y comunicación) adaptadas a cada instalación.

Nota:

Actualmente estos captadores CS y las unidades de protección y control-mando SEPAM están diseñadas y comercializadas por un único constructor (Merlin Gerin).

4.3 Funcionamiento en régimen permanente y transitorio

Puesto que los captadores CS no tienen circuito magnético, no están sometidos a los fenómenos de saturación y flujo remanente. Por este motivo son perfectamente lineales, dando en el secundario una imagen casi perfecta del primario tanto en régimen permanente como en transitorio del primario.

Las tolerancias de fabricación de las dimensiones del soporte del bobinado y de número de espiras (varios miles) se compensan mediante una resistencia (R_a) de ajuste.

Ecuaciones

El diagrama vectorial (figura 14) se establece a partir del esquema equivalente de la figura 13. Este diagrama permite obtener las relaciones siguientes:

$$U(t) = E_0(t) - (R_a + R_t + jL \cdot \omega) i_2(t)$$

con

$$i_2(t) = U(t)/Z_c.$$

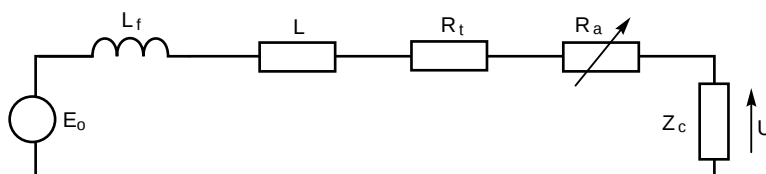


Fig. 13: Esquema equivalente con generador de tensión de un captador CS.

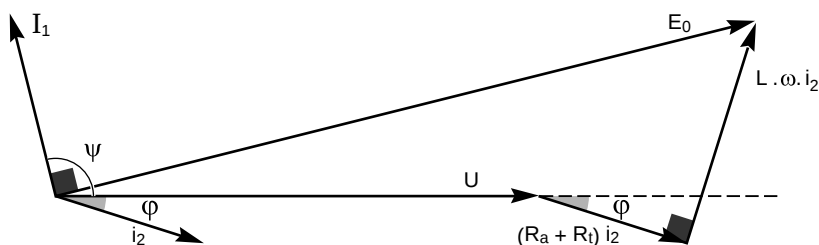


Fig. 14: Diagrama vectorial de un captador CS.

Análisis de errores

■ error de relación y de fase

La imagen perfecta de la corriente primaria para un captador CS es el vector E defasado $\pi/2$ en retardo respecto a la corriente I_1 ; es decir, en fase con E_0 sobre la **figura 15**. El módulo de este vector viene dado por la expresión $E = K_1 \cdot I_1$ constante que representa la razón de transformación a una frecuencia dada.

Como todos los captadores, la señal secundaria de los captadores CS está afectada por un error. Este error que se define como el vector que representa la diferencia de los vectores E y U , corresponde al vector ε_{net} en el diagrama de la **figura 15**.

Este error queda minimizado, al final del proceso de fabricación, mediante el ajuste del potenciómetro R_a a un valor que da un vector de error $\varepsilon_{(\text{reg})}$ mínimo. Este ajuste del captador se adapta a las entradas de corriente de las unidades de protección y de control-mando para las que ha sido diseñado. El valor máximo de este vector error se ha fijado en el 1% del valor del vector de referencia para toda la corriente primaria comprendida entre 0,2 y 10 veces la corriente primaria asignada, y en el 5% para una corriente de 200 veces la corriente primaria asignada.

Con estos errores máximos los captadores CS de una misma relación de transformación son perfectamente intercambiables y son prácticamente idénticos en términos de precisión (**figura 16**) con los TC de clase:

- 0,5 para la medida,
- 5P para la protección.

■ linealidad

El captador CS es lineal:

$$e(t) = K \cdot \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varnothing)$$

Esta linealidad le proporciona muchas ventajas, especialmente:

□ la posibilidad de reducir la variedad de razones de transformación y así favorecer las posibilidades de estandarización. Las razones de transformación vienen impuestas por la dinámica de la electrónica de la unidad de mando-control a la que el captador está asociado y por el nivel de discriminación requerido,

□ una buena respuesta en régimen transitorio. La ausencia de saturación, de histéresis y de flujo remanente permite a estos captadores tener una respuesta perfecta en régimen transitorio. Así, este tipo de captador se instala, sin precaución especial, en las redes en las que es necesario que las protecciones intervengan rápidamente durante los regímenes transitorios, especialmente en redes con una constante de tiempo larga o que tienen materiales de tipo blindado con aislamiento gaseoso (que tienen riesgo de explosión).

Influencias externas

En ciertas condiciones, la respuesta de estos captadores CS, como la de los TC, puede ser influenciada por el entorno.

■ una modificación de la carga secundaria de este tipo de captador implica una variación del error. Para atenuar estas variaciones, puesto que un CS es una fuente de tensión, hace falta que su carga puramente resistiva sea lo más elevada posible ($\geq 10 \text{ k}\Omega$).

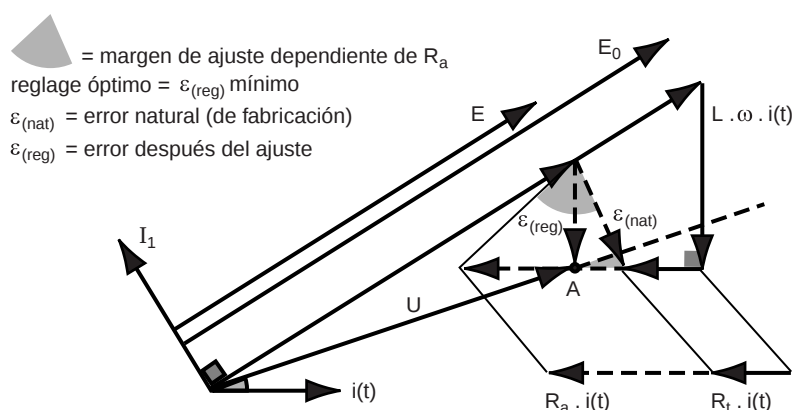


Fig. 15: Diagrama vectorial, con error, de un captador CS.

■ la frecuencia

La señal entregada por este tipo de captador es una función de la derivada de la intensidad primaria (ver principio físico). Para evitar la influencia de la frecuencia, hace falta que la del captador CS sea tratada por un amplificador integrador de precisión.

■ posición del conductor primario

El teorema de Ampère no hace referencia a la posición relativa de la corriente (conductor primario) y del contorno cerrado (bobinado secundario) a los que se aplica. Este comentario indica que el captador es teóricamente insensible a la posición relativa de sus componentes. Sin embargo, las imperfecciones de construcción del bobinado secundario pueden

hacerlo ligeramente sensible. Por tanto, en la instalación de captadores con primario no integrado (BT), hay que conseguir un ajuste muy fino del centrado y del ángulo azimutal relativo entre el primario y el secundario. Sin esta precaución se puede tener errores de hasta el 3%.

■ posición de los conductores próximos

Un conductor cercano recorrido por una corriente de otra fase o por una corriente de retorno a través de un bucle (**figura 6**) produce un campo magnético que se suma vectorialmente al creado por la corriente a medir, lo que modifica la respuesta del captador. Los captadores CS deben de estar protegidos contra este tipo de perturbación.

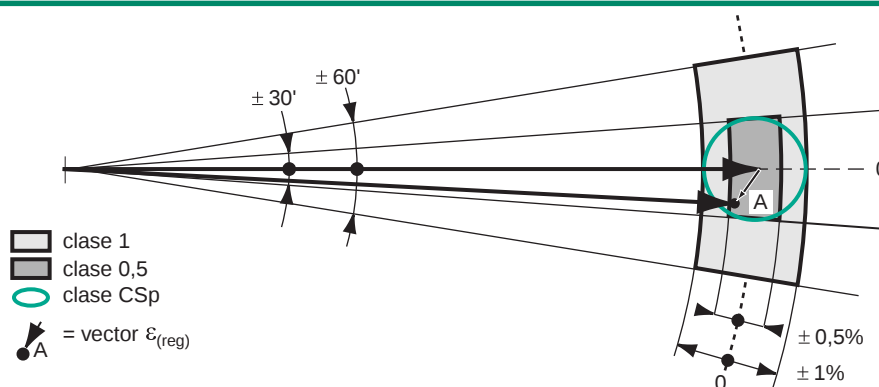


Fig. 16: Comparación de las precisiones de los captadores TC y CS.

El punto A sitúa el funcionamiento de un captador CS que cumple a la vez las exigencias de precisión de los TC de clase 0,5 y de los TC de clase 1.

4.4 Especificación de los captadores de intensidad con bobina Rogowski

Los captadores CS y las unidades de protección y control-mando los proporciona un mismo industrial. La especificación del CS es por tanto muy simple para el cliente final. No tiene que especificar, cómo debe de hacer con los TC, las características del secundario (corriente secundaria, potencia de precisión, clase de precisión y factor límite de precisión). Sólo le queda precisar:

- el nivel de aislamiento del captador, definido como para un TC,
- la corriente de cortocircuito térmico asignada (I_{th}) y la corriente dinámica I_{dyn} establecidas según las mismas reglas que en los TC,
- la gama de valores de utilización (corriente primaria asignada y corriente de calentamiento). Por ejemplo, hay cuatro márgenes de utilización (30-300, 160-630, 160-1600, 500-2500 A) con los CS fabricados por Merlin Gerin.

4.5 Comportamiento frente a la CEM

El captador CS tiene una baja capacidad de conexión primario-secundario (≈ 20 pF en AT-A). La presencia de pantallas, dieléctrica y magnética, puestas al potencial de masa, impide

la transmisión de perturbaciones conducidas (a partir de la red primaria MT) y radiadas. Por tanto, el conjunto CS, unidad de protección y de control-mando tiene un buen comportamiento en cuanto a la CEM.

5 Captadores híbridos

Las señales proporcionadas por los TC y los CS se utilizan directamente en las unidades de protección y de control-mando. Hay otros captadores de corriente cuya señal, antes de ser utilizada por estas unidades, debe de ser tratada electrónicamente: éstos son los captadores híbridos. Todos ellos tienen un diagrama semejante al de la **figura 17**.

Diagrama

Estos captadores pueden tener hasta 6 elementos:

■ elemento sensible primario

Utiliza los diversos efectos (óptico, electrónico y eléctrico) de los materiales sometidos al campo magnético que crea la corriente que hay que medir.

■ convertidor primario

Convierte el efecto utilizado por el elemento sensible en una señal que es función de la corriente primaria y la adapta al sistema de transmisión.

■ sistema de transmisión

Transporta a una distancia más o menos grande la señal emitida por el convertidor primario.

■ convertidor secundario

Transforma esta señal, representativa de la corriente primaria, en una señal eléctrica utilizable por las unidades de protección y de control-mando.

■ alimentación primaria

Proporciona la energía necesaria para el elemento sensible, para el convertidor primario y eventualmente para el sistema de transmisión.

■ alimentación secundaria

Proporciona la energía al convertidor secundario y eventualmente al sistema de transmisión.

En ciertos captadores, estas dos alimentaciones, primaria y secundaria, son una sola.

Los elementos sensibles

Durante estos últimos años, se han aplicado importantes programas de desarrollo a los captadores híbridos. En los elementos sensibles primarios se han aplicado diversos efectos del campo magnético y especialmente:

■ óptico

Utilización de los efectos del campo magnético sobre las características de la luz (captador óptico de corriente). La óptica puede utilizarse únicamente como sistema de transmisión a partir de un elemento primario sensible de cualquier tipo. Esta transmisión se hace mediante fibra óptica. La utilización de dispositivos que siguen la física de la luz (elemento sensible y sistema de transmisión) confiere al captador un aislamiento galvánico perfecto. Esta ventaja ha sido utilizada en muchos programas de investigación, algunos de los cuales han conducido a un captador de corriente de efecto Faraday.

■ electrónica

Influencia de un campo magnético sobre un semiconductor (captador de corriente de efecto Hall) y sobre un material ferromagnético (variación de la resistividad utilizada en los captadores de corriente magneto-resistentes).

■ eléctrica

El flujo creado en un circuito magnético por el campo magnético resultante de la corriente a medir es anulado por el flujo magnético provocado y regulado con la ayuda de una corriente auxiliar (transformador de corriente de flujo nulo).

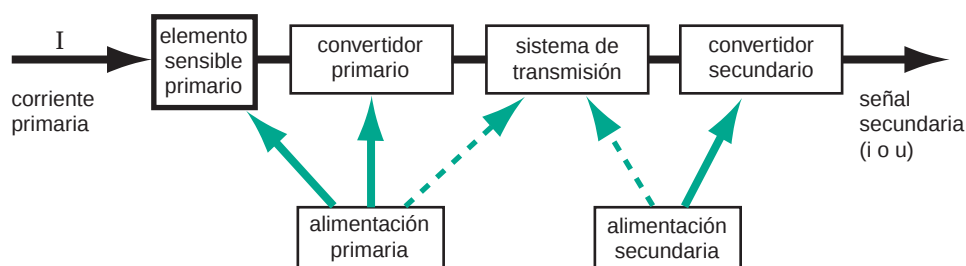


Fig. 17: Diagrama de los captadores híbridos.

5.1 Captadores ópticos de efecto Faraday

Para entender lo que sigue es necesario recordar algunos detalles de la física de la luz.

Repaso

■ polarización

Es un fenómeno propio de la propagación de las ondas, en especial las luminosas, caracterizadas por la dirección de vibración en un plano determinado, llamado plano de propagación, que contiene la dirección de propagación. Cuando este plano conserva una dirección fija en el tiempo, las ondas luminosas tienen una polarización lineal. Si gira alrededor de la dirección de propagación a una velocidad constante, la polarización es elíptica o, en ciertos casos, circular.

■ birrefringencia

Ciertas sustancias naturales poseen la cualidad de la birrefringencia. Esta cualidad consiste en que una luz plana que los atraviesa no se propaga a la misma velocidad según que su plano de polarización sea paralelo a una u otra de las dos direcciones perpendiculares propias del cuerpo birrefringente. La birrefringencia puede ser intrínseca (materiales anisótropos) o inducida por una causa:

- mecánica o efecto foto-elástico,
- eléctrica o efecto electro-óptico de Kerr o Pockels,
- magnética o efecto magneto-óptico de Faraday.

Efecto Faraday

En 1845 Michael Faraday descubrió que el plano de polarización de una luz polarizada gira al atravesar un trozo de cristal situado en un campo magnético y se propaga paralelo a este campo. El ángulo (F) de rotación de la polarización es proporcional a la circulación del campo magnético (H) y de la longitud del recorrido óptico (L) (**figura 18**).

$$F = V \cdot \int H \cdot dL$$

En esta ecuación V es una característica del medio óptico. Es la llamada constante de Verdet. Normalmente es pequeña y depende, en más o menos grado, de la temperatura. Puesto que el efecto Faraday es dispersivo, hay que utilizar una luz monocromática (de frecuencia única).

En la práctica

Este efecto se aplica con cristales o fibras ópticas; en los dos casos es necesario tener una fuente luminosa y tratar la información óptica para poder hacerla útil para las unidades de protección y de control-mando.

■ fuente luminosa

Normalmente es un diodo láser, monomodo, de una longitud de onda de unos 780 nanómetros, siendo la constante de Verdet máxima en esta parte del espectro de longitudes de onda.

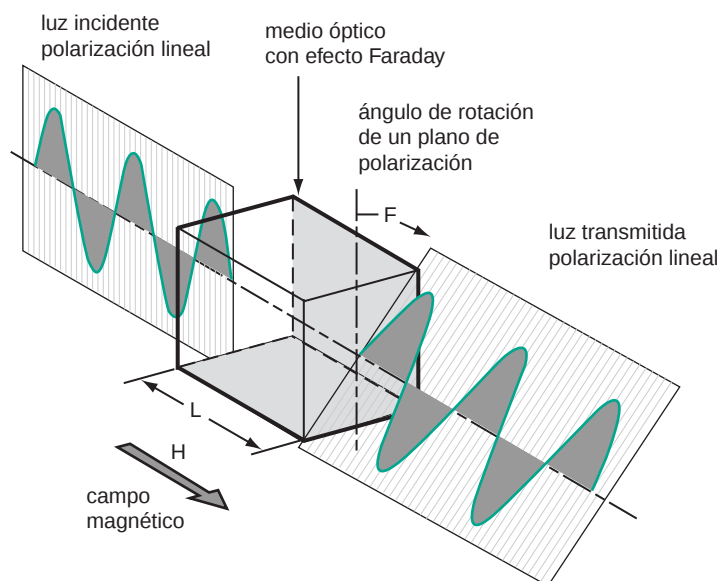


Fig. 18: Representación gráfica del efecto Faraday.

■ cristal óptico

Es posible utilizar uno o varios cristales que rodeen más o menos el conductor por el que circula la corriente a medir (**figura 19a**). En la configuración de campo óptico libre, que es generalmente el caso con cristales, los problemas de alineación mecánico-óptica son especialmente importantes.

■ fibra óptica

La técnica de óptica guiada utiliza como elemento sensible una fibra óptica monomodo que puede dar varias vueltas alrededor del conductor primario (**figura 19b**). En este caso la aplicación del teorema de Ampère permite escribir:

$$F = V.N.I$$

Esta técnica permite conseguir una sensibilidad muy grande.

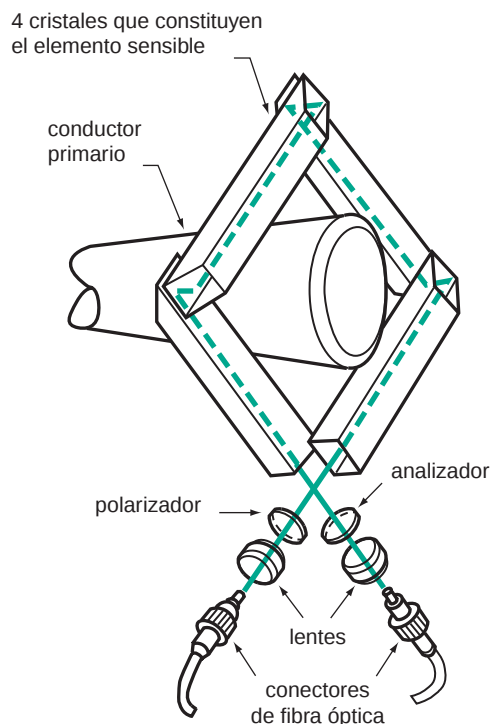
Los captadores de fibra óptica no son sensibles a las corrientes exteriores (conductores de retorno, otras fases, otros circuitos); en cambio, los captadores con cristales ópticos son más o menos sensibles, según su tecnología de fabricación.

Por el contrario, las características ópticas del elemento sensible (cristal o fibra) resultan particularmente afectadas por las variaciones de temperatura y los esfuerzos mecánicos.

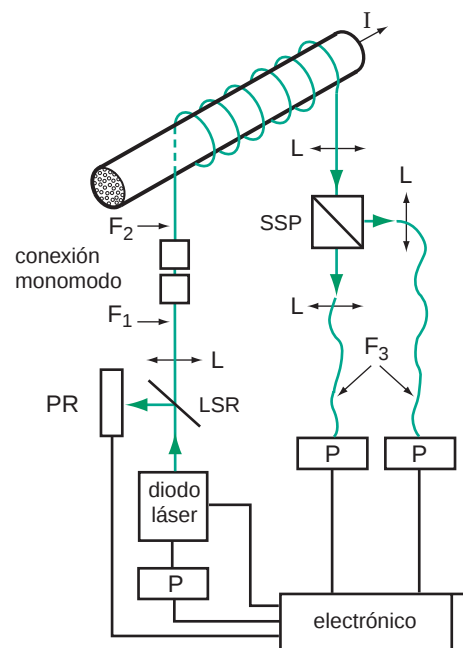
■ conversión de la señal óptica en eléctrica

Esta conversión se hace comparando los rayos luminosos emitidos y recibidos. Utiliza generalmente prismas polarizadores-separadores asociados a fotodiodos que transforman la señal luminosa en señal eléctrica analógica. A continuación, ésta última es tratada y amplificada para que pueda ser utilizable por las unidades de protección y control-mando.

a: vista de detalle de un captador de cristal óptico



b: esquema de un captador de fibra óptica



- LSR superficie semi-reflectante
- L lentes Selfoc
- F₁ fibra óptica para mantener la polarización
- F₂ sensor de fibra
- F₃ fibras ópticas multimodo
- I corriente a medir
- SSP sistema separador/polarizador a 45°
- P fotodiodos
- PR fotodiodos de referencia

Fig. 19: Captadores de corriente de efecto Faraday.

Precisión

Los captadores ópticos (de fibra o de cristal) son sensibles a las condiciones exteriores (temperatura, fuente de energía auxiliar). Por tanto, su precisión queda afectada.

- influencia de la temperatura

La temperatura influye sobre tres parámetros:

- la constante de Verdet V,
- la birrefringencia del medio óptico,
- la longitud de onda de la luz emitida por el diodo láser.

Para funcionar en las condiciones que se encuentran en las redes eléctricas, los captadores ópticos deben de estar compensados en temperatura (anexo 3 [5]). Esta compensación puede hacerse:

- por acción permanente sobre el elemento óptico sensible (doble torsión de la fibra, recorrido de ida y vuelta de la luz a través de la fibra, compensación térmica del cristal, etc. ...),
- manteniendo el diodo láser a una temperatura compatible con la precisión que se pretende,
- valorando la temperatura real de cada elemento en el proceso de adaptación de la señal de salida.

- influencia de los esfuerzos mecánicos

El cristal o la fibra óptica deben de tener un valor muy bajo de birrefringencia para no modificar la polarización de la luz en ausencia de campo magnético. Los esfuerzos mecánicos sobre el cristal o la fibra, debidos tanto a las variaciones de temperatura como a la instalación y explotación, no deben modificar esta tasa de birrefringencia.

- influencia de la electrónica de conversión de señal

El cristal y la fibra óptica son perfectamente lineales. Por el contrario, la electrónica de proceso de la señal está limitada en su funcionamiento, por una precisión determinada por:

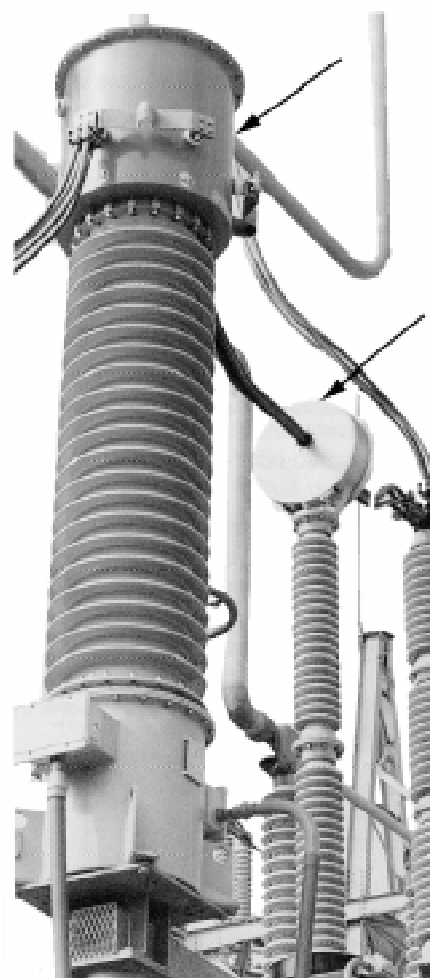
- su banda pasante,
- su aptitud para detectar el ángulo de rotación del plano de polarización hasta 2π , aunque las técnicas digitales de proceso de la señal permiten corregir este punto,
- las tensiones de alimentación de los componentes que constituyen el o los convertidores primarios y secundarios.

A pesar de todas estas dificultades, las técnicas actuales permiten fabricar captadores ópticos de corriente con una precisión comparable a la de los TC (figura 20).



a: de la gama de AT-A (Merlin Gerin):

- en primer plano, captador óptico con su conductor de fibra óptica enrollado,
- en según plano, un captador TC convencional equivalente, pero más voluminoso.



b: de la gama de AT-B (Square D):

- en primer plano, un TC convencional,
- en según plano, un captador óptico equivalente, pero menos voluminoso.

Fig. 20: Ejemplos de captadores ópticos.

Comportamiento frente a la CEM

Puesto que el aislamiento galvánico entre los circuitos (primario y secundario) es perfecto (sin capacidad de conexión) el comportamiento frente a la CEM (perturbaciones conducidas) de estos captadores es buena. Pero este comportamiento puede verse afectado por el de

los convertidores primario y secundario sensibles a las perturbaciones radiadas (blindajes, posiciones relativas, etc). Nótese que este aislamiento galvánico perfecto es, en cuanto a seguridad, una ventaja mayor para este tipo de captadores: suprime los riesgos de explosión que existe en AT-B con los TC con aislamiento de aceite.

5.2 Captadores de efecto Hall

Efecto Hall

Una plaqueta semiconductora recorrida por una corriente y colocada dentro de un campo magnético $\vec{B}$ desarrolla entre sus dos caras una diferencia de potencial, llamada de efecto Hall V_H , que responde a la relación:

$$V_H = K.i.B$$

donde K es el coeficiente de sensibilidad del captador.

Esta plaqueta constituye el elemento sensible del captador de corriente de efecto Hall.

Principio

La explicación del fenómeno de Hall supone que en una plaqueta larga (**figura 21**) provista de unos electrodos largos de inyección de corriente, i, todos los electrones sufren un desplazamiento uniforme a la velocidad $\vec{v}$ en sentido inverso a la corriente i. Cuando se aplica un campo magnético $\vec{B}$ perpendicularmente a una de las caras grandes de la plaqueta, los electrones de carga -e son desviados hacia una de las caras pequeñas contra la que se acumulan bajo la acción de las fuerzas de Laplace.

$$\vec{F} = -e.\vec{v} \wedge \vec{B}$$

El desequilibrio de cargas entre las dos caras pequeñas hace aparecer un campo eléctrico de Hall $\vec{E}_H$, que crece hasta que la fuerza $(-e.\vec{E}_H)$ se equilibra con la del campo magnético.

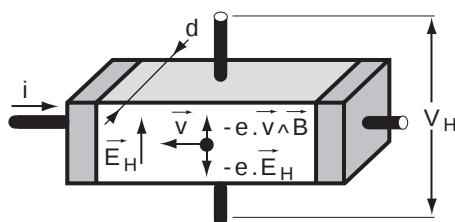


Fig. 21: Esquema teórico del captador de efecto Hall.

En estas condiciones, los electrones vuelven a tener un movimiento uniforme y el campo eléctrico de Hall se expresa:

$$\vec{E}_H = \frac{-\vec{B}.\vec{j}}{(N.e)}$$

donde:

N es el número de portadores de carga (-e) y $\vec{j}$

la densidad de corriente en la plaqueta, y por tanto, la tensión de efecto Hall:

$$\vec{V}_H = \frac{K.i.\vec{B}}{(N.e.d)}$$

En la práctica

Una solución práctica para mejorar la sensibilidad del captador es aumentar $\vec{B}$. Para conseguirlo el generador de Hall se coloca en el entrehierro de un núcleo magnético recorrido por el flujo de inducción debido al campo magnético creado por la corriente a medir (**figura 5**). La alimentación en corriente y el proceso de la señal se hace mediante componentes electrónicos.

Precisión

La respuesta de un captador de efecto Hall no es perfectamente proporcional a B por tres factores:

- la tensión de offset,
- el error de linealidad,
- la fluctuación debida a la temperatura.
- la tensión de offset

Es una tensión de error ligada a la propia construcción del elemento sensible. Puede corregirse, para un margen de temperatura dado, mediante un convertidor secundario.

- error de linealidad

La presencia de un circuito magnético, incluso con un entrehierro relativamente importante,

introduce una no linealidad debida a fenómenos de saturación. La dinámica de este captador depende de las dimensiones del circuito magnético.

■ fluctuación debida a la temperatura

La temperatura influye de dos maneras:

□ por el coeficiente de sensibilidad K que varía alrededor de 0,01% por °C,

□ por los esfuerzos mecánicos que sufre el elemento sensible debido a las variaciones de temperatura.

La fabricación de un captador debe de tener presentes todas estas influencias y probar los componentes para tener y garantizar, en las condiciones de utilización especificadas, una precisión compatible con la aplicación prevista (medida, protección o las dos). De ahí el esquema funcional de la electrónica necesaria

para que este captador funcione correctamente (figura 22).

La banda pasante de estos captadores es relativamente ancha. Es posible medir corrientes continuas y corrientes alternas que tengan frecuencias del orden de 40 kHz. El ancho de la banda pasante de este tipo de captador depende de la tecnología del circuito magnético, de los componentes electrónicos y de la arquitectura utilizada para el tratamiento o proceso de la señal.

Comportamiento frente a la CEM

Sobre todo en AT, la ausencia de aislamiento galvánico entre el captador y los elementos electrónicos es un handicap importante. Por tanto, la CEM del conjunto (captador de efecto Hall, unidad de protección y de control-mando) puede no ser perfecta.

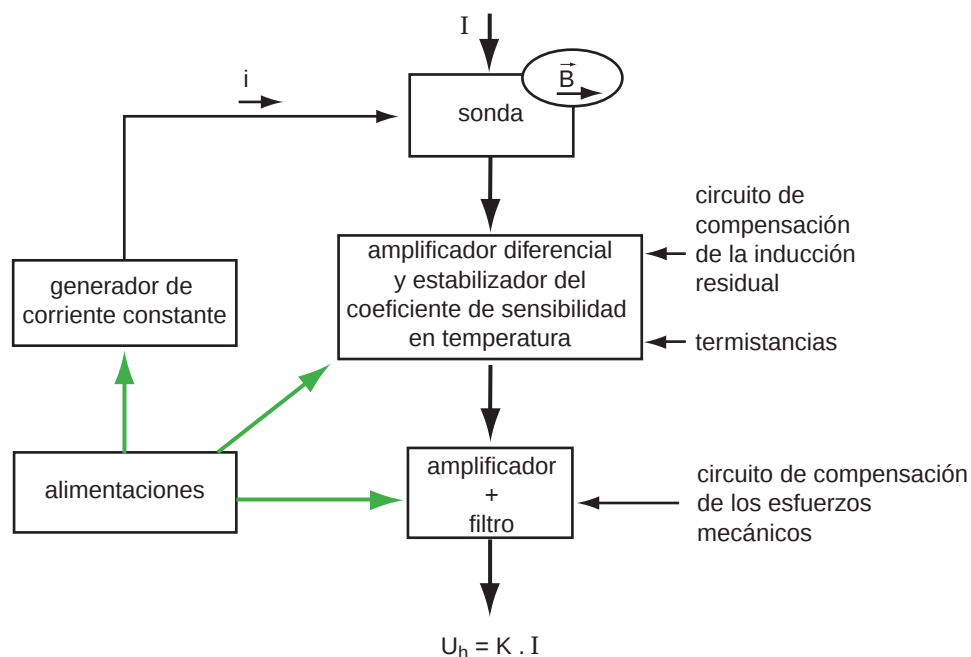


Fig. 22: Esquema funcional de la parte electrónica de un captador de efecto Hall.

5.3 Captador de corriente de flujo nulo

Principio

El elemento sensible es un circuito magnético (CM) (**figura 4**) en el que el flujo creado por la corriente a medir (I_1) es anulado por la corriente (I_2), cuyo valor es ajustado automáticamente por un amplificador electrónico de potencia (A) pilotado por la tensión de la sonda (SD) proporcional al flujo que circula por el núcleo magnético (CM). El flujo resultante en este núcleo es nulo, y por tanto es posible escribir:

$$I_2 = N_1 \cdot I_1 / N_2$$

siendo:

N_1 = número de espiras del arrollamiento primario,

N_2 = número espiras del arrollamiento secundario.

Precisión

La precisión de este sistema es muy buena. Las mesas de prueba de medida de errores de los transformadores de corriente utilizan este principio. Es posible limitar el error de módulo a valores muy bajos ($\approx 0,02\%$). Igualmente para el error de fase, que puede llegar a ser inferior a 0,1 minutos de ángulo (pero que depende de los circuitos electrónicos de anulación de flujo). Las prestaciones de un captador de este tipo dependen esencialmente de las prestaciones del amplificador tanto en cuanto a su margen de medida como a su precisión.

Nota:

Los transformadores de corriente de flujo nulo permiten medir corriente continua.

Comportamiento CEM

La señal de anulación del flujo casi a cero es fácilmente perturbable. Este tipo de TC debe de disponer de un entorno electromagnético muy protegido (pantallas, filtro de las alimentaciones, ...).

6 Tabla comparativa. Síntesis

■ malo ■ medio ■ ■ ■ bueno ■ ■ ■ ■ muy bueno	TC transformador de corriente convencional	CS captador con bobina Rogowski	captadores ópticos	transformador de corriente de flujo nulo
prestaciones:				
■ linealidad	■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■
■ fidelidad	■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
■ dinámica	■	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■
■ precisión	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■
■ CEM	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■
aptitudes:				
■ patrón de medida	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■ ■ ■
■ proporcionar energía a los equipos de protección y de control-mando	■ ■ ■ ■	■	■	■ ■
■ proporcionar la señal para medida a:				
□ contadores de energía analógicos	■ ■ ■ ■	■	■	■
□ contadores de energía digitales	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■	■
□ equipos digitales de protección y de control-mando	■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■	■
coste relativo respecto al de la aparamenta:				
■ en AT-A	■ ■ ■	■ ■ ■ ■	■ ■	■
■ en AT-B	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■
importancia de los captadores instalados al año:				
■ situación actual	■ ■ ■ ■	■ ■ ■	■	■
■ evolución previsible	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■	■

7 Conclusión y futuro

7.1 Soluciones actuales

Actualmente, la mayor parte de los equipos de protección y de control-mando en servicio utilizan tecnología electromagnética o electrónica. Necesitan señales de potencia suficiente (≈ 5 a 50 VA) para captadores de corriente normalmente situados aproximadamente entre 2 y 150 m.

En los equipos de AT, son los transformadores convencionales de corriente los que proporcionan esta energía.

Sin embargo, en AT-A hay varios centenares de unidades digitales de protección y de control-mando digitales en funcionamiento. La mayor parte, capaces de tratar señales de bajo valor energético, están asociadas a captadores CS. En AT-B se están probando captadores de efecto Faraday con cristales y fibras ópticas. Los TC de flujo nulo se utilizan sobre todo en bancos de control y en las redes de transporte en corriente continua.

7.2 Soluciones futuras

La rapidísima evolución de los sistemas de protección y de control-mando hacia tecnología digital ha llevado desde hace tiempo a modificaciones importantes de las especificaciones de los captadores. Estas especificaciones favorecen la CEM, la linealidad y los márgenes de utilización de los captadores.

■ CEM

Está ligada a la utilización cada vez más extendida de las tecnologías electrónicas. En este campo, el captador óptico presenta un comportamiento ideal.

■ linealidad

Los TC lineales (tipo TPZ) suelen ser voluminosos (presencia de entrehierro) y su linealidad no es perfecta. Al producirse un defecto, sobrecargan mucho térmicamente a los equipos a los que están conectados. El captador CS, puesto que tiene una linealidad perfecta, tiene prestaciones óptimas en este aspecto.

■ margen de utilización

Un TC tiene un margen de utilización muy reducido que limita su utilización a una sola aplicación. Por el contrario, los captadores ópticos y CS, cuyo margen de utilización es más amplio (≈ 10 veces) tienen unas posibilidades de empleo más amplias, sólo limitadas por los equipos a los que están conectados.

Por tanto, los captadores ópticos y CS son los mejores en cuanto a sus nuevas exigencias técnicas. Un captador híbrido que utilice una bobina Rogowski como elemento sensible y fibra óptica como elemento de transmisión podría ser la solución ideal.

En AT-A, esta solución todavía no es utilizable. Por el contrario, la solución CS, por su coste y por las ventajas que proporciona es una solución actual y para el futuro.

En AT-B la utilización de estos nuevos captadores depende del desarrollo de soluciones digitales para las unidades de protección y de control-mando o de la creación de interfaces digitales para las unidades existentes. En cuanto estos equipos estén disponibles, la evolución de estos captadores será muy rápida. Esta evolución ha empezado: ya se han propuesto sistemas o «todo óptico» o siguiendo la solución ideal antes propuesta.

Por tanto, a medio plazo, en AT, los TC convencionales, cuyas prestaciones están limitadas y cuyo coste es relativamente elevado, están llamados a desaparecer, excepto los destinados a los contadores de energía eléctrica para su facturación.

Anexo 1: Precisión de los TC según la CEI 185

Límites de error para los secundarios «de medida»

Valores de corriente expresados en % de la corriente asignada →	error de corriente (±) en %				defasaje I_2/I_1 (±)							
					minutos				centirradiantes			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
clase de precisión												
0,1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0,2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0,5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1,0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8

Límites de error para los secundarios «de protección»

clase de precisión	error de relación para las corrientes comprendidas entre I_n y $2I_n$, en %	defasaje para la corriente nominal minutos centirradiantes	error compuesto para la corriente límite de precisión en %
5P	± 1	± 60 ± 1.8	5
10P	± 3		10

Anexo 2: Clasificación de los TC según la CEI 44-6

En la tabla adjunta se indican las diversas clases de transformadores de corriente para protección, según sus prestaciones, definidas por la CEI 44-6.

Clase	Prestaciones
P	Límite de precisión definido por el error compuesto ($\widehat{\varepsilon}_c$) para una determinada corriente primaria simétrica en régimen permanente. Sin límite para el magnetismo remanente. Es también la clase del secundario de protección definido en la CEI 185.
TPS	TC con un bajo valor de fugas de flujo, cuyas prestaciones quedan definidas por los límites fijados por las características de excitación del arrollamiento secundario y por el error en la razón del número de espiras. Sin límite en cuanto al magnetismo remanente. Esta clase es similar a la clase X definida por la norma BS 3938.
TPX	Límite de precisión definido por el pico de error instantáneo ($\widehat{\varepsilon}$) durante el ciclo de funcionamiento en un régimen transitorio específico. Sin límite para el magnetismo remanente.
TPY	Límite de precisión definido por el pico de error instantáneo ($\widehat{\varepsilon}$) durante el ciclo de funcionamiento en un régimen transitorio específico. El magnetismo remanente no debe de exceder del 10 % del flujo de saturación.
TPZ	Límite de precisión definida por el pico instantáneo de la componente alterna de la corriente ($\widehat{\varepsilon}_{ca}$) durante un único paso de la corriente que presenta la componente aperiódica máxima, teniendo la constante de tiempo del bucle secundario un valor específico. Sin ninguna exigencia en cuanto al error límite sobre la componente aperiódica de la corriente. El magnetismo remanente debe de ser despreciable.

Bibliografía

[1] Techniques de l'ingénieur: Transformateurs de mesure. D 4720 12-1990, D 4722 12-1990, D 4724 3-1991, R1016 10-1992.

[2] CEI 44-6: Primera edición 1992-03: Transformadores de medida.
Parte 6: Prescripciones que se refieren a los transformadores de corriente para protección, para respuesta en régimen transitorio.

[3] CEI 185: Segunda edición 1987 y su modificación 1 1990-07: Transformadores de corriente.

[4] Méthode rapide de prédétermination des transformateurs de courant. Pierre SCHUELLER (Merlin Gerin) pág. 41 a 45, RGE nº 4, Abril 1990.

[5] Techniques de l'ingénieur: Capteurs de courant à fibres optiques. R 1016 10-1992.

[6] La CEM: la compatibilidad electromagnética. Cuaderno Técnico nº 149. F. VAILLANT.

[7] El transformador de corriente para la protección en AT. Cuaderno Técnico nº 164. M. ORLHAC.