



n° 170

**des transformateurs
de courant aux
capteurs hybrides,
en HT**

Christian Teyssandier

**Entré chez Merlin Gerin en 1962,
il est diplômé ingénieur INPG
- Institut National Polytechnique
de Grenoble - en 1967.**

**Jusqu'en 1974 il travaille les
problèmes de magnétisme pour
le moteur linéaire. Il occupe
ensuite différents postes à
responsabilités techniques dans
le domaine des condensateurs
de puissance haute, moyenne et
basse tension.**

**Puis en 1983, il devient chef de
projet de l'activité
transformateurs de mesure
moyenne tension.**

**En 1992, il rejoint l'activité
Anticipation de la Division
Moyenne Tension de
Merlin Gerin.**

lexique

capteur hybride :

capteur de courant ou de tension qui comprend au moins un élément sensible à la grandeur à mesurer, couplé à un système électronique délivrant un signal secondaire (courant ou tension), image en module et en phase de la grandeur primaire.

CEM :

compatibilité électromagnétique, c'est la capacité d'un dispositif à fonctionner correctement dans son environnement électromagnétique sans générer de perturbation intolérable pour quoi que ce soit dans cet environnement (cf. Cahier Technique n° 149)

biréfringence :

les matériaux dont l'indice de réfraction dépend à la fois de la direction de propagation, de l'état de polarisation, et aussi de la fréquence de l'onde lumineuse sont dits anisotropes ou biréfringents.

Remarque

Les niveaux de tensions font l'objet de différents classements selon les décrets, les normes, et autres spécifications particulières telles celles de certains distributeurs d'énergie, ainsi en ce qui concerne les tensions alternatives supérieures à 1 000 V :

■ le décret français du 14 novembre 1988 définit deux domaines de tension :

HTA = $1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$,

HTB = $U > 50 \text{ kV}$.

■ le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) dans sa circulaire du 27 juillet 1992 précise :

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

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

■ la publication CEI 71 précise des gammes de tensions les plus élevées pour le matériel :

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

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

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

Une révision est prévue, elle retient seulement deux gammes :

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

gamme II = $U \geq 245 \text{ kV}$.

■ le distributeur national d'énergie en France, EDF, utilise maintenant le classement du décret cité ci-dessus.

des transformateurs de courant aux capteurs hybrides, en HT

sommaire

1. Introduction		p. 4
2. Généralités	Fonctions des capteurs	p. 4
	Évolution des capteurs	p. 5
	Les grandeurs à mesurer	p. 5
	Les différents types de capteurs de courant	p. 6
	La normalisation	p. 7
3. Transformateur de courant	Utilisation	p. 9
	Normalisation	p. 9
	Spécification d'un TC	p. 10
	Applications particulières	p. 12
	Comportement en CEM	p. 13
	Un risque particulier	p. 13
4. Capteur de courant à bobine de Rogowski	Fonctionnement	p. 14
	Normalisation	p. 15
	Fonctionnement en régime permanent et transitoire	p. 15
	Spécification des capteurs de courant à bobine de Rogowski	p. 16
	Comportement en CEM	p. 16
5. Capteurs hybrides.	Capteurs optiques à effet Faraday	p. 17
	Capteurs de courant à effet Hall	p. 19
	Capteur de courant à flux nul	p. 21
6. Tableau comparatif, synthèse		p. 21
7. Conclusion et avenir	Les solutions du présent	p. 22
	Les solutions de l'avenir	p. 22
Annexe 1 : précision des TC selon la CEI 185		p. 23
Annexe 2 : classement des TC selon la CEI 44-6		p. 24
Annexe 3 : bibliographie		p. 24

Les évolutions technique et technologique des équipements de protection et de contrôle-commande mis en œuvre dans les réseaux de distribution d'énergie électrique nécessitent une évolution parallèle de leurs sources d'informations que sont les capteurs de courant et de tension.

Ce Cahier Technique traite principalement des capteurs de courant pour les applications moyenne tension.

Après quelques rappels sur les besoins d'informations et sur les transformateurs de courant, ce document présente les nouveaux capteurs hybrides et en particulier ceux conçus à partir d'une bobine de Rogowski. Il démontre simultanément les avantages et inconvénients de toutes ces solutions selon leur domaine d'emploi.

1. introduction

La bonne exploitation et la sécurité des réseaux électriques de distribution d'énergie, depuis la centrale électrique de production de l'énergie jusqu'au point d'utilisation, se font par l'intermédiaire d'équipements de protection et de contrôle-commande qui exigent la connaissance permanente des deux grandeurs électriques fondamentales que sont le courant I et la tension U .

La connaissance de ces deux grandeurs comporte plusieurs aspects :

- nature du courant (continu ou alternatif) ;
- niveau de tension (basse tension - BT -, haute tension - HTA et HTB -) ;
- évolutions transitoires de ces grandeurs liées aux changements d'état intervenant naturellement ou accidentellement dans l'exploitation d'un réseau électrique.

Plusieurs phénomènes physiques peuvent être mis en application pour la mesure des courants alternatifs. Ces différentes méthodes conduisent à des niveaux de performances qui sont

eux-mêmes plus ou moins compatibles avec celles requises par les différents niveaux de protection, d'exploitation et de sécurité recherchés.

Pour aboutir à la meilleure spécification possible des capteurs à installer sur un réseau il faut pouvoir évaluer leurs performances. La connaissance du fonctionnement des différents types est nécessaire pour faire cette évaluation.

2. généralités

fonctions des capteurs

Les capteurs ont trois fonctions essentielles :

- fournir une image juste et aussi fidèle que possible de la grandeur électrique à mesurer ;
- assurer une séparation entre les réseaux de puissance et les réseaux de mesure, de protection et de contrôle-commande ;
- assurer, soit une interchangeabilité entre les moyens de mesure, de protection et de contrôle-commande, soit répondre à une spécificité de ces mêmes moyens.

Fournir une image juste et fidèle

A partir des deux grandeurs caractéristiques de tout réseau électrique que sont le courant et la tension, les équipements de mesure, protection et de contrôle-commande élaborent un certain nombre de paramètres tels que : $\cos \varphi$, dépassement de seuil, puissance instantanée,...

Il faut donc pour plusieurs raisons (financière, sécurité, sûreté d'exploitation) que les signaux délivrés par les capteurs alimentant ces équipements soient justes et fidèles :

■ juste

Un capteur est juste s'il donne, dans des conditions spécifiées, un signal x_2 identique, à un facteur de mesure près, à celui qui sert à mesurer x_1 .

$$x_1 = k \cdot x_2$$

avec k = facteur de mesure.

■ fidèle

Un capteur est fidèle si le facteur de mesure k est indépendant du temps et des conditions d'emploi, pourvu que celles-ci restent dans les valeurs spécifiées :

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

$$\text{et à } t_2 \quad x_1 = k_2 \cdot x_2$$

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

alors le capteur de mesure n'est pas fidèle.

Plus avant dans ce Cahier Technique il sera donné des exemples de capteurs qui ne sont ni justes ni fidèles dans certaines conditions de fonctionnement, notamment en période de régime transitoire, qui diffèrent des conditions spécifiées.

Le rapport de transformation, ou plus généralement le facteur de mesure, permet d'adapter le signal à mesurer aux performances de l'appareil qui sert à mesurer, analyser et traiter ce signal.

Les équipements de mesure, de protection et de contrôle-commande, qui utilisent des grandeurs d'entrée de faible niveau, ne peuvent pas accepter les perturbations existantes sur les réseaux de puissance auxquels ils sont connectés par l'intermédiaire des capteurs de mesure.

Séparer le réseau de puissance du réseau de mesure, de protection et de contrôle-commande

Les réseaux électriques sont le siège de perturbations électriques et électromagnétiques importantes et particulièrement sévères dans les postes à haute tension. Ces perturbations sont liées aux manœuvres d'appareillages (sectionneurs, interrupteurs, disjoncteurs et contacteurs), aux décharges atmosphériques auxquelles sont exposées les lignes aériennes et à l'apparition ou la suppression des défauts sur les réseaux d'exploitation.

Ces perturbations se superposent localement et temporairement aux grandeurs nominales du courant et de la tension en entraînant des perturbations de ces grandeurs.

La transmission de ces perturbations au secondaire des capteurs doit être compatible avec les niveaux d'isolement et d'impédance d'entrée des équipements qui constituent le réseau de mesure, de protection et de contrôle-commande. Le niveau de cette transmission est le résultat d'un isolement galvanique plus ou moins parfait entre circuit primaire et circuit secondaire des capteurs. Le facteur de transmission est fonction :

- des technologies de réalisation des capteurs ;
- et des phénomènes physiques retenus (pour effectuer la mesure), certains conduisant à un facteur quasiment nul.

Ainsi, l'isolement galvanique joue un rôle essentiel dans le comportement en CEM -Compatibilité électromagnétique- des différents types de capteurs.

Le comportement en CEM sera traité pour chaque type de capteur présenté dans ce Cahier Technique. Il dépend aussi des équipements associés, car les capteurs servent à l'adaptation au réseau de puissance des différents moyens de mesure, de protection et de contrôle-commande.

Interchangeabilité et satisfaction des spécificités des appareils «alimentés» par les capteurs

Les équipements de mesure, de protection et de contrôle-commande ont fortement évolué durant les années 80. Cette évolution n'est pas encore terminée. De ce fait, il est possible de rencontrer dans un même tableau électrique trois technologies pour ces équipements.

■ électromécanique

C'est la technologie la plus ancienne. Elle utilise les effets électromagnétiques des grandeurs électriques. Ce principe nécessite, de la part des capteurs, la fourniture d'une énergie importante. De l'ordre de 15 VA en fonctionnement normal et pouvant atteindre ponctuellement 3 400 VA lors d'un défaut sur le circuit primaire du capteur.

■ électronique analogique

Cette technologie plus récente est apparue avec le développement intensif des semi-conducteurs. L'énergie nécessaire à ce type d'équipement est beaucoup plus faible, de l'ordre de 1 VA en régime normal et 225 VA lors d'un défaut. Il devient alors

possible d'avoir plusieurs relais de protection connectés sur une même sortie de capteurs.

■ électronique numérique

A base de microprocesseurs, c'est la technologie d'aujourd'hui, elle est toujours en cours d'évolution. L'énergie requise par cette technologie est très faible, de l'ordre du mVA (0,001 VA) en régime normal et 0,25 VA lors d'un défaut. De ce fait, généralement, les capteurs peuvent n'offrir qu'une seule sortie de très faible puissance suffisante pour alimenter l'unité de protection et de contrôle-commande qui leur est associée ; dans certains cas et en particulier pour les protections différentielles (zone, jeux de barres, transformateur,...) les capteurs doivent présenter au moins deux sorties.

Ces évolutions n'ont pas encore été entièrement prises en compte par la normalisation des capteurs. Celle-ci ne permet pas aujourd'hui de profiter complètement de tous les avantages qu'offrent les technologies à base de microprocesseurs et les capteurs développés dans les années récentes. Cependant il apparaît sur le marché, notamment en HTA et en HTB des chaînes de mesure, de protection et de contrôle-commande bénéficiant de ces évolutions. Ces équipements sont associés à des capteurs spécifiques réalisant une adaptation aussi parfaite que possible entre le réseau de puissance et la chaîne de contrôle-commande. Ces capteurs ne sont pas utilisables avec d'autres dispositifs de mesure, de protection et de contrôle-commande que ceux pour lesquels ils ont été développés.

évolution des capteurs

Outre le fait que les équipements modernes nécessitent moins d'énergie, l'évolution des capteurs dans les années récentes est surtout liée à trois besoins :

■ fiabilité

La recherche permanente de la continuité de service, la limitation des effets extérieurs en cas d'incident ont contribué à cette évolution.

■ justesse et fidélité

L'évolution des matériels de réseau, surtout en HTB avec l'apparition des matériels à isolement gazeux et la recherche de continuité de service, ont conduit au développement de capteurs

linéaires ou dits linéarisés. Ces capteurs rendent possible et sûre l'intervention des systèmes de protection et de contrôle-commande en période de régime transitoire.

■ coût

La bonne exploitation des réseaux dans le but d'améliorer la continuité de service, nécessite la connaissance des grandeurs caractéristiques de réseaux en de multiples endroits, d'où l'utilisation d'un nombre de capteurs de plus en plus grand. De ce fait le coût des capteurs devient donc un élément important.

les grandeurs à mesurer

Niveau de tension

C'est une caractéristique importante du réseau sur lequel seront installés les capteurs. De ce niveau de tension découlent les contraintes diélectriques qui serviront au dimensionnement des capteurs.

La CEI - Commission Electrotechnique Internationale - dans sa norme 71 définit la tension la plus élevée pour le matériel, U_m , comme la valeur maximale de la tension entre phases que le réseau peut prendre. A cette tension U_m sont associées, dans la même publication et dans les publications se rapportant aux capteurs de mesure, les contraintes diélectriques de tenue 50 Hz, de tenue à l'onde de choc 1,2/50 et le cas échéant la tenue aux ondes de manœuvre et aux ondes coupées.

Cette publication divise en trois gammes les valeurs normalisées de U_m :

- la gamme A, de 1 kV à moins de 52 kV,
- la gamme B, de 52 kV à moins de 300 kV,
- et la gamme C, de 300 kV et au-dessus.

La suite de ce Cahier Technique est essentiellement consacrée aux capteurs destinés aux réseaux de la gamme A.

Types de grandeurs

La gestion, la surveillance, la protection et la téléconduite de n'importe quel type de réseau électrique se font à partir des deux grandeurs tension et courant, caractéristiques de tout circuit électrique.

■ tension

La valeur nominale d'un réseau électrique HTA varie de quelques centaines de volts à quelques dizaines de milliers de volts. Les tensions de défaut sont généralement faibles et souvent voisines de zéro.

■ courant

La valeur nominale varie de quelques ampères à quelques milliers d'ampères. Les courants de défaut peuvent atteindre plusieurs dizaines de kiloampères.

Seuls les capteurs de courant seront examinés dans ce Cahier Technique : ils représentent la majorité des capteurs de grandeurs électriques dans un réseau. C'est en HTA que leur poids économique est le plus important... et doit donc être minimisé.

Pour cela il faut :

- d'une part, connaître les performances recherchées pour l'application à traiter et les spécifier le plus justement possible ;
- d'autre part connaître le fonctionnement et évaluer les performances des différents types de capteurs de courant.

Utilisation des grandeurs

Pour l'exploitation d'un réseau, ces grandeurs caractéristiques (tension et courant) sont utilisées par différents matériels. La connaissance de ces matériels permet de spécifier les caractéristiques du secondaire des capteurs de courant.

■ appareils de mesure

□ indicateurs de tableau, relativement peu précis, ils permettent une lecture de la valeur des grandeurs mesurées. A noter que l'affichage à aiguille tend de plus en plus à être remplacé par un affichage numérique intégré dans la chaîne de contrôle-commande.

Ce sont les ampèremètres, les voltmètres, les wattmètres, les fréquencemètres, etc. De classe 1,5 ou 3 leur association à un capteur de classe 1 est en général suffisante pour la fonction à remplir.

□ compteurs et enregistreurs, ils sont employés soit pour la facturation par les distributeurs d'énergie, soit pour la répartition des dépenses d'énergie entre les ateliers d'un même abonné. Ils sont d'une précision en général plus importante que les indicateurs précédemment cités. Pour la facturation, le capteur associé est

généralement de classe 0,5. Pour la répartition, la précision demandée est plus faible, et un capteur de classe 1 suffit habituellement.

■ relais de protection

De type modulaire, chaque élément a une fonction bien définie ; ces éléments sont souvent regroupés pour surveiller une portion de réseau électrique (cf. fig. 1). Les fonctions élémentaires les plus connues sont les protections :

- à maximum de courant phase (surcharge ou court-circuit),
- à maximum de courant homopolaire,
- directionnelle de courant (phase et homopolaire) ,
- différentielle de zone,
- de retour de puissance active,
- de retour de puissance réactive.

■ unités de protection et de contrôle-commande

Ce sont des ensembles intégrés, configurables ayant pour base un microprocesseur (cf. fig. 2). Les unités regroupent, au niveau des cellules (niveau 1 d'un système de gestion technique d'un réseau électrique), dans un très faible encombrement les diverses fonctions nécessaires à l'exploitation des réseaux électriques que sont :

- les mesures,
- les protections,
- les automatismes,
- les communications vers des niveaux supérieurs 2 (sous-station) ou 3 (poste de conduite).

A noter que les forts courants, comme les fortes tensions sont à éviter sur les circuits d'entrées de tous ces matériels. C'est le rôle des capteurs de courant et de tension que d'adapter le niveau des signaux à ces circuits d'entrées (mesure et/ou protection).

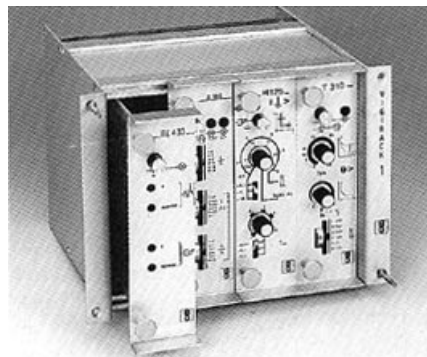


fig. 1 : relais de protection de type modulaire (Vigirack - Merlin Gerin).

les différents types de capteurs de courant

Les capteurs de courant se classent en trois grandes familles :

- les transformateurs,
- les capteurs spécifiques,
- les capteurs hybrides.

Transformateur de courant - TC -

Ce capteur comporte deux circuits électriques, un primaire et un secondaire, et un circuit magnétique. Il délivre un signal secondaire de même nature que la grandeur primaire à mesurer ; c'est une source de courant. Bien qu'il ne soit pas linéaire et que sa plage d'utilisation soit limitée par les phénomènes de saturation magnétique, c'est aujourd'hui le type de capteur le plus employé en HTA et HTB.

Un TC peut comporter plusieurs secondaires, chacun d'eux étant dédié à une fonction précise, mesure ou protection.

■ secondaire « mesure »

Sa plage de précision est étroite. Elle est généralement limitée à des courants égaux ou inférieurs au courant primaire assigné.

■ secondaire « protection »

Dans ce cas la plage de précision est très large. Elle atteint très souvent une à vingt fois le courant primaire assigné. La conception d'un tel secondaire est très différente selon le mode de fonctionnement, régime permanent ou transitoire, auquel il est destiné. Il est à noter que la plage de fonctionnement d'un TC est en général beaucoup plus étendue que la plage de précision, car elle doit tenir compte du courant de court-circuit.



fig. 2 : unité de protection et de contrôle-commande (SEPAM 2000 - Merlin Gerin).

Capteur spécifique - CS - ou capteur à bobine de Rogowski

Le principe de ce capteur a été décrit par Rogowski en 1912. Il se distingue des précédents par l'absence dans sa constitution de matériau ferromagnétique. Cette absence lui confère une parfaite linéarité dans une large plage de courant. Cette linéarité n'est pas affectée par les différentes fréquences présentes sur les réseaux HTA et HTB. Ce type de capteur associé à une impédance de charge Z , de forte valeur ($\approx 10 \text{ k}\Omega$ à 50 Hz), est une source de tension (cf. fig. 3).

Capteurs hybrides - CH -

La définition d'un capteur hybride donnée dans le lexique couvre plusieurs types de capteurs. Seuls les types les plus connus et les plus utilisés en HTA et HTB sont mentionnés ci-après.

■ capteur de courant optique

Son élément sensible est soit une fibre optique, soit un cristal optique. Dans les deux cas le principe de Faraday, découvert en 1845 par ce physicien, est utilisé.

■ transformateur à flux nul

Dans ce type de CH l'élément sensible est un TC dans lequel le flux créé par le primaire est annulé pour chaque enroulement secondaire par un enroulement auxiliaire (cf. fig. 4). Ce qui annule les méfaits de la saturation, mais ne peut être fait que dans une plage limitée de fonctionnement (courant et fréquence).

■ capteur de courant à effet Hall

Son élément sensible est une cellule de Hall (cf. fig. 5). Il permet de mesurer aussi bien des courants continus que des courants alternatifs. Utilisant généralement un circuit magnétique pour augmenter sa sensibilité, il est alors soumis à des phénomènes de saturation, comme un TC.

la normalisation

La normalisation existante, nationale ou internationale, ne concerne que les TC (transformateurs de courant). Des travaux sont en cours pour aboutir à une normalisation des capteurs hybrides -CH-. Les capteurs spécifiques ne sont pas encore concernés par de tels travaux.

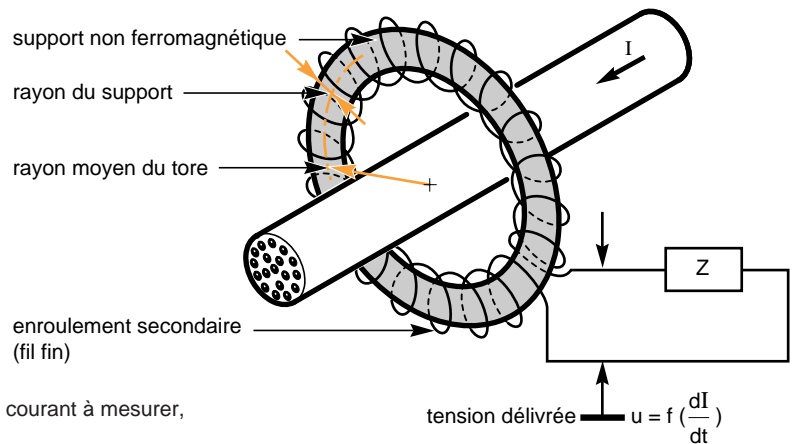


fig. 3 : schéma de principe d'un CS.

$I_1 =$ courant à mesurer,
 $I_2 =$ courant du circuit secondaire,
CM = circuit magnétique,
 $Z =$ impédance de charge généralement de faible valeur,
A = amplificateur de courant,
ES = enroulement secondaire,
SD = enroulement de détection de flux nul pilotant l'amplificateur A.

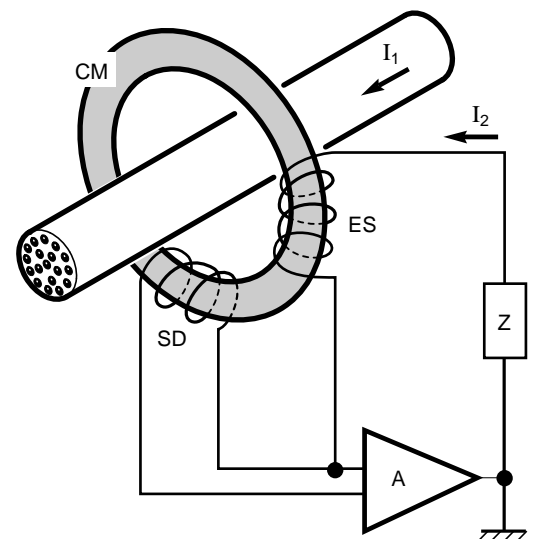


fig. 4 : schéma de principe d'un TC à flux nul.

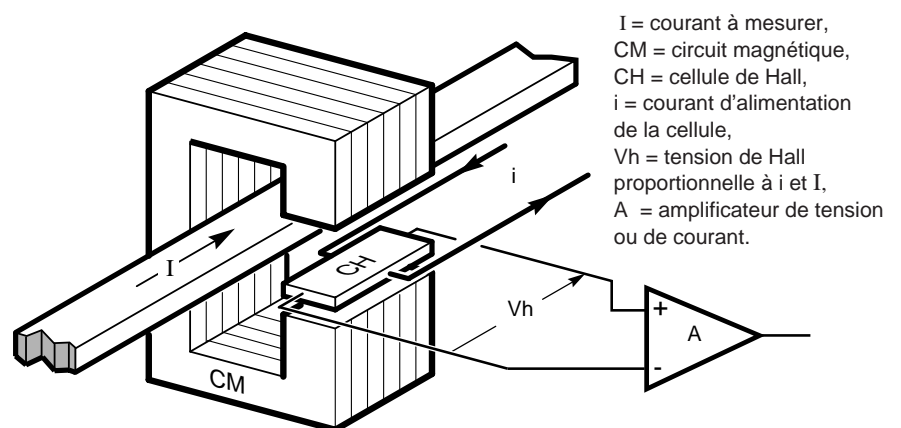


fig. 5 : schéma de principe d'un capteur de courant à effet Hall.

Normes nationales

Dans la CEE les normes nationales des différents pays, sont en cours d'harmonisation par l'intermédiaire du CENELEC. Cette harmonisation se fait sur les bases de la normalisation internationale éditée par la CEI.

Normes internationales

La CEI par l'intermédiaire du Comité d'Etudes N° 38 élabore les normes concernant les capteurs de courant et de tension.

Précision

A partir des normes existantes pour les TC, il est possible de définir un certain nombre de termes génériques pouvant s'appliquer à tous les types de capteurs. Ils sont regroupés, dans cette normalisation, sous le terme de précision. Ils permettent de spécifier et d'évaluer les performances et domaines d'utilisation des capteurs de courant.

■ rapport de transformation théorique. C'est le rapport entre les valeurs

efficaces assignées des grandeurs primaires et secondaires. Il est généralement noté K_n . C'est, pour les TC, un nombre sans dimension. Pour les CS ou CH il est souvent exprimé en Ampère (primaire) / Volt (secondaire).

■ erreur

Tous les capteurs ont des imperfections qui introduisent des distorsions dans la restitution du signal secondaire. Il existe en courant alternatif trois types d'erreur :

□ l'erreur de rapport : exprimée en pour cent, elle est calculée à partir de la différence qui existe entre les rapports de transformation réel et théorique (cf. annexe 1) ;

□ l'erreur de phase : habituellement exprimée en minute d'angle, elle donne, à π (TC) ou $\pi/2$ (CS) près, l'écart de phase qui existe entre le vecteur de la grandeur primaire et celui de la grandeur secondaire (cf. annexe 1) ;

□ l'erreur composée : exprimée en pour cent de la valeur efficace du courant

primaire, c'est en régime permanent, la valeur efficace de la différence entre :
- la valeur instantanée du courant primaire,
- et le produit du rapport de transformation assigné par la valeur instantanée du courant secondaire.

■ classe de précision

La classe de précision définit pour un capteur de courant les limites maximales des erreurs (de rapport et de phase) dans des conditions spécifiées.

■ charge de précision

Exprimée en ohms, avec un facteur de puissance spécifié, c'est la valeur de l'impédance raccordée aux bornes secondaires du capteur sur laquelle sont basées les conditions de précision.

■ puissance de précision

Exprimée en VA, c'est la puissance apparente que le capteur peut fournir à sa charge de précision, lorsqu'il est traversé par le courant primaire assigné.

3. transformateur de courant

Son principe (brièvement décrit au chapitre 2) lui confère des propriétés avantageuses, mais aussi gênantes dans certains cas, pour l'exploitation des réseaux.

Sa description technique ainsi que son comportement sont particulièrement développés dans le Cahier Technique N° 164, qui aborde principalement les problèmes liés au fonctionnement des installations électriques en régime permanent.

utilisation

En HTB, l'apparition des matériels blindés à isolement gazeux et la recherche d'une stabilité dynamique permanente des réseaux comportant des générateurs de forte puissance rendent nécessaire la prise en compte du fonctionnement pendant les périodes de changement d'état du réseau (régime transitoire).

Les phénomènes de saturation et d'hystérésis, sans surdimensionnement important des noyaux magnétiques des TC, font que la réponse en régime transitoire de ce type de capteur n'est ni juste ni fidèle. Il faut, en général, attendre la fin du régime transitoire pour obtenir une réponse juste. Ce temps d'attente, dans certains cas d'exploitation et de défaut, n'est pas toujours compatible avec la sécurité des matériels et des personnes. Il est parfois nécessaire de détecter le défaut lors de la première période du régime transitoire qui dans certains types de réseaux peut durer 200 ms (soit 10 périodes).

Justesse et fidélité sont aussi nécessaires en période de régime transitoire :

- en HTB, pour les matériels se trouvant près des centrales de forte puissance et sur les jeux de barres de poste important ;
- en HTA, au voisinage des sources, lorsqu'un réseau HTB de forte puissance est alimenté, soit par un transformateur à fort rapport de transformation (220 kV/ 20 ou 36 kV par exemple), soit par des générateurs de très forte puissance unitaire.

La normalisation actuelle permet, pour les TC et les deux cas de fonctionnement (permanent et transitoire) et à partir de conditions spécifiées, de bien évaluer les performances de ces matériels.

normalisation

Fonctionnement permanent

Les TC destinés à fonctionner suivant ce régime doivent satisfaire aux normes internationales, européennes et nationales.

- normes internationales.
CEI 185, deuxième édition de 1987 en cours de révision par le CE 38, elle concerne les TC de mesure et de protection de classe P (cf. annexe 2).

La révision en cours a pour objet principal la refonte des clauses concernant les caractéristiques diélectriques et l'adjonction d'un certain nombre de dispositions concernant uniquement les TC pour la HTB comme les efforts mécaniques sur les connexions, les perturbations radioélectriques.

- normes européennes
Cette normalisation, éditée par le CENELEC, est faite à partir des documents CEI. Pour les TC, en 1993, il n'existe pas encore de documents EN. Seuls les documents d'harmonisation (HD) sont en cours de discussion.

- normes nationales
Elles sont actuellement en Europe assez différentes les unes des autres. A l'avenir elles seront plus proches car elles devront toutes être conformes à la norme EN relative au TC pour fonctionnement en régime permanent.

- France
La norme NF C 42-502 (février 1974) est pratiquement conforme aux documents CEI et le sera à la norme EN à l'exception du mode de repérage des bornes secondaires.

Note :

Selon la Norme NF C 42-502 la borne secondaire reliée à la masse de l'installation est toujours repérée S2 ; elle est aussi la borne commune à tous les rapports dans le cas de TC à

plusieurs rapports de transformation obtenus par prises sur l'enroulement secondaire. Par ailleurs, la même norme précise que les enroulements destinés à la mesure doivent avoir un repère impair alors que les enroulements destinés à la protection seront repérés par un chiffre pair.

- Grande Bretagne
La norme BS 3938 (février 1973) est très proche de celle de la CEI et sera pratiquement conforme au document EN. Elle inclut en plus les enroulements classe X destinés à la protection. Ce dernier type permet une spécification plus précise des enroulements de protection. Cette classe pourrait être, dans un avenir proche, introduite dans les normes européennes EN.

- Italie
La norme CEI 1008 (Octobre 1987) (Comitato Electronico Italiano) est conforme à la CEI 185. Elle sera aussi conforme à la norme EN lors de sa publication.

- USA
La norme ANSI/IEEE C57 13 (1978) est assez différente de la CEI 185 et des normes européennes :
 - les classes et les puissances de précision ne sont pas définies dans les mêmes termes,
 - les repérages des bornes sont très différents,
 - et les appareils sont souvent plus encombrants.

Fonctionnement transitoire

Les grands distributeurs d'énergie ont depuis longtemps des spécifications d'entreprise concernant le fonctionnement des TC en mode transitoire.

De telles spécifications ont été, et sont encore, satisfaites par des fabrications spéciales. Elles font l'objet d'accords directs entre le constructeur et l'utilisateur.

- normes internationales.
Les prescriptions concernant les TC pour protection, pour une réponse en régime transitoire, sont maintenant données au niveau international par la norme CEI 44-6 (première édition 1992-03).

■ normes européennes et nationales. Il n'existe pas encore de telles normes. La norme européenne, en cours d'élaboration, sera très voisine de la CEI 44-6. Les normes nationales seront éditées par les différents organismes à partir du document EN.

spécification d'un TC

Les différents intervenants

L'utilisateur, le concepteur du réseau, le fabricant du système de protection et le fabricant des TC interviennent, à des niveaux différents, dans la spécification des TC, chacun ayant des préoccupations différentes.

■ le concepteur du réseau qui, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, a tendance à majorer les facteurs de dimensionnement liés au primaire du TC :

□ tenue thermique et électrodynamique représentée par les valeurs efficaces et de crête des courants de court-circuit à tenir pendant une durée généralement égale à 1 seconde.

□ durée du régime asymétrique en donnant des constantes de temps ou rapport X/R surestimés.

■ le fabricant de relaying qui aussi pour des raisons de sécurité de fonctionnement de son matériel, a tendance à spécifier des performances secondaires élevées.

□ puissance de précision en surestimant la valeur des impédances de liaison entre relais et TC ;
 □ classe de précision en demandant au TC de ne pas introduire d'erreur supplémentaire dans la chaîne ; alors qu'il serait peut être plus avantageux d'utiliser des équipements un peu plus précis et des TC de moins bonne précision, ce pour obtenir une précision globale identique.

Exemple : un appareil de mesure de classe 3 avec un TC de classe 0,5 donnent une précision globale de classe 3,5. Dans certains cas il est plus avantageux (financièrement) de prendre un appareil de classe 2 et un TC de classe 1 qui donnent, une précision globale de classe 3. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des faibles courants primaires et de fort courant de court-circuit.

■ le fabricant de TC qui essaie de concilier les différentes demandes, tout en tenant compte de ses propres

impératifs, afin de pouvoir satisfaire la demande. Le rapport I_{th} / I_n (tenue thermique 1s / $I_{primaire}$ assigné) donne une bonne idée sur la faisabilité du TC, et ce quelles que soient les performances secondaires demandées. Par exemple :

□ $I_{th} / I_n \leq 100$: le TC obtenu peut être considéré standard avec des performances secondaires normales.

□ $100 < I_{th} / I_n \leq 400$: le TC répondant à cette spécification est un TC dont la faisabilité est étudiée individuellement, ses performances secondaires sont **r é d u i t e s**.

□ $I_{th} / I_n > 400$: ce TC n'est pas toujours réalisable. Lorsqu'il l'est, ses performances secondaires sont très faibles.

Les grandeurs à spécifier

Pour fabriquer un TC, plusieurs grandeurs doivent être spécifiées.

Certaines de ces grandeurs ont des valeurs normalisées (cf. les normes citées dans le paragraphe normalisation).

Pour les TC devant avoir une précision spécifiée en régime transitoire il faut se rapporter, soit à la norme CEI 44-6, soit aux spécifications d'entreprises.

L'énumération ci-après ne concerne que les TC fonctionnant dans le cadre d'un régime permanent.

■ primaire

□ niveau d'isolement défini par trois tensions, la plus élevée du réseau (U_m), la tension assignée de tenue de courte durée à fréquence industrielle et la tension de tenue au choc de foudre ;

□ le courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}) et sa durée si elle diffère de 1 s ;

□ la tenue électrodynamique (I_{dy}) si sa valeur crête diffère de $2,5 I_{th}$;

□ le courant primaire assigné

Les règles de l'art de la profession veulent que le courant nominal du réseau sur lequel est installé un TC soit compris entre 40 et 100 % du courant primaire assigné du TC.

■ secondaire

La fonction, mesure ou protection, du secondaire doit être précisée. Elle entraîne des contraintes et des spécifications différentes. Dans les deux cas il faut spécifier le courant secondaire assigné (1 ou 5 A).

□ mesure

Il faut spécifier la puissance de précision (en VA) la classe de précision

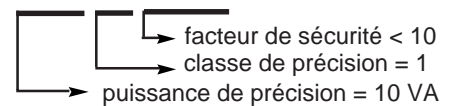
et le facteur de sécurité (FS) maximal généralement compris entre 5 et 10, très exceptionnellement inférieur à 5.

Note : Le facteur de sécurité est le rapport entre le courant primaire pour lequel l'erreur de rapport de transformation est supérieure ou égale à 10 %, et le courant primaire assigné.

Les différentes classes de précision et les contraintes en découlant sont données dans les différentes normes.

Pour les appareils de tableau une classe 1 est généralement amplement suffisante. La désignation usuelle d'un tel secondaire est faite comme ci-après.

10 VA C11 FS < 10

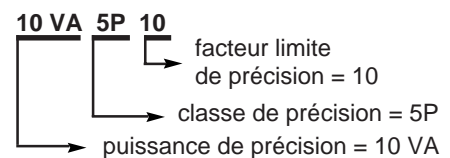


□ protection

Il y a deux manières de spécifier les enroulements destinés à la protection.

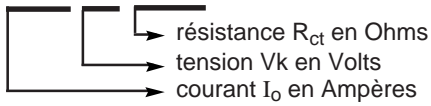
- Suivant la CEI 185 et les normes européennes : en spécifiant la puissance de précision (en VA), la classe de précision (5P ou 10P) et le facteur limite de précision (FLP).

La classe de précision donne l'erreur composée maximale admise sur le courant secondaire pour un courant primaire égal à FLP fois le courant primaire assigné (5P = 5 %, 10P = 10 %). Les caractéristiques et les contraintes associées aux différentes classes de précision sont données par les différentes normes. Les enroulements sont alors désignés comme suit.



- Suivant la BS 3938 : en spécifiant la valeur en volts de la tension d'excitation au coude de saturation (V_k), la résistance maximale de l'enroulement (R_{ct}) et le cas échéant le courant d'excitation maximal (I_o) pour la tension V_k . Dans ce cas les enroulements sont désignés comme suit.

0,050 150 R 0,50



Les imperfections des TC

Les imperfections magnétiques (saturation, rémanence, pertes par courant de Foucault et par hystérésis) sont, dans les TC, génératrices d'imprécisions : erreur de rapport et de phase, linéarité imparfaite, réponse dépendant des situations antécédentes... D'autres imperfections sont liées à l'environnement électromagnétique et électrique du TC.

■ phénomènes magnétiques
Saturation et hystérésis sont les deux principaux phénomènes «perturbateurs» : un TC saturé délivre un signal qui n'est plus sinusoïdal et sa précision ne peut plus être garantie (erreurs de rapport et de phase fortement amplifiées).

Ces phénomènes apparaissent :

- pendant un régime transitoire, par exemple fermeture d'un circuit sur défaut avec ou sans composante continue, l'état de saturation atteint dépend de l'état magnétique initial du circuit magnétique (présence plus ou moins importante d'une induction rémanente) ;
- en régime permanent de court-circuit si la valeur de celui-ci est supérieur à FLP fois le courant primaire assigné ;
- lorsque la valeur de la charge, à laquelle est raccordé le TC, est supérieure à sa charge de précision, cas des connexions de grande longueur ou des adjonctions d'équipements dans le circuit de charge d'un enroulement secondaire ;
- si la fréquence du réseau est inférieure à la fréquence assignée : l'utilisation en 50 Hz de TC ayant une fréquence assignée de 60 Hz provoque une augmentation d'induction de 20 % ; par contre une utilisation en 60 Hz de TC de fréquence assignée 50 Hz ne présente pas de risques.

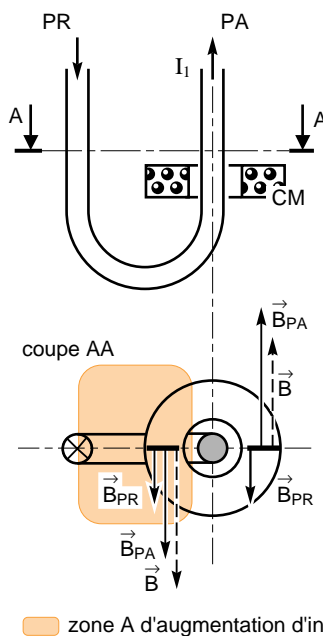
Le fonctionnement en régime saturé ne doit pas être maintenu. La saturation provoque des échauffements anormaux des constituants actifs du TC :

- du circuit magnétique, car les pertes par hystérésis et courants de Foucault deviennent importantes ;

- du bobinage secondaire, car les courants, bien que fortement déformés, sont aussi très grands.

■ phénomènes externes
□ positions du conducteur primaire et des conducteurs voisins.
Leurs géométries et leurs positions respectives peuvent altérer de façon non négligeable la précision des transformateurs de mesure. Ces

altérations sont dues à la non linéarité des matériaux ferromagnétiques. Le cas typique est celui des transformateurs de courant installés dans une boucle (cf. fig. 6) ou ceux installés en quinconce dans un jeu de barres (cf. fig. 7). Ces deux montages provoquent un accroissement localisé de l'induction d'où introduction d'une erreur.



Le conducteur de retour ou de la phase voisine (PR) crée un champ magnétique perturbateur dans le circuit magnétique (CM) ; ce champ s'ajoute vectoriellement à celui créé par le courant I_1 à mesurer du conducteur qui le traverse normalement (PA). Cette addition vectorielle conduit à une augmentation de l'induction dans la zone A.

Cet accroissement d'induction est fonction :

- du courant circulant dans le conducteur perturbateur,
- de la distance existant entre le circuit magnétique et ce courant perturbateur.

Il conduit alors à des saturations locales qui provoquent une augmentation de la valeur du courant d'excitation (I_e) et par conséquent des erreurs.

fig. 6 : schéma d'un TC traversant dont le circuit primaire est en boucle.

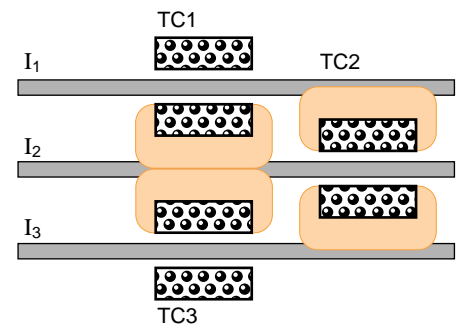
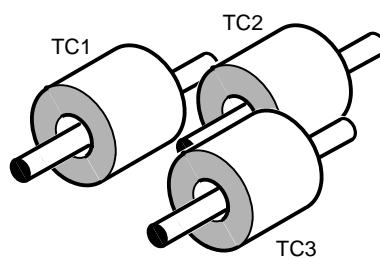


fig. 7 : schéma de trois TC traversants installés en quinconce dans un jeu de barres.

□ cycle de réenclenchements

Après coupure d'un courant de court-circuit primaire, le retour à la valeur de rémanence de l'induction dans le noyau magnétique du TC n'est pas instantané. La décroissance de cette induction se fait suivant une loi exponentielle ayant une constante de temps T_2 ; cette dernière est fonction du circuit secondaire, elle est généralement comprise entre une et trois secondes. Lors d'un réenclenchement rapide, il existe donc dans le circuit magnétique du TC, une induction rémanente qui s'ajoute vectoriellement à l'induction créée par le courant en cours d'établissement (cf. fig. 8). Si les deux inductions sont de même signe et si le TC n'a pas été dimensionné de façon à garantir une précision donnée en régime transitoire, il est fort probable que le signal secondaire délivré par ce TC ne soit en rien comparable au courant primaire le traversant.

■ précautions à prendre avec les TC

□ en régime permanent :

- le dimensionnement du TC doit être compatible avec l'usage auquel il est destiné.

- la somme des impédances d'entrée de tous les relais et/ou des appareils de mesure à laquelle il faut ajouter la valeur de l'impédance de filerie doit être inférieure ou au plus égale à

l'impédance de précision. Cette dernière s'obtient en divisant la puissance de précision assignée par le carré du courant secondaire assigné.

- les conditions d'installation ne doivent pas entraîner de saturation locale importante. Les installations en quinconce (cf. fig. 7) sont à proscrire.

□ en régime transitoire, pour les

secondaires de protection uniquement :

- dans le cas général des protections à temps constant, pour prendre en compte tout ou partie des phénomènes d'hystérésis, il suffit de vérifier que la valeur du courant de réglage d'intervention (de la protection) divisée par la valeur du courant secondaire assigné du TC, est inférieure à deux fois le facteur limite de précision du secondaire concerné.

- pour les protections à temps dépendant (différentielle, homopolaire, ...) s'assurer que la spécification du TC est conforme aux recommandations du fabricant des relais.

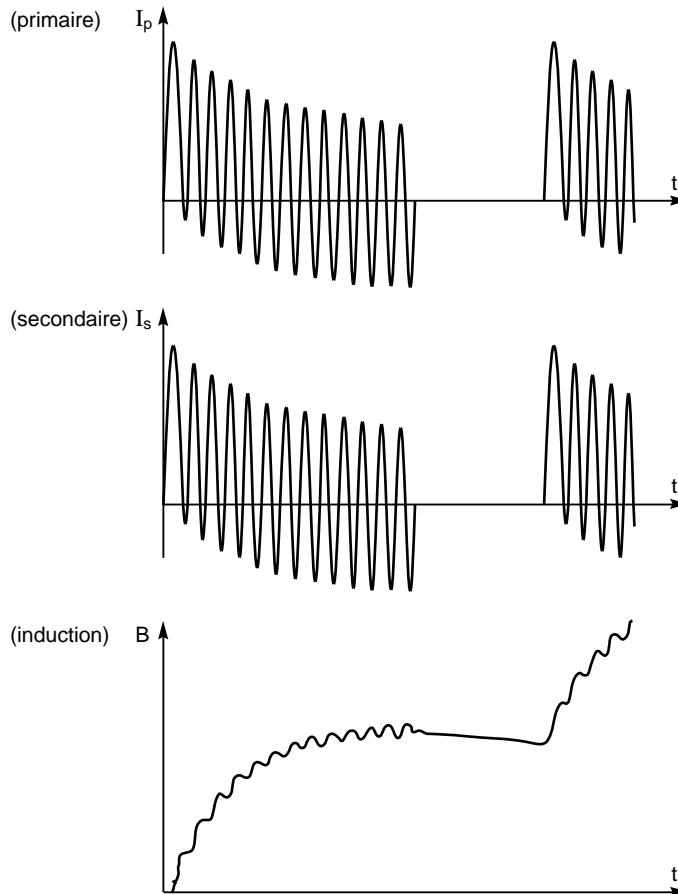


fig. 8 : évolution des courants et de l'induction dans un TC non saturé.

- si une réponse précise est nécessaire dans cette période de fonctionnement, il faut spécifier et concevoir les TC en respectant les différentes classes définies dans la CEI 44-6 (cf. annexe 1). Cette norme conduit toujours à un surdimensionnement important des TC.

La nécessité d'un flux rémanent faible (cas des réenclenchements) conduit à l'utilisation de circuit magnétique à entrefer. C'est ainsi que sont obtenus les TC dits linéarisés (cf. TPZ dans la norme CEI 44-6).

applications particulières

Mesure des courants différentiels résiduels

Dans les réseaux de distribution BT la protection des personnes se fait fréquemment par la surveillance de la valeur du courant différentiel résiduel. Cette protection

généralement assurée par un dispositif intégré au disjoncteur BT, est souvent autonome : l'énergie nécessaire à son fonctionnement est fournie par le TC de détection des courants différentiels résiduels.

Les performances demandées à ces TC nécessitent généralement des matériaux ferromagnétiques ayant une très grande perméabilité relative (μ_r), à base de nickel, donc coûteux. Il existe une méthode rapide de dimensionnement de ce type de TC (cf. annexe 3, bibliographie : article dans la revue RGE n°4).

Mesure du courant homopolaire (I_0)

C'est le courant résultant de la somme vectorielle des trois courants de phase d'un circuit triphasé. Cette somme peut être réalisée de deux façons.

■ par sommation des courants secondaires de trois TC (montage de Nicholson).

Pour cela il faut utiliser des TC de même rapport de transformation, en s'assurant que les connexions primaires et secondaires respectent bien les polarités (sens d'enroulement) des différents bobinages primaires et secondaires (cf. fig. 9).

Dans cette méthode deux phénomènes limitent les seuils de détection :

- en régime permanent, les différences d'erreur de rapport de transformation et de phase font que la somme vectorielle n'est pas nulle ; d'où un « faux courant homopolaire » qui peut ne pas être compatible avec les seuils désirés.

L'appariage des TC (en phase et en module) permet d'abaisser les seuils pratiques ;

- en régime transitoire, la saturation et l'hystérésis des circuits magnétiques provoquent le même défaut. Un surdimensionnement des TC repousse le seuil d'apparition du phénomène.

Ces solutions (appariage et surdimensionnement) ne permettent généralement pas la détection d'un courant I_0 inférieur à 6 % des courants de phase.

■ par sommation des flux

Pour pallier le manque de précision de la première méthode et contourner les contraintes qu'elle impose, il est possible de faire la mesure des courants I_0 par l'intermédiaire d'un TC torique unique ou « tore » : son circuit magnétique est traversé par les trois courants de phase I_1, I_2, I_3 du réseau triphasé (cf. fig. 10). Avec une conception adaptée (matériau ferromagnétique, dimension et charge de précision) et certaines précautions d'installation du tore (regroupement des câbles et centrage de ceux-ci, éventuellement utilisation d'un manchon ferromagnétique), cette méthode autorise la mesure de très faibles valeurs de courant I_0 , avec une bonne précision (erreur de module de l'ordre de 1 % et erreur de phase inférieure à 60 minutes d'angle) : quelques centaines de mA en HTA et une dizaine de mA en BT.

■ détection de défaut

Dans les réseaux de distribution HTA, l'emploi des détecteurs de défauts facilite la localisation rapide de ces derniers permettant ainsi une minimisation de la partie de réseau non alimentée et de la durée de la coupure.

La signalisation du passage du courant de défaut, donnée par ces détecteurs, peut être envisagée de deux manières :

- par voyants mécaniques ou électriques placés en des lieux d'accès aisés aux personnels chargés de l'exploitation (cas des postes MT / BT en réseau urbain ou rural souterrain).

- par télétransmission au centre d'exploitation pour les détecteurs de défauts placés sur les interrupteurs télécommandés des réseaux de distribution publique.

Ces détecteurs de défauts sont alimentés par des TC qui ne sont régis par aucune norme : ce sont les ensembles TC - détecteur de défaut qui sont spécifiés par les exploitants.

comportement en CEM

En HTA la CEM des TC peut être considérée comme satisfaisante.

En HTB les écrans répartiteurs de champ électrique plus ou moins parfaits, de présence obligatoire, peuvent conduire à une CEM non satisfaisante du TC.

La capacité de couplage existant entre les enroulements primaire et secondaire des TC participe à la transmission des perturbations du circuit primaire au circuit secondaire. La valeur de cette capacité est fonction de la tension d'isolement du TC, des caractéristiques du secondaire et de la technologie d'isolation employée.

Certaines spécifications d'entreprises, pour les tensions $U_m > 123$ kV donnent une valeur maximale du facteur de transmission des perturbations. Cette grandeur est mesurée au cours d'un essai de type décrit dans la spécification. L'introduction dans la normalisation internationale de cette notion est en cours de discussion au sein du CE 38.

un risque particulier

Il est dangereux d'ouvrir le circuit secondaire d'un TC.

Le flux d'induction magnétique circulant dans le noyau magnétique est la somme de deux flux de signes opposés : l'un résultant de la présence d'un courant primaire, l'autre de la présence du courant secondaire. L'annulation de ce dernier par ouverture du circuit secondaire augmente fortement le flux dans le noyau, provoquant une très

forte augmentation de la tension aux bornes du secondaire. Des tensions crêtes ou instantanées supérieures à 5 kV peuvent être atteintes. Ces tensions peuvent être mortelles pour les personnes et provoquer la destruction du matériel.

Conclusions pratiques :

- il ne faut en aucun cas ouvrir le circuit secondaire d'un transformateur de courant en service.

- toute intervention sur la charge d'un TC en fonctionnement doit être précédée par l'installation d'un court-circuit de très bonne qualité entre ses bornes secondaires.

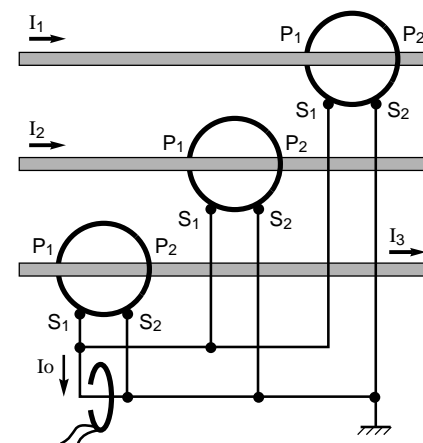
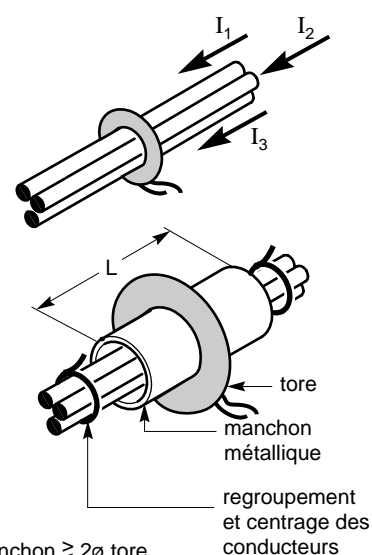


fig. 9 : raccordement de trois TC pour la mesure du courant homopolaire (montage de Nicholson).



L manchon $\geq 2\varnothing$ tore

fig. 10 : mesure du courant à l'aide d'un tore.

4. capteur de courant à bobine de Rogowski

Le principe de ce capteur de courant a été donné par ROGOWSKI en 1912. Ce type de capteur, noté par la suite capteur CS, est développé depuis 1986 de façon industrielle pour les réseaux HTA.

fonctionnement

Principe physique

L'application du théorème d'Ampère à une bobine de Rogowski (cf. fig. 3) montre que la tension apparaissant aux bornes d'une charge Z de très forte valeur est une fonction du courant $I = i(t)$.

Le courant I à mesurer crée localement, au niveau de chaque spire, une induction $b = \mu_0 \cdot h$, μ_0 étant la perméabilité du vide, le support de bobinage n'étant pas réalisé à l'aide d'un matériau ferromagnétique, et h le champ magnétique correspondant au courant I. Le flux embrassé par l'ensemble de la sonde a pour expression :

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

Si toutes les N spires sont de section identique et si leurs centres sont situés sur un même cercle de diamètre R pouvant être considéré comme très grand devant leur propre rayon r, il est alors possible d'écrire :

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

et par application du théorème d'Ampère :

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

La force électromotrice développée dans le bobinage s'écrit :

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

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

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

et

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

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

Composants électromagnétiques

Un capteur CS est constitué de cinq parties (cf. fig. 11).

- un enroulement primaire constitué par un seul conducteur en cuivre dont la section est déterminée par :
 - un courant primaire d'échauffement,
 - un courant de court-circuit assigné ;
- un support de bobinage secondaire généralement torique et constitué d'un matériau non ferromagnétique ;
- un enroulement secondaire, bobiné sur le support ;
- une résistance d'ajustage raccordée à l'enroulement secondaire ;
- un blindage magnétique protégeant le bobinage des possibles perturbations liées aux champs magnétiques extérieurs au capteur.

Composants diélectriques

- isolement diélectrique
- Comme pour les transformateurs de courant, le primaire et le secondaire d'un capteur CS sont isolés l'un de l'autre, par une résine diélectrique solide en HTA.

■ écran diélectrique

Dans le but d'améliorer le comportement en CEM du système, un écran diélectrique mis à la masse est placé entre le primaire et le bobinage secondaire.

Modélisation

De la même manière que pour les TC, pour l'étude du fonctionnement d'un CS il est pratique de concevoir et d'exploiter un modèle.

Le modèle proposé, par la suite, n'est valable que pour les fréquences industrielles. Dans le cas de fréquences élevées (plusieurs centaines de kHz) il faut introduire les capacités réparties du bobinage secondaire ainsi que les différentes capacités de couplages primaire-secondaire, primaire-masse et secondaire-masse.

Schéma équivalent

Il est possible de concevoir deux schémas équivalents :

- le premier (cf. fig. 12) s'inspire de celui des TC par la présence d'un transformateur idéal, avec :

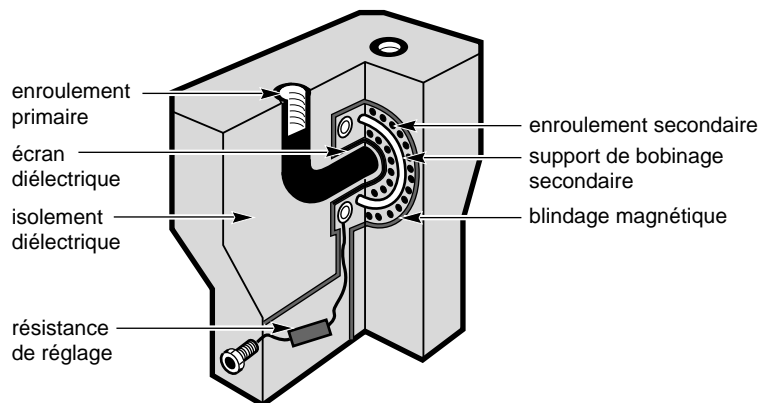


fig. 11 : coupe d'un capteur CS destiné à la HTA.

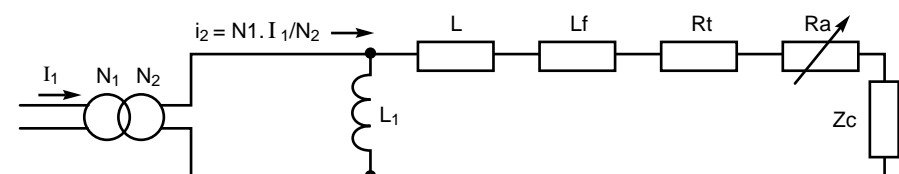


fig. 12 : schéma équivalent de type TC d'un capteur CS.

- L = valeur de l'inductance de la filerie de raccordement du capteur à sa charge M,
- Lf est l'inductance de fuite du bobinage. L'enroulement secondaire des capteurs CS est à spires jointives très bien réparties sur le support. Son inductance de fuite de très faible valeur peut donc être négligée,
- $L_1 \cdot \omega$ = impédance magnétisante du générateur de courant équivalent,
- Rt = somme des résistances du bobinage et du raccordement,
- Ra = résistance de réglage,
- Zc = impédance de la charge M à la fréquence considérée.

■ le deuxième (cf. fig. 13) inclut un générateur de tension découlant de l'étude théorique. C'est ce schéma qui sera utilisé par la suite.

Dans ce schéma équivalent :

$$E_0(t) = -K \cdot \omega \cdot I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

- $E_0(t)$ est une source de tension proportionnelle au courant primaire. Elle est déphasée en retard de $\pi/2$ par rapport au courant $i(t)$, avec

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

- le produit $K \cdot \omega$ représente le rapport de transformation, il s'exprime en Volt par Ampère (V/A).

normalisation

A ce jour aucune norme internationale ou nationale ne régit ce type de capteur. Aussi les capteurs CS actuellement commercialisés satisfont la norme CEI 185 sauf pour les paramètres concernant le signal secondaire qui alimente des unités de protection et contrôle-commande bien spécifiques. Ces unités sont d'une technologie à microprocesseur. Elles permettent par un simple paramétrage, à partir d'un clavier et d'un afficheur, de réaliser l'ensemble des fonctions (protection, mesure, automatisme et communication) adaptées à chaque installation.

Nota :

Actuellement ces capteurs CS et unités de protection et contrôle-commande SEPAM sont conçus et commercialisés par un seul et même constructeur (Merlin Gerin).

fonctionnement en régime permanent et transitoire

Les capteurs CS ne possèdent pas de circuit magnétique, ils ne sont donc pas soumis aux phénomènes de saturation ou de flux rémanent. De ce fait, parfaitement linéaires ils donnent au secondaire une image presque parfaite des régimes permanent et transitoire du primaire.

Les tolérances de fabrication sur les dimensions du support de bobinage et sur la valeur du nombre de spires (plusieurs milliers) sont compensées par une résistance (Ra) d'ajustage.

Equations

Le diagramme vectoriel (cf. fig. 14) est établi à partir du schéma équivalent de la figure 13. Ce diagramme permet d'obtenir les relations suivantes:

$$U(t) = E_0(t) - (Ra + Rt + jL \cdot \omega) i_2(t)$$

avec $i_2(t) = U(t) / Zc$.

Analyse des erreurs

■ erreur de rapport et de phase
L'image parfaite du courant primaire pour un capteur CS est le vecteur E déphasé de $\pi/2$ en retard par rapport au courant I_1 ; c'est-à-dire en phase avec E_0 sur la figure 15. Le module de ce vecteur est donné par $E = K_1 \cdot I_1$, avec K_1 constante représentant le rapport de transformation à une fréquence donnée.

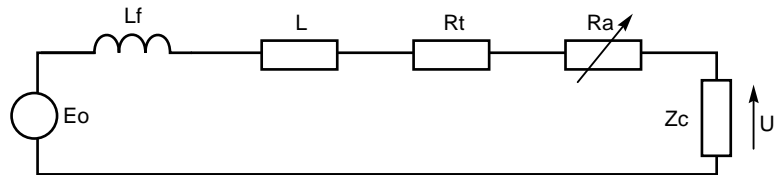


fig. 13 : schéma équivalent avec générateur de tension d'un capteur CS.

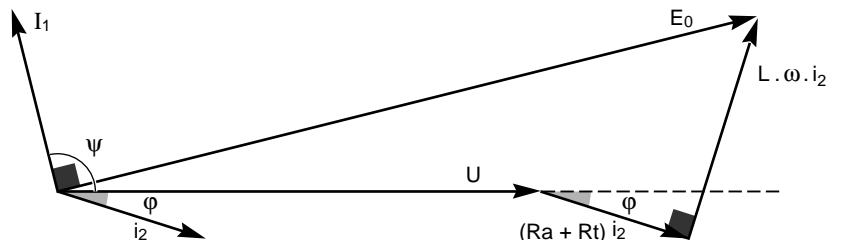


fig. 14 : diagramme vectoriel d'un capteur CS.

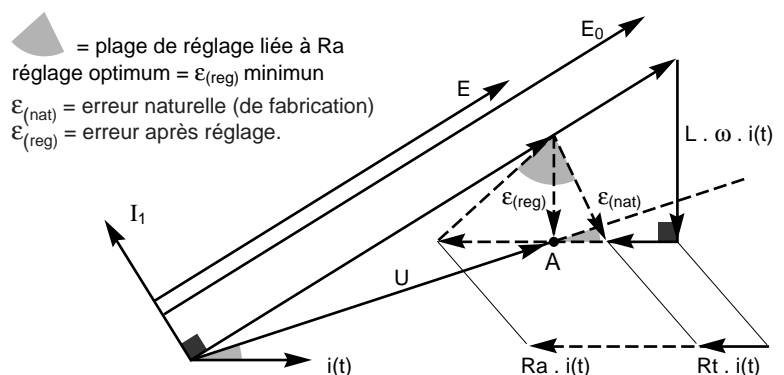


fig. 15 : diagramme vectoriel, avec erreur, du capteur CS.

Comme tous les capteurs le signal secondaire des capteurs CS est entaché d'une erreur. Cette erreur est définie comme étant le vecteur représentant la différence des vecteurs E et U, c'est le vecteur $\epsilon_{(net)}$ sur le diagramme de la figure 15.

Elle est minimisée en fin de fabrication par le réglage du potentiomètre R_{a3} à une valeur donnant un vecteur erreur $\epsilon_{(reg)}$ minimal. Ce réglage du capteur est adapté aux entrées courant des unités de protection et de contrôle-commande pour lesquelles il a été conçu. La valeur maximale de ce vecteur erreur a été fixée à 1 % de la valeur du vecteur de référence pour tout courant primaire compris entre 0.2 et 10 fois le courant primaire assigné, et à 5 % pour un courant de 200 fois le courant primaire assigné.

Avec ces erreurs maximales les capteurs CS d'un même rapport de transformation sont tous parfaitement interchangeables et sont pratiquement identiques en terme de précision (cf. fig. 16) à des TC de classe :

- 0,5 pour la mesure,
- 5P pour la protection.

■ linéarité

Le capteur CS est linéaire :
 $e(t) = K \cdot \omega \cdot I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + \varnothing)$

Cette linéarité lui confère beaucoup d'avantages, notamment :

- la possibilité de réduire la variété de rapports de transformation et ainsi favoriser les possibilités de standardisation. Les rapports de transformation sont imposés par la dynamique de l'électronique de l'unité de contrôle-commande à laquelle le capteur est associé et par le niveau de discrimination souhaité pour celle-ci.
- une bonne réponse en régime transitoire. L'absence de saturation, d'hystérésis et de flux rémanent, permet à ces capteurs d'avoir une réponse parfaite en régime transitoire. Ainsi sans précaution particulière ce type de capteur s'installe sur des réseaux sur lesquels il est nécessaire que les protections interviennent rapidement pendant les régimes transitoires, notamment sur les réseaux à constante de temps longue ou comportant des matériels de type blindés à isolement gazeux (présentant un risque d'explosion).

Influences externes

La réponse de ces capteurs CS, comme celle des TC, peut être, dans certaines conditions, influencée par l'environnement.

■ une modification de la charge secondaire de ce type de capteur entraîne une variation d'erreur. Pour atténuer ces variations, un CS étant une source de tension, il faut que sa charge purement résistive soit la plus élevée possible ($\geq 10 \text{ k}\Omega$).

■ la fréquence

Le signal délivré par ce type de capteur est une fonction de la dérivée du courant primaire (cf. § principe physique). Pour s'affranchir de l'influence de la fréquence, il faut que le signal du capteur CS soit traité par un amplificateur intégrateur de précision.

■ position du conducteur primaire

Le théorème d'Ampère ne fait pas référence à la position relative du courant (conducteur primaire) et du contour fermé (bobinage secondaire) auxquels il est appliqué. Cette remarque indique que le capteur est théoriquement insensible au positionnement relatif de ses composants. Cependant des imperfections de réalisation du bobinage secondaire peuvent le rendre légèrement sensible. Il faut donc, à l'installation des capteurs à primaire non intégré (BT), assurer un centrage et un azimutage relatif entre primaire et secondaire assez précis. Sans cette précaution des erreurs de l'ordre de 3 % peuvent être atteintes.

■ position des conducteurs voisins Un conducteur voisin, parcouru par le courant d'une autre phase ou de retour pour une boucle (cf. fig. 6), produit un champ magnétique qui s'ajoute vectoriellement à celui créé par le courant à mesurer et de ce fait, modifie la réponse du capteur. Les capteurs CS doivent être protégés contre ce type de perturbation.

spécification des capteurs de courant à bobine de Rogowski

Les capteurs CS et les unités de protection et de contrôle-commande sont fournis par un même industriel. La spécification des CS est donc beaucoup plus simple pour le client final. Il n'a pas à spécifier, comme il doit le faire pour les TC, les caractéristiques du secondaire (courant secondaire, puissance de précision, classe de précision et facteur limite de précision). Il lui reste à préciser seulement :

- le niveau d'isolement du capteur défini comme pour un TC ;
- le courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}), et le courant dynamique (I_{dyn}) établis selon les mêmes règles que pour les TC ;
- la plage d'utilisation (courant primaire assigné et courant d'échauffement). Par exemple il existe quatre plages d'utilisation (30-300, 160-630, 160-1600, 500-2500 A) avec les CS de fabrication Merlin Gerin.

comportement en CEM

Le capteur CS a une faible capacité de liaison primaire - secondaire ($\approx 20 \text{ pF}$ en HTA). La présence d'écrans, diélectrique et magnétique, mis au potentiel de la masse, empêche la transmission des perturbations conduites (à partir du réseau primaire MT) et rayonnées. L'ensemble CS, unité de protection et de contrôle-commande a donc un bon comportement en CEM.

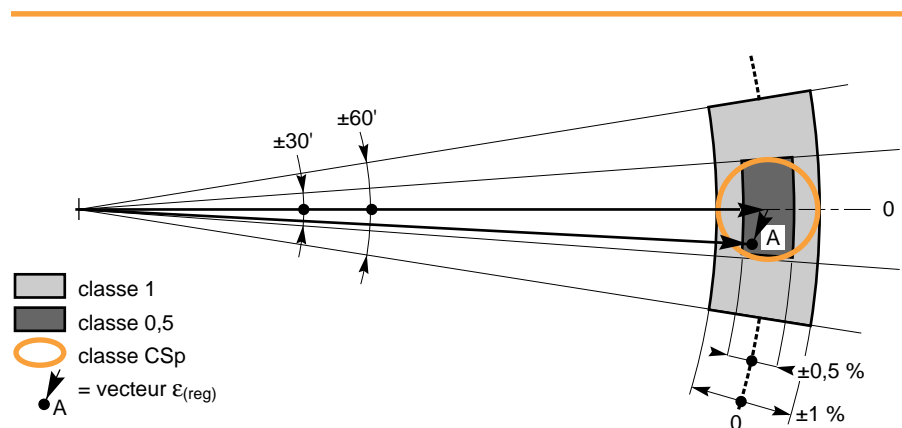


fig. 16 : comparaison des précisions des capteurs TC et CS. Le point A situe le fonctionnement d'un capteur CS qui satisfait tout à la fois aux exigences de précision des TC de classe 0,5, et des TC de classe 1.

5. capteurs hybrides

Les signaux délivrés par les TC et les CS sont directement utilisés par les unités de protection et de contrôle-commande. Il existe d'autres capteurs de courant dont le signal, avant d'être utilisé par ces unités, doit être traité électroniquement, ce sont les capteurs hybrides. Ils ont tous un diagramme semblable à celui de la figure 17.

Diagramme

Il peut comporter jusqu'à six éléments :

■ élément sensible primaire

Il utilise les différents effets (optique, électronique ou électrique) des matériaux soumis à un champ magnétique créé par le courant à mesurer.

■ convertisseur primaire

Il convertit l'effet utilisé par l'élément sensible en un signal fonction du courant primaire et adapté au système de transmission.

■ système de transmission

Il véhicule sur une distance plus ou moins grande le signal émis par le convertisseur primaire.

■ convertisseur secondaire

Il transforme ce signal, représentatif du courant primaire, en un signal électrique utilisable par les unités de protection et de contrôle-commande.

■ alimentation primaire

Elle fournit l'énergie nécessaire à l'élément sensible, au convertisseur primaire et éventuellement au système de transmission.

■ alimentation secondaire

Elle fournit l'énergie au convertisseur secondaire et éventuellement au système de transmission.

Dans certains capteurs ces deux alimentations, primaire et secondaire, peuvent être confondues.

Les éléments sensibles

Les capteurs hybrides ont fait l'objet au cours de ces dernières années d'importants programmes de développement. Différents effets du champ magnétique ont été utilisés dans les éléments sensibles primaires et notamment :

■ optique

Utilisation des effets du champ magnétique sur les caractéristiques de la lumière (capteur optique de courant). L'optique peut être aussi utilisée uniquement comme système de transmission à partir d'un élément primaire sensible de type quelconque. Cette transmission se fait alors par fibre optique. L'emploi de dispositifs obéissant à la physique de la lumière (élément sensible et système de transmission) confère au capteur un isolement galvanique parfait. Cet avantage a été exploité dans beaucoup de programmes de développement, dont certains ont abouti au capteur de courant à effet Faraday.

■ électronique

Influence d'un champ magnétique sur un semi-conducteur (capteur de courant à effet Hall) et sur un matériau

ferromagnétique (variation de résistivité exploitée dans les capteurs de courant magnéto-résistant).

■ électrique

Le flux créé dans un circuit magnétique par le champ magnétique issu du courant à mesurer, est annulé par un flux magnétique provoqué et régulé à l'aide d'un courant auxiliaire (transformateur de courant à flux nul).

capteurs optiques à effet Faraday

Pour la bonne compréhension de la suite il est nécessaire de faire quelques rappels en ce qui concerne la physique de la lumière.

Rappels

■ polarisation

C'est un phénomène propre à la propagation des ondes, en particulier lumineuses, caractérisées par leur direction de vibration dans un plan déterminé, appelé plan de propagation, contenant la direction de propagation.

Quand ce plan garde une direction fixée dans le temps, les ondes lumineuses ont une polarisation linéaire. S'il tourne autour de la direction de propagation à une vitesse constante, la polarisation est elliptique ou, dans un cas particulier, circulaire.

■ biréfringence

Certains corps naturels présentent le phénomène de biréfringence. Une lumière plane qui les traverse ne se propage pas à la même vitesse suivant que son plan de polarisation est parallèle à l'une ou l'autre des deux directions perpendiculaires propres au corps biréfringent. La biréfringence peut être intrinsèque (matériaux anisotropes) ou induite par une contrainte :

- mécanique ou effet photo-élastique,
- électrique ou effet électro-optique Kerr ou Pockels,
- magnétique ou effet magnéto-optique Faraday.

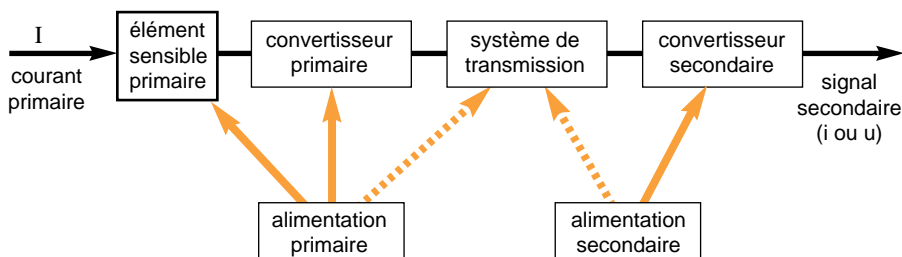


fig. 17 : diagramme des capteurs hybrides.

Effet Faraday

En 1845 Michael Faraday découvrit que le plan de polarisation d'une lumière polarisée, traversant un morceau de verre placé dans un fort champ magnétique et se propageant parallèlement à ce champ, tourne. L'angle (F) de rotation de la polarisation est proportionnel à la circulation du champ magnétique (H) le long du chemin optique L (cf. fig. 18).

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

Dans cette équation V est une caractéristique du milieu optique. C'est la constante de Verdet. Elle est généralement faible et dépend, plus ou moins fortement, de la température. L'effet Faraday étant dispersif il faut utiliser une lumière monochromatique (à fréquence unique).

Réalisation pratique

Cet effet est exploité avec des cristaux ou des fibres optiques, dans les deux cas il est nécessaire d'avoir une source lumineuse et de traiter l'information optique afin de pouvoir la rendre utilisable par les unités de protection et de contrôle-commande.

■ source lumineuse

C'est souvent une diode laser monomode ayant une longueur d'onde voisine de 780 nanomètres, la constante de Verdet étant maximale dans cette partie du spectre de longueurs d'onde.

■ cristal optique

Il est possible d'utiliser un ou plusieurs cristaux qui entourent plus ou moins le conducteur dans lequel circule le courant à mesurer (cf. fig. 19a). Dans la configuration d'optique en champ libre, c'est généralement le cas avec les cristaux, les problèmes d'alignement mécano-optique sont particulièrement importants.

■ fibre optique

La technique d'optique guidée utilise comme élément sensible une fibre optique monomode qui peut faire plusieurs tours autour du conducteur primaire (cf. fig. 19b). Dans ce cas l'application du théorème d'Ampère permet d'écrire :

$$F = V \cdot N \cdot I$$

Cette technique permet d'obtenir une plus grande sensibilité.

Les capteurs à fibre optique ne sont pas sensibles aux courants extérieurs (conducteur de retour, autres phases, autres circuits), alors que les capteurs

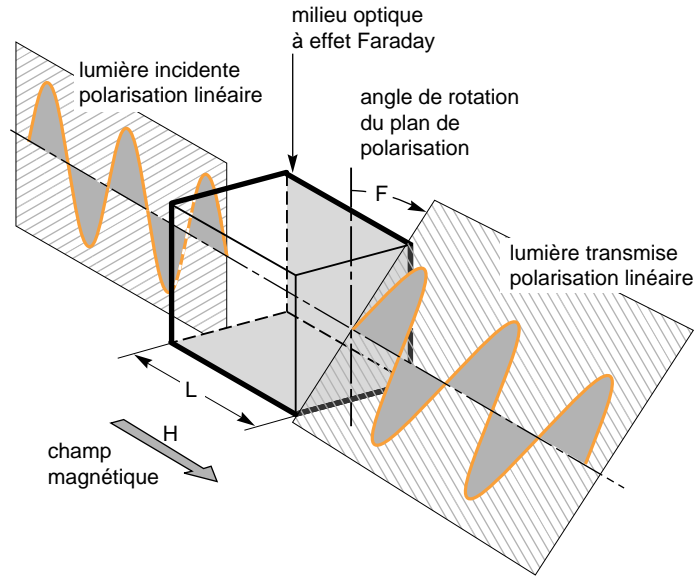
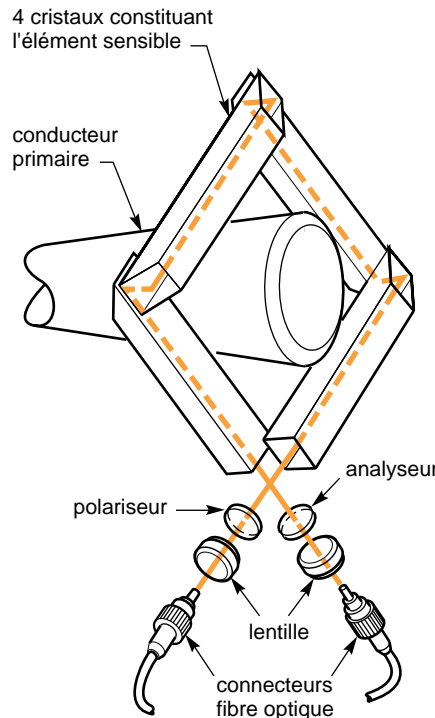
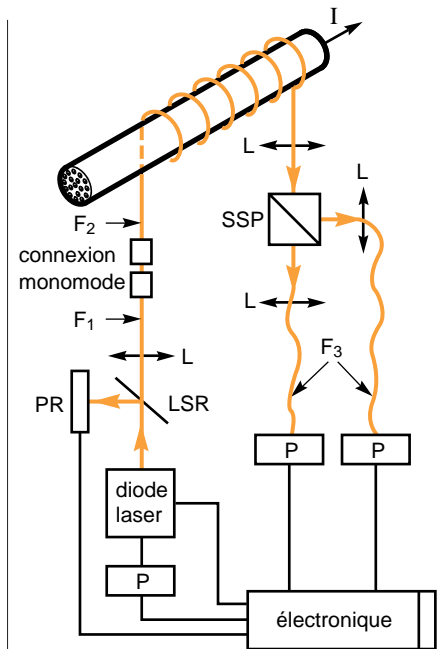


fig. 18 : représentation graphique de l'effet Faraday.

a - éclaté d'un capteur à cristal optique.



b - schéma d'un capteur à fibre optique.



- LSR lame semi-réfléchissante
- L lentilles Selfoc
- F1 fibre optique à maintien de polarisation
- F2 fibre capteur
- F3 fibres optiques multimodes
- I courant à mesurer
- SSP système séparateur/polariseur à 45°
- P photodiodes
- PR photodiodes de référence

fig. 19 : capteurs de courant à effet Faraday.

à cristaux optiques le sont plus ou moins selon leur technologie de construction.

Par contre les caractéristiques optiques de l'élément sensible (cristal ou fibre) sont particulièrement affectées par les variations de température et de contraintes mécaniques.

■ conversion du signal optique en signal électrique. Cette conversion se fait par comparaison des faisceaux lumineux émis et reçus. Elle utilise généralement des prismes polariseurs-séparateurs associés à des photodiodes qui transforment le signal lumineux en signal électrique analogique. Ce dernier est ensuite traité et amplifié pour être rendu utilisable par les unités de protection et de contrôle-commande.

Précision

Les capteurs optiques (à fibre ou à cristal) sont sensibles aux conditions extérieures (température, source d'énergie auxiliaire). Leur précision en est donc affectée.

■ influence de la température
Cette dernière influe sur deux paramètres :

- la constante de Verdet V
- la biréfringence du milieu optique,
- la longueur d'onde de la lumière émise par la diode laser.

Pour fonctionner dans les conditions rencontrées sur les réseaux électriques, les capteurs optiques doivent être compensés en température (cf. annexe 3, [5]). Cette compensation peut être faite :

- par action permanente sur l'élément sensible optique (double torsion de la fibre, parcours aller et retour de la fibre par la lumière, compensation thermique du cristal, etc.),
- par maintien de la diode laser à une température compatible avec la précision recherchée,
- par la prise en compte de la température réelle de chaque élément dans la chaîne de mise en forme du signal de sortie.

■ influence des contraintes mécaniques. Le cristal ou la fibre optique doit avoir un très faible taux de biréfringence afin de ne pas modifier la polarisation de la lumière en l'absence de champ magnétique. Les contraintes mécaniques sur le cristal ou sur la fibre, liées aux variations de température, comme à la mise en œuvre et

l'exploitation, ne doivent pas modifier ce taux de biréfringence.

■ influence de l'électronique de conversion du signal. Le cristal et la fibre optique sont parfaitement linéaires. Par contre l'électronique de traitement est limitée dans sa dynamique, pour une précision donnée, par :

- sa bande passante ;
- son aptitude à détecter à $2.\pi$ près l'angle de rotation du plan de polarisation, mais des techniques numériques de traitement du signal permettent de corriger ce point ;
- les tensions d'alimentation des composants constituant le ou les convertisseurs primaires et secondaires.

Malgré toutes ces difficultés, les techniques actuelles permettent de réaliser des capteurs optiques de courant ayant une précision comparable à celles des TC (cf. fig. 20).

Comportement en CEM

L'isolement galvanique entre les circuits (primaire et secondaire) étant parfait (pas de capacité de liaison), le comportement en CEM (perturbations conduites) d'un tel capteur est bon. Mais ce comportement peut être affecté par celui de ses convertisseurs primaire et secondaire sensibles aux perturbations rayonnées (blindages, positionnement relatif, etc.).

A noter que cet isolement galvanique parfait est, en terme de sécurité, un atout majeur pour ce type de capteur : il supprime les risques d'explosion existants en HTB avec les TC à isolement dans l'huile.

capteurs de courant à effet Hall

Effet Hall

Une plaquette semi-conductrice traversée par un courant i et plongée dans un champ d'induction magnétique \vec{B} développe entre deux faces une différence de potentiel appelée tension de Hall V_H répondant à la relation :

$$V_H = K.i.B$$

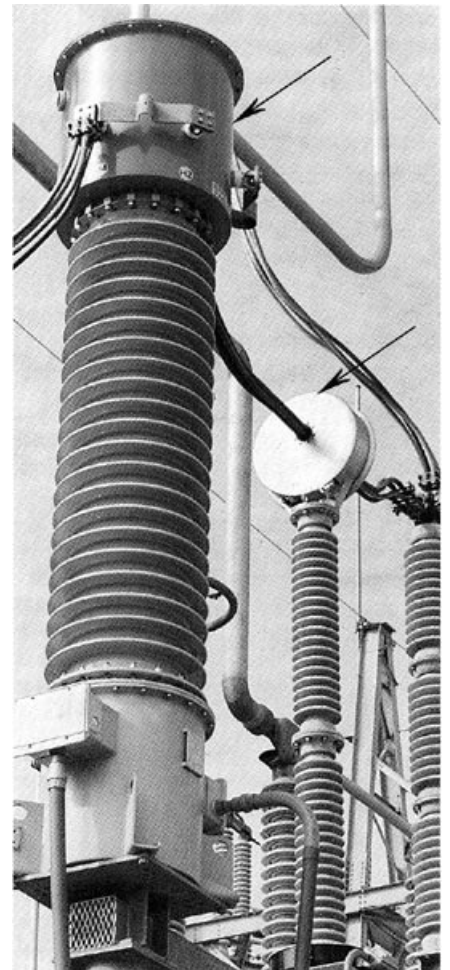
où K est le coefficient de sensibilité du capteur.

Cette plaquette constitue l'élément sensible du capteur de courant à effet Hall.



a - du domaine HTA (Merlin Gerin), avec :

- au premier plan un capteur optique avec son conducteur à fibre optique enroulé,
- au deuxième plan un capteur TC conventionnel équivalent, mais plus volumineux.



b - du domaine HTB (Square D), avec :

- au premier plan un TC conventionnel,
- au deuxième plan un capteur optique équivalent, mais moins encombrant.

fig. 20 : exemples de capteurs optiques.

Principe

L'explication du phénomène de Hall suppose que dans une plaquette longue (cf. fig. 21), pourvue de larges électrodes d'injection de courant i , tous les électrons sont en déplacement uniforme à la vitesse V en sens inverse du courant i . Lorsqu'un champ d'induction magnétique \vec{B} est appliqué perpendiculairement à l'une des grandes faces de la plaquette, les électrons de charge $-e$ sont déviés vers l'une des petites faces contre lesquelles ils s'accumulent sous l'action des forces de Laplace :

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{V} \wedge \vec{B}$$

Le déséquilibre des charges entre les deux petites faces fait apparaître un champ électrique de Hall \vec{E}_H , qui croît jusqu'à ce que la force $(-e \cdot \vec{E}_H)$ équilibre celle du champ d'induction.

Dans ces conditions, les électrons reprennent un mouvement uniforme, et le champ électrique de Hall s'exprime par :

$$\vec{E}_H = - \vec{B} \cdot \vec{j} / (N \cdot e)$$

où N est le nombre de porteurs de charge $(-e)$ et \vec{j} la densité de courant dans la plaquette, d'où la tension de Hall :

$$V_H = K \cdot i \cdot B / (N \cdot e \cdot d)$$

Réalisation pratique

Une solution pratique pour améliorer la sensibilité du capteur est d'augmenter \vec{B} . Pour cela, le générateur de Hall est placé dans l'entrefer d'un noyau magnétique parcouru par le flux d'induction dû au champ magnétique créé par le courant à mesurer (cf. fig. 5). L'alimentation en courant et le traitement du signal se font par l'intermédiaire d'éléments électroniques.

Précision

La réponse d'un capteur à effet Hall n'est pas parfaitement proportionnelle à B , trois facteurs en sont la cause :

- tension d'offset,
- erreur de linéarité,
- fluctuation en fonction de la température.

■ tension d'offset

C'est une tension d'erreur liée à la réalisation de l'élément sensible.

Elle peut être corrigée, pour une plage de température définie, par le convertisseur secondaire.

■ erreur de linéarité

La présence d'un circuit magnétique, même avec un entrefer relativement important, introduit une non linéarité résultant des phénomènes de saturation. La dynamique de ce capteur est liée au dimensionnement du circuit magnétique.

■ fluctuation liée à la température

La température influe de deux manières :

- par le coefficient de sensibilité K qui varie d'environ 0,01 % par °C,
- par les contraintes mécaniques, consécutives à des variations de température, subies par l'élément sensible.

La réalisation d'un tel capteur doit prendre en compte toutes ces influences et essayer de les compenser pour obtenir et garantir, dans les conditions d'utilisation spécifiées, une précision compatible avec l'application envisagée (mesure ou protection ou les deux). D'où le schéma fonctionnel de l'électronique nécessaire au bon fonctionnement de ce capteur (cf. fig. 22).

La bande passante de tels capteurs est relativement grande. Il est possible de mesurer des courants continus et des courants ayant des fréquences de l'ordre de 40 kHz. La largeur de la bande passante, de ce type de capteur, dépend de la technologie du circuit magnétique, des composants électroniques et de l'architecture employés pour le traitement du signal.

Comportement en CEM

L'absence d'isolement galvanique entre le capteur et les éléments électroniques est un handicap important, surtout en HT. La CEM de l'ensemble (capteur à effet Hall, unité de protection et de contrôle-commande) peut donc être imparfaite.

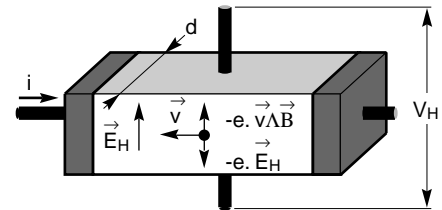


fig. 21 : schéma théorique du capteur à effet Hall.

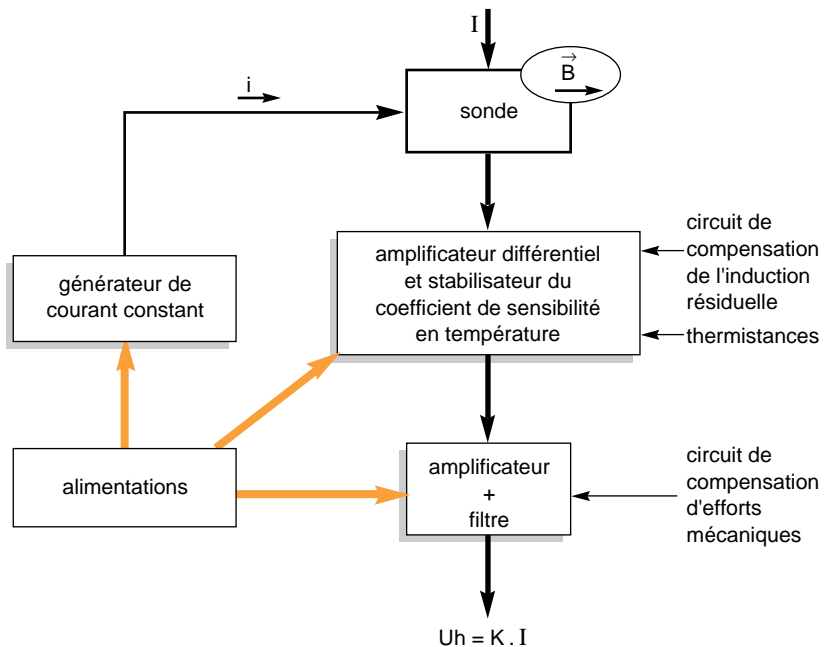


fig. 22 : schéma fonctionnel de l'électronique d'un capteur à effet Hall.

capteur de courant à flux nul

Principe

L'élément sensible est un circuit magnétique (CM) (cf. fig. 4) dans lequel le flux créé par le courant à mesurer (I_1) est annulé par un courant (I_2). Courant dont la valeur est ajustée automatiquement par un amplificateur électronique de puissance (A) piloté par la tension de la sonde (SD) proportionnelle au flux circulant dans le noyau magnétique (CM). Le flux résultant dans ce noyau est nul, il est donc possible d'écrire :

$I_2 = N_1 \cdot I_1 / N_2$, avec
 N_1 = nombre de spires de l'enroulement primaire,
 N_2 = nombre de spires de l'enroulement secondaire.

Précision

La précision de ce système est très bonne. Les bancs de mesure des erreurs des transformateurs de courant exploitent ce principe. Il est possible de limiter l'erreur de module à de très faibles valeurs ($\approx 0,02\%$). De même pour l'erreur de phase qui peut être inférieure à 0,1 minute d'angle (mais qui dépend des circuits électroniques d'annulation du flux).

Les performances d'un tel capteur dépendent essentiellement des performances de l'amplificateur, aussi bien en plage de mesure qu'en précision.

Note :

Les transformateurs de courant à flux nul permettent de mesurer les courants continus.

Comportement CEM

Le signal d'annulation du flux voisin de zéro est facilement perturbable. Ce type de TC doit donc faire l'objet d'un environnement électromagnétique très protégé (écrans, filtrage des alimentations, etc.).

6. tableau comparatif, synthèse

■ mauvais ■■ moyen ■■■ bon ■■■■ très bon	TC transformateur de courant conventionnel	CS capteur à bobine de Rogowski	capteurs optiques	transformateur de courant à flux nul
performances :				
■ linéarité	■	■■■■	■■■■	■■■
■ fidélité	■	■■■■	■■■	■■■
■ dynamique	■	■■■■	■■■■	■■
■ précision	■■■	■■■	■■■	■■■■
■ CEM	■■■	■■■	■■■■	■■
aptitudes :				
■ étalon de mesure	■■	■■	■■	■■■■
■ fournir de l'énergie aux équipements de protection et contrôle-commande	■■■■	■	■	■■
■ fournir le signal de mesure à :				
□ des compteurs d'énergie analogiques	■■■■	■	■	■
□ des compteurs d'énergie numériques	■■■■	■■■	■■	■
□ des équipements numériques de protection et contrôle-commande	■■■■	■■■■	■■	■
coût relatif par rapport à l'appareillage :				
■ en HTA	■■■	■■■■	■■	■
■ en HTB	■■	■■■	■■■	■
importance des capteurs annuellement installés :				
■ situation actuelle	■■■■	■■■	■	■
■ évolution prévisible	■■■	■■■	■■	■

7. conclusion et avenir

les solutions du présent

Aujourd'hui la majorité des équipements de protection et de contrôle-commande en service fait appel aux technologies électromagnétiques ou électroniques. Ils nécessitent des signaux de puissance suffisante (≈ 5 à 50 VA) de la part de capteurs de courant souvent éloignés (≈ 2 à 150 m).

Dans les équipements HT, cette fourniture d'énergie est faite par des transformateurs de courant conventionnels.

Cependant, en HTA plusieurs centaines d'unités de protection et de contrôle-commande numériques sont en fonctionnement. La plupart, capables de traiter des signaux de bas niveaux énergétiques, sont associées à des capteurs CS. Et en HTB des expérimentations sont en cours avec des capteurs à effet Faraday à cristaux ou à fibres optiques.

Les TC à flux nul sont surtout employés dans les bancs de contrôle et dans les réseaux de transport en courant continu.

les solutions de l'avenir

L'évolution très rapide des systèmes de protection et de contrôle-commande vers les technologies numériques conduit déjà à des modifications

importantes des spécifications des capteurs. Ces spécifications favorisent la CEM, la linéarité et la plage d'utilisation des capteurs.

■ CEM

Il est lié à l'emploi de plus en plus étendu des technologies électroniques. Dans ce domaine le capteur optique présente un comportement idéal.

■ linéarité

Les TC linéaires (type TPZ) sont généralement très encombrants (présence d'entrefer) et leur linéarité n'est pas parfaite. Sur défaut, ils imposent aux équipements qui leur sont raccordés des contraintes thermiques très importantes. Le capteur CS, étant d'une linéarité parfaite, présente la performance optimale sur ce point.

■ plage d'utilisation

Un TC a une plage d'utilisation très réduite qui limite son emploi à une seule application. Par contre, les capteurs optiques et CS dont la plage d'utilisation est plus grande (≈ 10 fois) ont des possibilités d'emploi plus étendues, seulement limitées par les équipements auxquels ils sont raccordés.

Les capteurs optiques et CS sont donc les plus performants au niveau des contraintes techniques nouvelles. Un capteur hybride, ayant comme élément sensible une bobine de Rogowski et

comme système de transmission des fibres optiques, pourrait être la solution idéale.

En HTA, cette solution n'est pas encore économiquement exploitable. Par contre la solution CS, par son coût et les avantages qu'elle procure, est la solution déjà présente et de l'avenir.

En HTB l'emploi de ces nouveaux capteurs dépend du développement des solutions numériques pour les unités de protection et de contrôle-commande ou de la création d'interfaces numériques pour les unités existantes. A partir de l'instant où de tels équipements seront disponibles, l'évolution des capteurs sera très rapide. Cette évolution est commencée : des systèmes sont déjà proposés, soit en «tout optique», soit suivant la solution idéale préconisée précédemment.

Ainsi donc, à long terme en HT, les TC conventionnels, dont les performances sont limitées et le coût relativement élevé, sont condamnés à disparaître, exceptés peut être ceux employés pour le comptage de facturation d'énergie.

annexe 1 : précision des TC selon la CEI 185

limites d'erreur pour des secondaires « mesure »

valeurs du courant exprimées en % du courant assigné	erreur de courant (\pm), en %				déphasage I_1/I_2 (\pm)								
	-					minutes				centiradians			
		5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
classe de précision													
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	

limites d'erreur pour des secondaires « protection »

classe de précision	erreur de rapport pour des courants compris entre I_n et $2 I_n$, en %	déphasage pour le courant nominal		erreur composée pour le courant limite de précision, en %
		minutes	centiradians	
5P	± 1	± 60	$\pm 1,8$	5
10P	± 3			10

annexe 2 : classement des TC selon la CEI 44-6

Les différentes classes de transformateurs de courant pour la protection, définies par la CEI 44-6 selon leurs performances, sont indiquées dans le tableau ci-contre.

classe	performances
P	Limite de précision définie par l'erreur composée ($\hat{\epsilon}_c$) pour un courant primaire symétrique de régime établi. Aucune limite pour le flux rémanent. C'est aussi la classe du secondaire protection définie dans la CEI 185.
TPS	TC à faible flux de fuites dont les performances sont définies par des limites fixées pour les caractéristiques d'excitation par l'enroulement secondaire et pour l'erreur sur le rapport des nombres de spires. Aucune limite pour le flux rémanent. Cette classe est similaire à la classe X définie dans la norme BS 3938.
TPX	Limite de précision définie par l'erreur instantanée de crête ($\hat{\epsilon}$) au cours du cycle de fonctionnement en régime transitoire spécifié. Aucune limite pour le flux rémanent.
TPY	Limite de précision définie par l'erreur instantanée de crête ($\hat{\epsilon}$) au cours du cycle de fonctionnement en régime transitoire spécifié. Le flux rémanent ne doit pas excéder 10 % du flux de saturation.
TPZ	Limite de précision définie par l'erreur instantanée de crête sur la composante alternative du courant ($\hat{\epsilon}_{ca}$) au cours d'un seul passage du courant présentant la composante apériodique maximale, la constante de temps de la boucle secondaire ayant la valeur spécifiée. Aucune exigence concernant l'erreur limite sur la composante apériodique du courant. Le flux rémanent devant être pratiquement négligeable.

annexe 3 : bibliographie

[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 : Première édition
1992-03 : Transformateurs de mesure.
Partie 6 : Prescriptions concernant les
transformateurs de courant pour
protection pour la réponse en régime
transitoire.

[3] CEI 185 : Deuxième édition 1987 et
sa modification 1 1990-07.
Transformateurs de courant.

[4] Méthode rapide de
prédétermination des transformateurs
de courant,
Pierre SCHUELLER (Merlin Gerin)
page 41 à 45, RGE n°4 avril 1990.

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

[6] La CEM : la compatibilité
électromagnétique,
Cahier Technique Merlin Gerin n° 149.
F. VAILLANT.

[7] Le transformateur de courant pour
la protection en HT,
Cahier Technique Merlin Gerin n° 164.
M. ORLHAC.