



Collection technique

Cahier technique n° 195

Transformateurs de Courant :
erreurs de spécification
et solutions



P. Fonti

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 195

Transformateurs de Courant : erreurs de spécification et solutions



Paola FONTI

**Ingénieur INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble).
Diplômée en 1970.**

**Entrée chez Merlin Gerin en 1981 comme conseillère et responsable
du bureau d'étude Moyenne Tension Export, elle est aujourd'hui
responsable du Groupe d'Appui à l'Offre et à la Réalisation des
projets MT pour Schneider Electric.**

Lexique

FLP : facteur limite de précision.

FS : facteur de sécurité.

I_f : courant maximal traversant une zone protégée.

I_s : seuil de réglage en courant.

k_n : facteur limite de précision (FLP) nominal d'un TC (associé à sa charge de précision).

k_r : FLP réel d'un TC, associé à sa charge réelle.

P_i : ($= R_{ct} I_n^2$). Pertes internes du capteur de courant à I_n .

P_n : ($= R_n I_n^2$). Puissance de précision du capteur de courant.

P_r : ($= R_r I_n^2$). Consommation de la charge réelle du capteur de courant à I_n .

R_{CT} : résistance de l'enroulement secondaire du TC.

R_L : résistance de la filerie.

R_p : résistance du relais de protection.

Surcalibrage d'un TC : choix d'un TC dont le I_n primaire est supérieur au I_n immédiatement supérieur au I_n du récepteur.

TC : transformateur de courant.

TC recailleurs, auxiliaires ou intercalaires : TC basse tension mis au secondaire des TC principaux pour corriger un rapport et/ou le déphasage du courant.

Transformateurs de Courant : erreurs de spécification et solutions

Après un rappel sur les caractéristiques des transformateurs de courant (TC), l'auteur met en évidence les erreurs les plus souvent rencontrées dans la définition des réducteurs de courant, maillon indispensable et méconnu entre le réseau électrique et les relais de protection.

Il donne les moyens de sortir des situations difficiles : TC non réalisables, retards, coûts supplémentaires, dysfonctionnements...

Ce Cahier Technique devrait être utile aux électriciens qui conçoivent une installation, aux spécialistes des protections, aux fabricants de cellules ainsi qu'aux fabricants de TC. Tous ont intérêt à bien échanger toutes les informations nécessaires à la sécurité et à l'optimisation des TC.

Ce Cahier Technique est un complément opérationnel au Cahier Technique n° 194 « Transformateurs de Courant : comment les spécifier ».

Sommaire

1 Bien spécifier les transformateurs de courant	1.1 Introduction	p. 4
	1.2 Rappel sur les TC	p. 4
2 Exemples d'erreurs de spécification	2.1 Optimisation et sécurité	p. 7
	2.2 Quand des TC ne semblent pas convenir...	p. 8
	2.3 Erreurs les plus fréquentes	p. 9
	2.4 Et si un TC n'est pas réalisable ?	p. 12
3 Equivalence des différentes définitions possibles d'un même TC	3.1 Comment passer de P_{n_1} -5Pk ₁ à P_{n_2} -5Pk ₂	p. 15
	3.2 Comment passer de P_{n_1} -5Pk ₁ à P_{n_2} -10Pk ₂	p. 15
	3.3 Quel est le V_k d'un TC : P_n -XPk	p. 16
	3.4 Comment passer d'une classe X (V_k , R_{ct}) à une classe 5P : P_n -5Pk	p. 16
4 Conclusion		p. 17
Bibliographie		p. 18

1. Bien spécifier les transformateurs de courant

1.1 Introduction

Les transformateurs de courant classiques (cf. Cahier Technique n° 164) ou hybrides (cf. Cahier Technique n° 170) sont un maillon indispensable dans la chaîne de protection des réseaux électriques.

Leur spécification, même si elle est affaire de spécialistes, est souvent entachée d'erreurs, de manque d'optimisation.

Ceci conduit trop souvent à des impossibilités technologiques, à des retards de mise en service, à des coûts supplémentaires, à des mauvais fonctionnements des protections, voire à la mise en cause de la sécurité des installations et des personnes.

Bien spécifier un TC (cf. Cahier Technique n° 194) nécessite une bonne connaissance :

- du schéma de l'installation électrique,
- des données électriques (tension, courant nominal, courant de court-circuit etc.),
- des protections associées,

■ de l'ensemble des protections du réseau (plan de protection), de la charge qu'elles représentent pour les TC, sans oublier celle de la filerie et de leurs réglages.

Il n'est pas rare que, par manque de données, voire par méconnaissance du fonctionnement attendu des TC, un fabricant dise « ces caractéristiques ne sont faisables », alors qu'un TC standard peut convenir.

Ce Cahier Technique met l'accent sur l'optimisation, mais surtout sur les équivalences entre les différentes définitions d'un même réducteur de courant. Il faut en effet savoir que puissance, classe et facteur limite de précision, sont des grandeurs interdépendantes qui n'ont aucune signification prises individuellement. Cette connaissance permet de sortir de beaucoup de situations de blocage.

Avant d'entrer dans le corps du sujet, quelques rappels sur les caractéristiques des TC sont exposés dans la suite de ce chapitre.

1.2 Rappel sur les TC

Suivant les normes CEI, entres autres, les TC peuvent être caractérisés par :

- a** - Leur rapport de transformation, exemple : 2000/5 A.
- b** - Leur puissance de précision, exemple : 15 VA.
- c** - Leur classe de précision, exemple :
 - 5P, 10P pour un enroulement protection,
 - classe 0,5, 1 etc., pour un enroulement mesure,
- d** - Les caractéristiques liées à leur saturation :
 - d-1** Facteur Limite de Précision (FLP) pour un enroulement protection,
 - d-2** Facteur de Sécurité (FS) pour un enroulement destiné à la mesure
- e** - D'autres caractéristiques :
 - tenue thermique, exemple 50 kA - 1 sec.,
 - tension d'isolement,
 - etc.

Dans tout ce qui va suivre, nous nous intéresserons uniquement aux caractéristiques **a, b, c, d** et à tout ce qui en découle (cf. **fig. 1**).

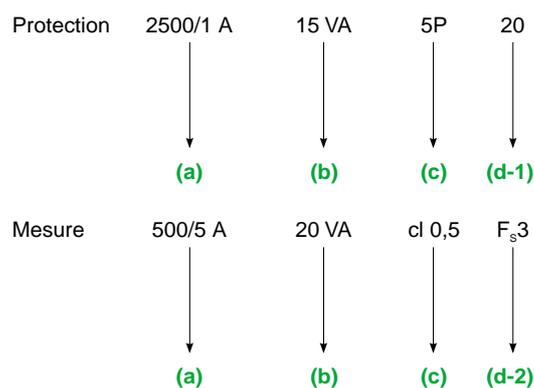


Fig. 1 : principales grandeurs caractéristiques du TC.

Rappelons qu'un TC 15 VA-5P20 a une erreur garantie inférieure à 5 % lorsqu'il est soumis à 20 fois son courant nominal et qu'il débite dans sa charge nominale (15 VA à I_n).
Chacune des caractéristiques **b, c, d** est fonction des deux autres.

Le même TC peut être affecté d'une puissance différente, d'une classe de précision différente et d'un FLP différent.

Par contre, un TC donné a une seule courbe de magnétisation et une seule résistance d'enroulement secondaire (à une température donnée).

Lorsque ces deux derniers éléments sont connus (courbe + résistance), nous pouvons trouver toutes les correspondances souhaitées entre les diverses valeurs **a, b, c** à affecter au TC ou plutôt entre les divers triplés :
 $(b_1, c_1, d_1) \Leftrightarrow (b_2, c_2, d_2) \Leftrightarrow (b_i, c_i, d_i)$
Toutes les équivalences sont déduites des lois simples de l'électricité, notamment de la loi d'Ohm.

Schéma équivalent d'un TC (cf. fig. 2)

- Rapport du TC : I_{n_1} / I_{n_2} ,
- L_m : self de magnétisation (saturable) équivalente du TC.
- I_m : courant magnétisant,
- I_1 : courant primaire,
- I_2 : courant secondaire correspondant à un TC

parfait, soit : $I_2 = I_1 \frac{I_{n_2}}{I_{n_1}}$,

- I_s : courant secondaire circulant effectivement au secondaire du TC : $\vec{I}_2 = \vec{I}_s + \vec{I}_m$

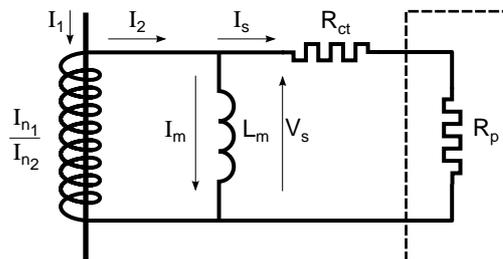


Fig. 2 : schéma équivalent d'un TC.

C'est le courant de magnétisation I_m qui provoque une erreur dans la mesure. Si le TC était parfait, on aurait $I_m = 0$.

La courbe de magnétisation du TC représente le courant magnétisant en fonction de la tension V_s développée au secondaire du TC ; elle peut être divisée en 3 zones (cf. fig. 3)

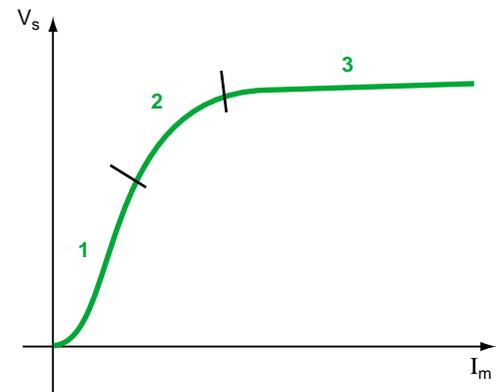
- 1 - zone non saturée,
- 2 - zone intermédiaire,
- 3 - zone saturée.

En zone 1, le courant I_m est faible et la tension V_s augmente de façon quasi proportionnelle au courant primaire.

La zone 2 est une zone floue entre la zone non saturée et la zone saturée. Il n'y a pas de réelle cassure de la courbe de magnétisation. Il est difficile de situer un point précis de la courbe correspondant à la tension de saturation.

En zone 3, la courbe ($V_s I_m$) devient quasiment horizontale. L'erreur est importante sur le rapport de transformation et le courant secondaire déformé par la saturation.

Un certain nombre de tensions caractéristiques sont mises en avant pour un TC, elles correspondent à la zone 2 ; leur connaissance est nécessaire quand il s'agit de donner une autre définition à un TC donné.



- 1 - Zone non saturée
- 2 - Zone intermédiaire
- 3 - Zone saturée

Fig 3 : courbe de magnétisation (d'excitation) $V_s = f(I_m)$ d'un TC.

Tensions caractéristiques liées à un TC

■ Tension de coude ou « knee point » définie par la norme BS 3938 : V_k dans le cas de la classe X (PX dans la norme CEI 60044-1).

V_k est déterminé par le point de la courbe $V_s(I_m)$ à partir duquel une augmentation de 10 % de la tension V_s entraîne une augmentation de 50 % du courant magnétisant.

■ Tension liée à la limite de précision des TC classe 5P : $V_{(5P)} = V_{s1}$,

■ Tension liée à la limite de précision des TC classe 10P : $V_{(10P)} = V_{s2}$,

■ Tension liée au facteur de sécurité F_s
 $V_{(F_s)} = V_{s2}$, puisque le facteur de sécurité est lié à une limite de précision de 10 % comme le TC classe 10P.

Ces différentes tensions $V_k < V_{(5P)} < V_{(10P)}$ sont liées chacune à un niveau d'induction.

Avec les matériaux couramment utilisés dans la fabrication des TC, à titre d'exemple :

- V_k correspond à 1,4 tesla,
- $V_{(5P)} = V_{s1}$ correspond à 1,6 tesla,
- $V_{(10P)} = V_{s2}$ correspond à 1,9 tesla,
- $V_{(F_s)} = V_{s2}$ correspond à 1,9 tesla.

On peut en déduire les rapports suivants :

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

Si une de ces tensions est connue, il est simple d'en déduire les autres.

Comment calculer les tensions caractéristiques à partir d'un TC défini en classe 5P ou 10P

■ Prenons un exemple.

Supposons un TC 10 VA-5P15 de rapport 2000/5. « 10 VA-5P15 » signifie que lorsqu'il y a une

charge égale à sa charge nominale $R_p = \frac{P_n}{I_n^2}$,

la précision du TC est garantie meilleure que 5 % jusqu'à $I_s = 15 I_n$. A partir de là, il suffit de se référer au schéma équivalent du TC et à la loi d'Ohm pour obtenir la valeur de $V_{(5P)}$ ou V_{s1} (cf. **fig. 4**).

On a simplement : $V_{s1} = (R_{ct} + R_p) I_s$,

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

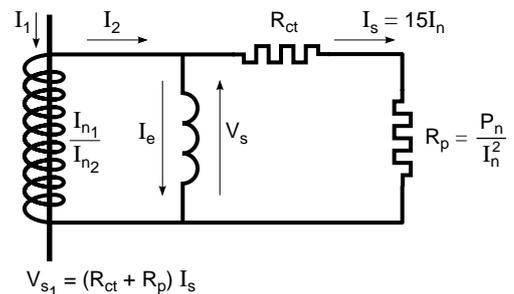
Cette relation montre que la connaissance de la résistance interne de l'enroulement secondaire du TC est absolument nécessaire pour faire la corrélation entre les différentes définitions possibles du TC.

Nous dirons qu'une bonne définition d'un TC doit comporter, dans tous les cas, la valeur de R_{ct} . Dans notre cas, supposons que $R_{ct} = 0,6 \Omega$,

avec $R_n = \frac{10}{5^2} = 0,4 \Omega$ le calcul donne :

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

Avec les valeurs d'induction citées précédemment pour les classes 10P et la classe X, V_{s2} et V_k peuvent être calculées.



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

Fig 4 : calcul de la tension caractéristique d'un TC.

2 Exemples d'erreurs de spécification

2.1 Optimisation et sécurité

L'examen d'un plan de protection montre qu'il a été prévu pour des départs transformateurs, au niveau d'un tableau, des TC de rapports différents 50/5 et 1000/5 ayant une même définition 15 VA-5P20.

Ces TC sont associés aux mêmes relais de protection à maximum d'intensité avec des réglages de $15 I_n$ (des TC) pour les départs 50 A, et $12 I_n$ (des TC) pour les départs 1000 A. Même charge (0,05 VA), même filerie (1,25 VA) et réglages voisins des relais : il paraît logique que les deux TC aient la même définition. Mais un rapide calcul des puissances nécessaires montre qu'il n'en est rien...

■ Pour le 1000/5

Le FLP nécessaire (cf. CT 194) est $\frac{2 I_r}{I_n}$, soit $k_r = 24$.

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

- une résistance interne $R_{ct} = 0,6 \Omega$,
 - $k_n = 20$,
 - des pertes internes du TC à $I_n = P_i$
 $P_i = R_{ct} \times I_n^2 = 0,6 \times 5^2 = 15 \text{ VA}$
 - une charge réelle du TC à $I_n = P_n = 1,3 \text{ VA}$,
 on obtient : $k_r = 36,8 > 24$.
- Le TC est donc largement suffisant.

■ Pour le 50/5

Le FLP nécessaire est $15 I_n \times 2$, soit $k_r = 30$.

□ Tout d'abord un tel TC est a priori irréalisable. Sa résistance interne serait de l'ordre de $0,02 \Omega$. Mais nous pouvons montrer qu'il est surdimensionné en puissance.

□ De plus, avec $R_{ct} = 0,02 \Omega$, $P_i = 0,5 \text{ VA}$; et avec $k_n = 20$ et $P_p = 1,3 \text{ VA}$ on obtient $k_r = 172 \gg 30$.

Plus grave, en cas de non déconnection du départ transformateur, le courant de court-circuit (I_{th} du tableau 40 kA/1 s) va faire circuler au

secondaire du TC un courant efficace supérieur à : $172 \times 5 \text{ A} = 860 \text{ A}$.

(Sans saturation 40000 A/50 A $\times 5 \text{ A} = 4 \text{ kA}$).

Le relais et la filerie seront détruits et le TC aussi. Un TC 5 VA s'avère donc largement suffisant ($k_r = 67 > 30$), un TC 2,5 VA convient aussi, il est moins cher, moins encombrant et surtout réalisable.

■ Conclusion

Il faut bien calculer la puissance des TC de faible rapport de transformation car leur R_{ct} naturellement faible induit un risque de surdimensionnement dangereux.

La **figure 5** apporte un éclairage sur les interactions k_r , P_p , P_i .

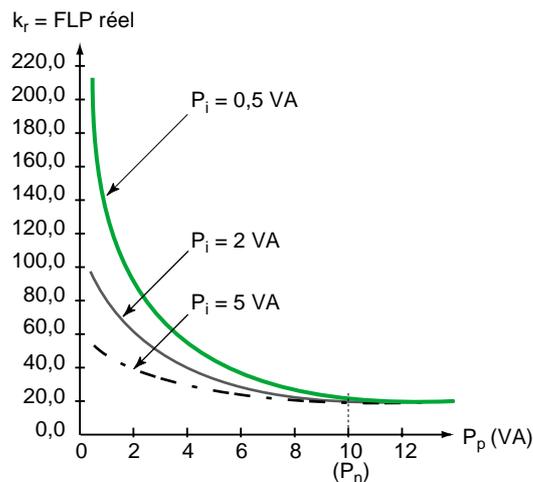


Fig 5 : évolution du facteur limite de précision de trois TC (de R_{ct} différentes), de 10 VA-5P20 en fonction de la charge réelle câblée au secondaire P_p .

2.2 Quand des TC ne semblent pas convenir...

Ce paragraphe retrace toutes les difficultés rencontrées à la suite d'une réalisation des TC pour un tableau de distribution publique de 33 kV comportant 8 départs lignes, sans prise en compte du besoin final. Tout le problème a été mis en évidence sur le site, peu de temps avant la mise sous tension, alors que les TC étaient déjà montés dans les cellules MT (cf. **fig. 6**).

- Le besoin exprimé lors de la commande
Il consistait à avoir un double primaire 300-600 et trois enroulements secondaires 1 A :
 - un 5 VA-5P20, pour alimenter une unité de protection Sepam 2000,
 - un 15 VA classe 0,5, pour du comptage extérieur,
 - un de classe X, pour une protection de distance.

■ Le matériel livré
Trois enroulements dans un même TC fonctionnel avec de telles caractéristiques étaient impossibles à réaliser, des TC complémentaires étaient donc nécessaires. Ils furent dédiés à la "classe X" et installés en aval du TC à double secondaire.

■ L'erreur constatée sur le site
Des TC fonctionnant avec une protection de distance doivent être installés au plus près du disjoncteur afin d'avoir une zone protégée maximale, or les TC classe X étaient trop éloignés.

■ Mais alors que faire ?
Il fut donc question de changer tous les TC, soit 2 TC par phase, 6 TC par départ et donc un total de 48 TC pour 8 départs ! Le démontage, la fabrication de nouveaux TC et le remontage, tout cela conduisait à des délais et des coûts...

■ Y avait-il une autre solution ?
□ Une première réflexion permit d'envisager l'usage des TC complémentaires (classe X) pour alimenter le Sepam 2000. Le fournisseur confirma cette possibilité : le TC dédié à la protection distance (classe X) correspond à 10 VA-5P20 sur le rapport 300 et 20 VA-5P20 sur le rapport 600/1.

Il était donc possible d'associer les TC complémentaires aux Sepam 2000.
Ouf ! déjà 24 TC en moins à changer.

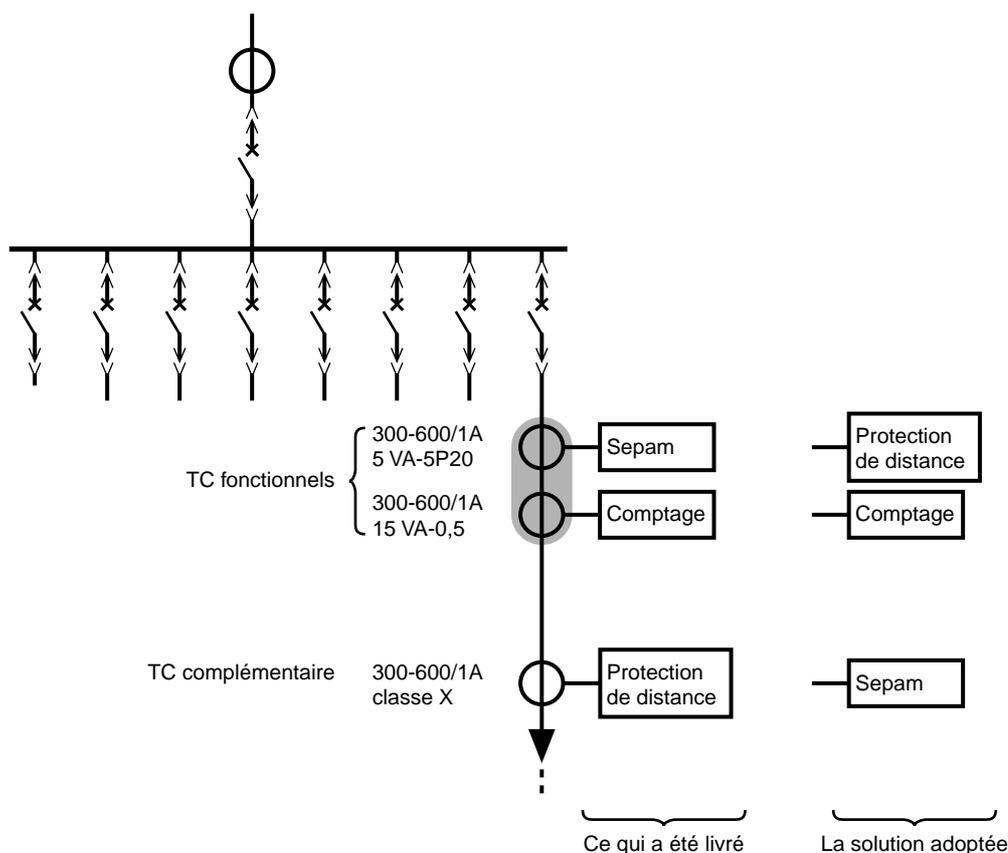


Fig. 6 : Equipement en TC d'un tableau 33 kV : le réalisé non satisfaisant et la solution de rattrapage.

□ La deuxième réflexion concernait les TC à deux enroulements : les enroulements 5 VA-5P20 pouvaient-ils convenir aux protections de distance ?

Le fait est que, volontairement, tous les TC étaient identiques et correspondaient au cas le plus défavorable, alors que les lignes étaient de longueurs différentes (de 2 km à 38 km). Les lignes courtes avaient une section de 50 mm², les autres de 150 mm².

En revenant au réel besoin des protections de distance, il s'est avéré que pour 6 départs, la

classe 5 VA-5P20 correspondait à une classe X suffisante quel que soit le choix du primaire du TC (300 ou 600). Pour les deux autres départs, la classe X obtenue n'était satisfaisante que sur le rapport 600/1 ! Solution que le client accepta pour les deux départs de 150 mm².

■ Cette affaire, qui dévoile toutes les conséquences d'une mauvaise réalisation de TC, a pour conclusion : l'idée de tout remplacer est souvent immédiate, mais avec l'aide de spécialistes il est possible d'éviter des pertes de temps et d'argent inutiles.

2.3 Erreurs les plus fréquentes

Elles conduisent généralement à un surdimensionnement des TC ce qui augmente les coûts et peut être dangereux.

De nombreuses erreurs dans la définition des TC proviennent de la méconnaissance de leur fonctionnement ainsi que des caractéristiques inconnues ou incomplètes du composant de réseau à protéger et des protections associées. Plus le fabricant de TC aura d'informations, moins il y aura d'erreurs et plus le TC pourra être optimisé.

Protections et TC classiques

Pour ces protections qui ne nécessitent pas de TC définis en classe X, **les erreurs les plus fréquentes sont les suivantes** :

■ Utiliser deux TC ou un TC à deux enroulements secondaires pour deux relais de protection dont les fournisseurs préconisent des FLP ou des classes de précisions différentes.

Sachant qu'un fabricant de TC sait redéfinir un 10P en 5P (en fonction des niveaux d'induction correspondants), et qu'il sait passer d'un FLP à un autre en jouant sur la puissance, il peut trouver un TC qui couvre le besoin de ces deux relais.

■ Prendre en compte la résistance de la filerie alors que le fabricant de la protection l'a déjà intégrée dans le besoin exprimé pour le TC.

Prenons un exemple avec deux relais dont les fiches techniques indiquent pour des TC 1 A :

TC₁ pour relais 1 : 5 VA-10P15 (avec l'hypothèse $2R_L < 1,5 \Omega$)

TC₂ pour relais 2 : 10 VA-5P15 (avec l'hypothèse $2R_L < 2 \Omega$)

Un seul TC peut convenir pour les 2 relais : a priori un 10 VA-5P15. Il faut :

□ S'abstenir d'ajouter les puissances (5 + 10 VA) demandées pour chaque relais. En effet pour le TC₂, le relais 1 ne représente qu'une charge (au même titre que la filerie) et vice-versa.

□ Vérifier, ici pour le TC₂, que : $2R_L + R_{p1} \leq 2 \Omega$; et si le choix s'était porté sur le TC₁, que : $2R_L + R_{p2} \leq 1,5 \Omega$. Si ce n'était pas vérifié,

le fournisseur du relais peut proposer d'ajouter « x » VA par ohm supplémentaire.

Additionner la puissance prescrite pour plusieurs protections liées à une application conduit à des TC souvent irréalisables ou mettant en jeu la sécurité lors de courts-circuits.

Les relais numériques multifonctions permettent d'éviter ces erreurs. Il suffit de dimensionner le TC pour la protection la plus contraignante (cf. Cahier Technique n° 194).

■ Changer les caractéristiques demandées sans en vérifier les conséquences.

□ Un fabricant de TC ne sait pas faire un TC de faible rapport et propose d'augmenter ce rapport ; prenons un exemple :

- Demandé : TC 30/1 - 2,5 VA-5P20

- Proposition du fabricant de TC : 60/1

- Avec I_n moteur = 16 A et réglage mini de la protection thermique : 40% du I_n du TC soit : $60 \times 0,4 = 24$ A.

Le réglage de la protection à 16 A (réglage normal du relais thermique à I_n du moteur) est alors impossible.

La solution consiste à augmenter le calibre et à diminuer l'exigence au niveau du FLP :

40/1 - 2,5 VA-5P10. Ce TC, réalisable, permet le réglage souhaité ($40 \times 0,4 = 16$ A).

□ Un acheteur accepte une tenue thermique de 0,1 s proposée par le fabricant de TC (au lieu de 1 s).

Conséquence probable : lors d'un court-circuit, si la durée réelle du défaut est supérieure à 0,1 s, la tenue thermique et sans doute aussi la tenue électrodynamique seront insuffisantes, ce qui conduira à la destruction du TC.

■ Par manque d'informations sur le besoin réel.

Prenons le cas suivant, assez pédagogique : un TC à deux primaires et trois secondaires (200-1000/1-1-1) est demandé avec :

- le premier secondaire : 1 A, classe X (V_k donné),

- le deuxième secondaire : 1 A 15 VA classe 0,5 pour la mesure,

- le troisième secondaire : 1 A 10 VA-5P20.

Le fournisseur peut proposer un TC avec trois noyaux magnétiques et des prises au secondaire pour répondre au besoin de 200 A ou 1000 A au primaire. Mais un tel TC est difficile à réaliser car pour obtenir 15 VA-cl. 0,5 et 10 VA-5P20 sur les rapports 200/1, il faut 5 x 15 VA-cl. 0,5 et 5 x 10 VA-5P20 sur les rapports 1000/1 ! De plus il doit respecter la classe X pour les deux rapports !

En fait si dans ce cas, la classe X concerne uniquement le rapport 1000/1 (pour la différentielle jeux de barres) et les rapports 200/1 concernent la mesure et les protections classiques (cf. **fig. 7**), le TC à réaliser est alors bien plus simple, moins encombrant, moins cher et sûrement réalisable. Cet exemple montre que le manque d'information réciproque entre les acteurs est source d'erreurs, de non optimisation. Une consultation mal engagée peut conduire à un TC non réalisable.

■ Prendre en compte l'impédance des relais R_h pour le calcul de la charge réelle (cf. **fig. 8**) dans le calcul des TC pour max I ou dans celui des TC en classe X.

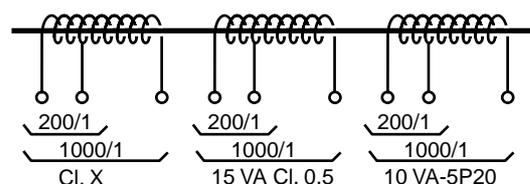
Attention, on ne tient compte de R_h que dans le calcul des TC pour protections max I_h (cf. Cahier Technique n° 194).

Pour les protections différentielles haute impédance, dans le calcul du V_k donné par :

$$2 I_f (R_{ct} + 2R_L + R_a),$$

où R_a = autres charges, R_h ne doit pas intervenir, il s'agit bien de la charge d'une phase (on suppose qu'aucun courant ne circule dans le neutre).

a - Vision du fabricant du TC



b - Le besoin réel

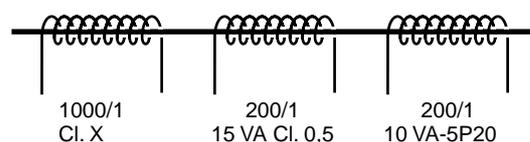


Fig. 7 : exemple de mauvaise compréhension entre donneur d'ordre et fabricant de TC.

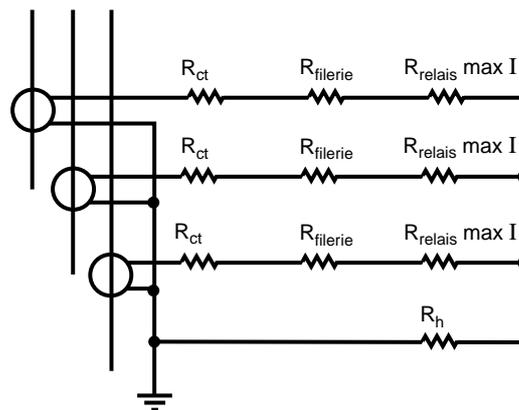


Fig. 8 : impédances internes et de charges d'un TC.

V_k est en effet calculé pour des conditions de stabilité du relais, c'est-à-dire pas de défaut phase ou terre dans la zone protégée, pas de faux déséquilibre, donc I dans la connexion résiduelle = 0 et la tension de cette connexion = 0.

Protections différentielles et classe X

Pour ces applications, les erreurs les plus courantes sont :

■ Demander au fabricant de TC de fournir des TC avec le V_k maximal qu'il peut faire en utilisant un moule standard.

Ce cas se présente lorsque le relais différentiel (marque, type) n'est pas défini.

Trois conséquences :

- surcoût,
- possibilité de surtensions et surintensités importantes au secondaire du TC pouvant entraîner la destruction du circuit et de l'appareillage,
- sans exigences sur le R_{ct} du TC, il n'est pas certain que l'expression du V_k , correspondant au relais utilisé, soit respecté.

Prenons, pour illustrer ce cas, l'exemple d'une différentielle jeux de barres à haute impédance. Le TC qui a été fourni, est un 2000/5, avec $V_k = 400$ V et $R_{ct} = 2,5$ Ω .

Pour le relais utilisé, l'expression à satisfaire est : $V_k \geq 200 R_{ct} + 20$, soit 520 V.

Le $V_k = 400$ V est insuffisant !

Plus grave, l'exigence d'un V_k trop élevé peut conduire à la réalisation d'un TC non standard (cf. les deux premières conséquences ci-avant) nécessitant une résistance stabilisatrice et un dispositif anti-surtension spécialement calculés et réalisés, ainsi que l'utilisation d'une cellule plus profonde !

■ Erreur sur le courant traversant.
 Cette erreur est très fréquente. Prenons l'exemple d'une différentielle haute impédance où l' I_{cc} du tableau est pris en compte au lieu du courant traversant maximal. Il s'agit de protéger un moteur, les TC ont un rapport 100/1.

□ Résultat obtenu avec le courant traversant ($7 I_n$ du TC) :
 $V_k \geq 14 (R_{ct} + 2R_L)$.

□ Résultat obtenu avec l' I_{cc} du tableau ($I_{cc} = 40 \text{ kA}$) :
 $V_k \geq 800 (R_{ct} + 2R_L)$

Il n'est pas nécessaire de faire de longs discours pour comprendre l'intérêt de choisir le bon paramètre !
 Le tableau de la **figure 9** indique les valeurs des courants traversants à prendre en compte lorsque le courant traversant est à la base de calcul du TC (cf. Cahier Technique n° 194)

■ Avec des protections différentielles de ligne, prendre en compte les fils pilotes dans le calcul de $R_{filerie}$.
 En effet, R_L est donnée par la filerie reliant les TC au relais situés du même coté (extrémité) de la ligne (cf. **fig. 10**).
 Il ne faut pas prendre en compte la longueur des fils pilotes qui vont d'une extrémité à l'autre de la ligne surveillée.

Rappels

Concernant les différentielles haute impédance :

- Pour le calcul du V_k mini, prendre en compte le courant traversant (cf. **fig. 9**).
- Le calcul de la résistance stabilisatrice R_{st} est fonction du V_k mini et du courant de réglage du relais.
- Le calcul de la tension crête (V_p) se fait à partir du I_{cc} interne à la zone protégée et du V_k réel du TC.

Applications	I_{max} traversant	I_{max} traversant par excès	Commentaires
Différentielle JdB	I_{cc} réel tableau	I_{th} tableau	prendre I_{cc} réel si pas d'augmentation possible. Sinon prendre I_{th}
Différentielle moteur	I démarrage moteur	$7 I_n$ moteur à défaut $7 I_n$ TC	Si on ne connaît ni le I de démarrage ni I_n moteur prendre $7 \times I_n$ TC
Différentielle générateur	I_{cc} du générateur seul soit : $I_n (100 / X'')$	$7 I_n$ générateur à défaut $7 I_n$ TC	X'' = réactance sub-transitoire en % du générateur. Si inconnue on suppose X'' % ≥ 15 soit : $100/15 = 6,67$ (on prend 7 par excès)
Différentielle de terre restreinte	I_{cc} vu au primaire du TC pour un défaut au secondaire du transformateur, soit $I_{cc} = P_{cc} / U\sqrt{3}$ $P_{cc} = (P_t P_a) / (P_t + P_a)$	si P_a inconnue, on prend $P_{cc} = P_t$ $P_t = P_n (100 / U_{cc})$	P_a = puissance de court circuit amont et P_t = puissance limitée par le transformateur U_{cc} % = tension de court circuit du transformateur
Différentielle de ligne	I_{cc} à 80 % de la ligne	à défaut I_{cc} tableau	à défaut I_{th} tableau

Fig. 9 : bien déterminer le courant traversant.

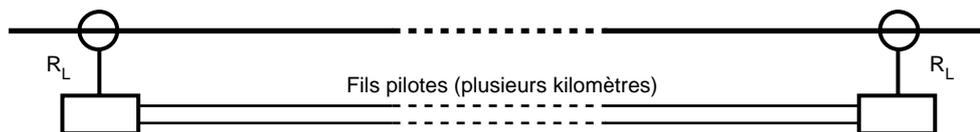


Fig. 10 : R_L est donné par la filerie entre TC et relais situés du même coté de la ligne.

2.4 Et si un TC n'est pas réalisable ?

Lorsqu'un fabricant de TC dit qu'il ne sait pas fabriquer le TC demandé, c'est neuf fois sur dix qu'il a été mal spécifié. Pour éliminer toutes les marges de sécurité cumulatives prises par tous les intervenants, il faut redéfinir le TC à partir du besoin réel :

- courants réels dans l'installation,
- types de protection, puissance nécessaire,
- étude de sélectivité et plan de protection (réglages).

Cette démarche doit être entreprise chaque fois que la spécification conduit à un TC non standard. Ce sont les coûts, les délais, la sécurité qui sont en jeu.

Prenons un exemple :

On a calculé la classe X d'un TC 1000/5 pour une protection différentielle groupe, en prenant l'hypothèse que $X'' = 15\%$.

Ne connaissant pas les caractéristiques précises du groupe, on a pris I_n du groupe = I_n du TC,

ce qui nous a donné : $I_f = \frac{100}{15} I_n$ du TC

soit : $V_k \geq 2 \times 6,7 \times 5 (R_{ct} + 2R_L)$
de 6,7 on a arrondi à 7.

On a supposé :

$2R_L = 300$ m de $2,5 \text{ mm}^2$ soit $2,4 \Omega$

d'où : $V_k \geq 70R_{ct} + 168$.

Ce TC nécessitant deux autres enroulements, cette valeur n'était pas réalisable dans le moule standard.

La solution a été trouvée en utilisant des liaisons de 4 mm^2 et en faisant préciser les caractéristiques du groupe. Alors :

$2R_L = 1,5 \Omega$

I_n du groupe = 830 A,

$X'' = 25\%$, d'où :

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

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

La différence est notable et démontre l'intérêt d'avoir les bonnes informations et de connaître les marges de sécurité.

Si le TC est déclaré irréalisable, il faut trouver une solution, un compromis, entre les acteurs. Il y a toujours une issue, elle peut être trouvée avec l'aide de spécialistes.

A titre d'exemple, quelques pistes :

- jouer sur les équivalences entre TC (cf. chapitre suivant),
- diminuer le coefficient de sécurité (par exemple 2 à 1,5 pour une protection max de I),
- passer le secondaire de 5 à 1 A (cf. fig. 11),
- augmenter la section de la filerie,
- surcalibrer les TC (I_n primaire),
- déplacer le relais par rapport aux TC,
- utiliser des TC recalibres à faible consommation,
- ...

Le surcalibrage d'un TC peut résoudre un problème de non faisabilité

Prenons deux exemples :

- Un TC 100/1 dont la charge est de 2,5 VA nécessite pour une protection max de I, un FLP de 25.

Les TC standard qui sont proposés font 2,5 VA-5P20. Si on propose un TC de rapport 150/1 - 2,5 VA-5P20, le besoin en FLP sera réduit dans le rapport des primaires des TC soit FLP nécessaire = $25 \times (100/150) = 16,7$, le FLP de 20 devient donc suffisant !

- Si la classe X demandée pour un TC est proportionnelle à un courant traversant ou à un I_{cc} primaire, ces valeurs sont multipliées par le rapport de transformation du TC ; ainsi la tension de coude requise sera moindre pour un TC surcalibré, sauf si sa résistance R_{ct} qui augmente vient neutraliser le bénéfice du rapport de transformation.

Dans tous les cas, on saura réaliser une tension de coude plus élevée qu'avec un TC de rapport plus faible car elle est proportionnelle au nombre de spires secondaires.

Globalement, la chance d'avoir des caractéristiques réalisables sera plus élevée.

Longueur (m)	5	10	20	50	100	200	400
Pertes fileries (VA) pour :							
$I_n = 1 \text{ A}$	0,04	0,08	0,16	0,4	0,8	1,6	3,2
$I_n = 5 \text{ A}$	1	2	4	10	20	40	80

Fig. 11 : pertes dans la filerie pour une section de $2,5 \text{ mm}^2$ ($8 \Omega/\text{km}$ à 20° C). Avec 1 A, les pertes sont 25 fois plus faibles.

Le même raisonnement peut être tenu pour un TC de secondaire 1 A comparé à un TC 5 A ; toutefois, le gain de facteur 5 obtenu sur la formule par le rapport de transformation est souvent complètement gommé, sinon inversé, par une augmentation beaucoup plus conséquente de la résistance de l'enroulement secondaire. En effet, l'encombrement nécessité par le nombre de spires x 5, conduit à réduire la section de la filerie, ce qui augmente bien entendu sa résistance linéaire et la nouvelle résistance peut ainsi largement être multipliée par 10 par rapport au TC 5 A.

■ Lorsqu'on est tenté de proposer un surcalibrage de TC, on doit vérifier les répercussions du changement de rapport.

Exemple :

□ Si le TC alimente une différentielle à fils pilotes, il faut s'assurer que le TC correspondant à l'autre bout de la ligne subit lui aussi la même transformation.

□ S'il s'agit d'une protection de terre restreinte, il faut s'assurer que :

- le TC de point neutre est lui aussi modifié,
- la détection du défaut terre n'est pas compromise par le surcalibrage.

□ Pour tous les types de protection, il faudra vérifier que le réglage de la protection reste possible.

Optimisation des TC d'une protection différentielle

Prenons l'exemple d'une protection différentielle de transformateur (cf. fig. 12)

■ Calcul du courant traversant

L'impédance du transformateur limite le courant

traversant à : $(P_{cct} = \frac{5 \times 100}{8} = 62,5 \text{ MVA})$.

□ La puissance de court-circuit devient :

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

□ Le courant traversant au secondaire est :

- coté 11 kV :

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

- coté 3,3 kV :

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

■ Formules à appliquer pour V_k (protection classique)

□ Calcul des TC recailleurs de rapport : $\frac{5}{5/\sqrt{3}}$

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

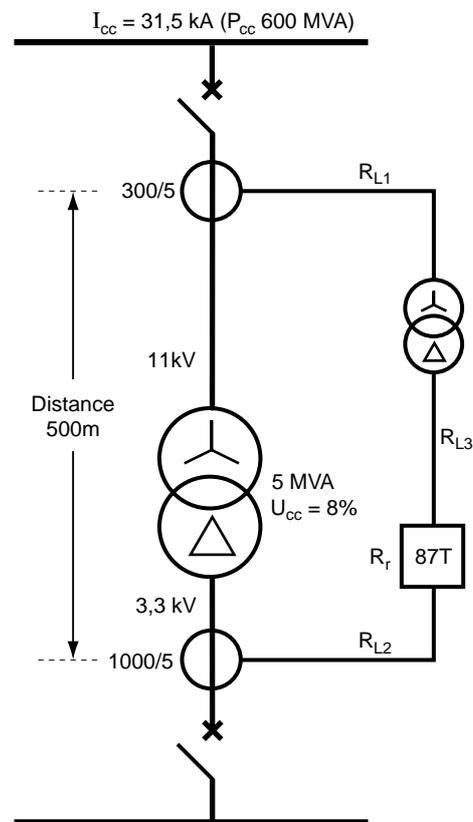


Fig. 12 : protection différentielle de transformateur.

□ Calcul des TC principaux

- coté 11 kV : 300/5

$$V_{k \text{ p1 min}} = 4I_{f1} (R_{ct} + R_{L1} + R_{sp}) + V_{ka \text{ mini}} \frac{5}{5\sqrt{3}}$$

- coté 3,3 kV : 1000/5

$$V_{k \text{ p2 min}} = 4I_{f2} (R_{ct} + R_{L2} + R_r)$$

■ Démarche d'optimisation

Examinons le cas du TC 300/5 placé dans le tableau 11 kV

□ Première hypothèse

Le TC recaleur $\frac{5}{5/\sqrt{3}}$ est celui que propose en

standard le relayer ; il est situé avec le relai coté 3,3 kV. La filerie est partout en 2,5 mm².

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

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

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

$R_{sr} = 0,25 \Omega$, résistance enroulement secondaire TC recaleur,

$R_{sp} = 0,15 \Omega$, résistance enroulement primaire TC recaleur,

$R_p = 0,02 \Omega$, résistance du relai.

On trouve :

$$- V_{ka \text{ mini}} = 43,7 \text{ volts, (} V_{ka} \text{ du standard} = 58 \text{ V),}$$

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

□ Deuxième hypothèse

Identique à la première excepté que la filerie de R_{L1} est en 10 mm^2 d'où $R_{L1} = 1 \Omega$

Le résultat est :

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

□ Troisième hypothèse

Le TC recaleur est du côté 11 kV ainsi que le relais : $R_{L1} = 0,08 \Omega$

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

□ Quatrième hypothèse

Identique à la troisième hypothèse, sauf le TC recaleur qui n'est pas standard, mais imposé au fabricant de TC avec :

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

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

ce qui conduit à :

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

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

On constate qu'en modifiant la section de la filerie, la position et les caractéristiques du TC recaleur, le gain sur le V_k mini nécessaire du TC 300/5 est de l'ordre de 800 V.

La même démarche effectuée pour le TC 1000/5, situé coté 3,3 kV, donne des résultats assez voisins concernant le V_k ; mais compte-tenu du fait qu'un TC 1000/5 est plus facile à réaliser qu'un TC 300/5, il est plus intéressant de placer le relais et le TC recaleur coté 11 kV.

Dans le cas de l'utilisation de TC 1 A, les mêmes hypothèses que ci-dessus permettent de passer de :

$$- V_{kp1} = 39,6 R_{ct} + \mathbf{249} \text{ à } V_{kp1} = 39,6 R_{ct} + \mathbf{17}$$

Les TC 1 A peuvent être plus faciles à réaliser qu'en 5 A, mais tout dépend du poids relatif du R_{ct} et de la filerie dans l'expression du V_k .

3. Equivalence des différentes définitions possibles d'un même TC

Dans beaucoup de cas il est nécessaire de savoir « jongler » entre les différentes caractéristiques des TC : rapport, puissance, classe, FLP. Ceci pour sortir d'une situation de blocage, mais aussi pour pouvoir utiliser des TC standard, disponibles, moins coûteux et testés.

Nous allons donc, dans ce chapitre, faire œuvre utile en montrant comment on peut jouer avec les caractéristiques d'un TC. Avant cela, il convient de rappeler que les seules constantes d'un TC sont sa courbe de magnétisation et sa résistance, et bien sûr son rapport de transformation.

3.1 Comment passer de P_{n1} -5Pk₁ à P_{n2} -5Pk₂

V_{s1} et R_{ct} sont figés.

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

Sachant que $P_i = R_{ct} I_n^2$ (pertes ohmiques internes du TC), on obtient :

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

Quelquefois certains négligent P_i : c'est une grave erreur car P_i peut être du même ordre de grandeur, sinon plus élevé, que P_n .

■ si P_{n2} est imposé, on aura :

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

■ si k_2 est imposé, on aura :

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

ou bien :

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

3.2 Comment passer de P_{n1} -5Pk₁ à P_{n2} -10Pk₂

On a :

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

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

Or :

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

■ si P_{n2} est imposé :

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

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

■ si k_2 est imposé, on aura :

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

Si l'on désire passer d'une définition 10P à une définition 5P, les expressions ci-dessus sont applicables ; il suffit d'inverser le rapport des inductions.

3.3 Quel est le V_k d'un TC : P_n -XPk

Comment passer de P_n -5Pk à V_k

On a vu que :

$$V_{s_1} = \left(R_{ct} + \frac{P_{n_1}}{I_n^2} \right) k I_n$$

$$\text{et } V_k = \frac{1,4}{1,6} V_{s_1}$$

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

Comment passer de P_n -10Pk à V_k

On a de même :

$$V_k = \frac{1,4}{1,9} V_{s_2}$$

d'où

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

3.4 Comment passer d'une classe X (V_k , R_{ct}) à une classe 5P : P_n -5Pk

■ Supposons que le k soit imposé, on aura :

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

Si le résultat est négatif, ceci signifie que le FLP demandé n'est pas possible à obtenir avec ce TC car ses pertes internes sont trop importantes.

■ Supposons que le P_n soit imposé, alors :

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

Note :

Dans ce chapitre, les niveaux d'induction : 1,4 - 1,6 - 1,9 sont donnés à titre d'exemple car ils varient d'un fabricant à l'autre.

4. Conclusion

Ce Cahier Technique complète le Cahier Technique n° 194 dans son objectif de sensibiliser les intervenants, de la chaîne qui conduit de la conception d'un réseau électrique à la mise en œuvre des protections, aux pertes de temps et d'argent qui résultent d'une mauvaise spécification des TC. Il donne en particulier quelques exemples d'erreurs à ne pas commettre et des pistes de solution lorsque la spécification d'origine n'est pas satisfaisante ou lorsque, a priori, c'est l'impasse.

Il souligne que si la communication avec le fabricant du TC, particulièrement la connaissance des niveaux d'induction, permet de trouver une solution en jouant sur les équivalences, c'est en cernant le juste besoin, à toutes les étapes, que la solution optimisée peut être trouvée.

Nous espérons donc que ce document vous sera utile et profitable.

Bibliographie

Normes

- CEI 60185 : Transformateurs de courants - Caractéristiques.
- CEI 60044-1: Transformateurs de mesure - Partie 1 : Transformateurs de courant (remplace le CEI 185).
- CEI 60044-8 : Transformateurs de mesure - Partie 8 : Transformateurs de courant électroniques.
- NF-C 42-502 : Instruments de mesure - Transformateurs de courant - Caractéristiques.
- BS 3938 : Transformateurs de courant - Spécifications.

Cahiers Techniques Schneider

- Protection des machines et des réseaux industriels HT.
P. ROCCIA, Cahier Technique n° 113.
- Le transformateur de courant pour la protection en HT.
M. ORLHAC, Cahier Technique n° 164.
- Protection des réseaux HTA industriels et tertiaires.
A. SASTRE, Cahier Technique n° 174.
- Les protections directionnelles.
P. BERTRAND, Cahier Technique n° 181.
- Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels.
B. DE METZ NOBLAT et G. JEANJEAN, Cahier Technique n° 185.
- Transformateurs de Courant : comment les spécifier.
P. FONTI, Cahier Technique n° 194.

Ouvrages divers

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

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Fax : 33 (0) 4 76 57 98 60

Réalisation : AXESS - Valence (26)
Edition: Schneider Electric
Printing: Imprimerie du Pont de Claix - Claix - 1000
- 100 FF -