



n° 164

le transformateur de courant pour la protection en HT

Michel Orlhac

Diplômé de l'Ecole Centrale de Paris en 1977.

Après une année de spécialisation à l'université de Stuttgart (RFA), il entre au service projets à l'exportation de la société Stein Heurtey (engineering sidérurgique). Entré chez Merlin Gerin en 1980 au service technique du département Préfabriqués et Spéciaux Haute Tension (P.S.H.T.), il effectue une étude sur les transformateurs de courant. Le présent Cahier Technique publie les résultats de cette étude.

Il est maintenant responsable marketing dans la société France-Transfo filiale du Groupe Merlin Gerin.

le transformateur de courant pour la protection en H.T.

sommaire

1. Rappels théoriques		p. 4
	Hystérésis - Saturation	p. 5
	Caractérisation des TC	p. 6
2. Généralités sur les protections de courant	Les transformateurs de courant	p. 7
	Les TC fonctionnels	p. 8
	Les relais de protection	p. 8
	Evolution technologique	p. 8
3. Réponse d'un TC en régime saturé	Expérimentation - Montage	p. 9
	Essai avec courants permanents symétriques	p. 10
	Essai avec courants asymétriques	p. 11
	Conclusions sur les TC débitant sur un relais «à maxi d'intensité»	p. 12
4. Fonctionnement en parallèle des cellules		p. 14
5. Conclusions générales		p. 16
Annexe : normes relatives aux TC	NF C 42-502	p. 17
	CEI 185	p. 19

Les Transformateurs de Courant -TC- sont des éléments encombrants dans les cellules HT. Une bonne connaissance de leur fonctionnement permet :

- de minimiser leur encombrement et parallèlement leur coût,
- d'utiliser des TC standardisés dans un plus grand nombre de configurations.

L'étude qui suit permet de mieux connaître le fonctionnement des TC en association avec des relais de protection et de donner quelques règles pour les dimensionner correctement.

Après quelques rappels théoriques sur le fonctionnement des TC et sur les protections d'intensité, le comportement de l'association TC-relais de protection est étudié dans deux cas particulièrement importants en HT :

- le cas du relais à maximum d'intensité alimenté par un TC fortement saturé,
- le cas du relais de protection branché sur deux TC en parallèle dans des cellules en duplex.

Ils sont complétés de résultats expérimentaux.

1. rappels théoriques

Les transformateurs de courant sont constitués d'un circuit magnétique en forme de tore. Le primaire est constitué de n_1 spires ou peut se réduire à un simple conducteur traversant le tore ($n_1 = 1$). Le secondaire est bobiné en n_2 spires de façon régulière autour de ce tore (cf. fig. 1 et 2).

Le théorème d'Ampère énonce que la somme des ampères tours est égale à la circulation du vecteur champ magnétique.

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = \int_{\text{Tore}} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot dl$$

\vec{H} = champ magnétique

\vec{n} = vecteur unitaire tangent

Un transformateur est dit parfait lorsque

$$\int_{\text{Tore}} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot dl = 0$$

Dans le transformateur réel ce terme exprime l'erreur introduite par le circuit magnétique et définit l'intensité d'excitation i_e née au secondaire par :

$$n_1 \cdot i_1 + n_2 \cdot i_2 = n_2 \cdot i_e$$

Si $n = \frac{n_2}{n_1}$ est le rapport du nombre de spires, la relation s'écrit :

$$\frac{i_1}{n} + i_2 = i_e$$

Le transformateur peut alors être représenté (cf. fig. 3) comme comportant deux éléments en parallèle :

- un transformateur parfait de rapport n débitant au secondaire un courant i_1/n ,
- une impédance qui consomme un courant i_e .

De plus chaque enroulement, primaire et secondaire, crée une légère chute de tension due à la résistance du bobinage (R_1 et R_2) et aux inductances de fuite (l_1 et l_2). Dans le cas du TC le bobinage secondaire étant serré et régulier il est possible de négliger l_2 .

Si ϕ est le flux commun aux deux bobinages, il est possible d'écrire entre les fem e_1, e_2 et les ddp v_1, v_2 les relations suivantes :

$$v_1 = e_1 + R_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$e_2 = v_2 + R_2 \cdot i_2 + l_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$e_1 = n_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \text{ et } e_2 = -n_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

Si toutes les fonctions décrites sont sinusoïdales de pulsation ω on peut alors écrire vectoriellement :

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + (R_1 + j\ell_1 \cdot \omega) \cdot \vec{I}_1$$

$$\vec{E}_2 = \vec{V}_2 + R_2 \cdot \vec{I}_2$$

$$\vec{E}_1 = jn_1 \cdot \omega \cdot \vec{\Phi} \cdot \vec{E}_2 = -jn_2 \cdot \omega \cdot \vec{\Phi}$$

$$\frac{\vec{I}_1}{n} + \vec{I}_2 = \vec{I}_e$$

Le schéma électrique de la figure 3 et les équations (1) conduisent à la représentation vectorielle de la figure 4.

L'intensité d'excitation \vec{I}_e est décomposée sur les axes $\vec{\Phi}, \vec{E}$ en :

$$\vec{I}_e = \vec{I}_a + \vec{I}_m$$

■ \vec{I}_a représente la part de ce courant perdue dans le circuit magnétique (pertes fer provenant de l'hysteresis et des courants de Foucault).

■ \vec{I}_m est le courant magnétisant qui assure le processus de transfert de puissance d'un enroulement à l'autre par création d'une force magnéto-motrice qui induit le flux $\vec{\Phi}$.

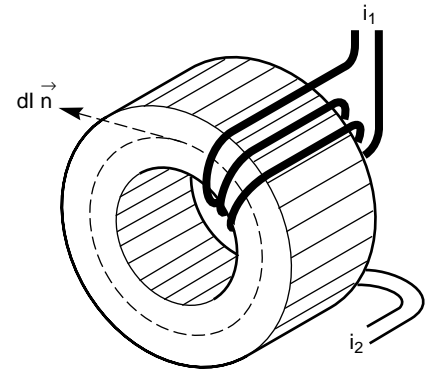


fig. 1.

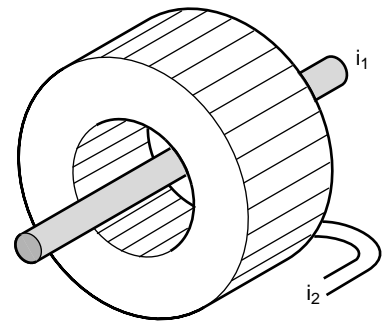


fig. 2.

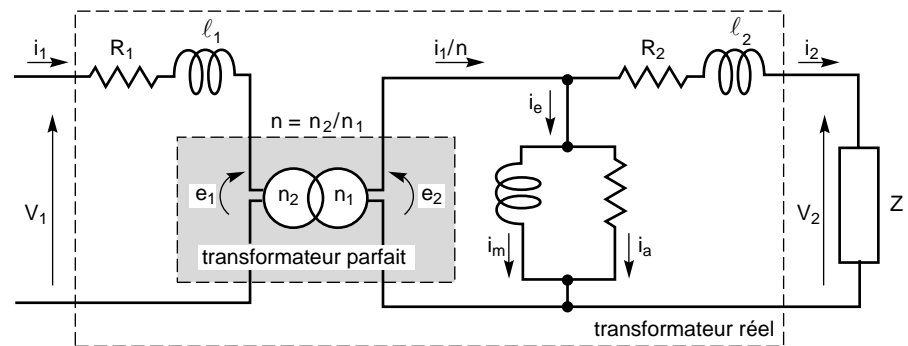


fig. 3 : schématisation des TC.

hystérésis - saturation

La qualité du circuit magnétique est traduite par la relation qu'il impose entre le vecteur induction B et le vecteur champ magnétique H .

A un instant donné, en un point fixé ces deux vecteurs sont liés par la perméabilité relative du matériau magnétique μ_r tel que :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

Un circuit magnétique est donc caractérisé par la courbe $b = f(h)$ appelée courbe de magnétisation.

Suivant les types de matériaux on obtient les différentes courbes de la figure 5, résultats d'une excitation sinusoïdale (courant primaire).

En régime sinusoïdal, b représente la tension puisque :

$$\vec{B} = \frac{\Phi}{S} \cdot \vec{n}$$

$$\vec{E}_2 = n_2 \cdot j\omega \cdot \vec{\Phi}$$

$$\vec{V} \approx \vec{E}_2$$

h représente l'intensité d'excitation car

$$n_2 \cdot I_e = \int_{\text{Tore}} \vec{H} \cdot \vec{n} \cdot dl$$

en supposant que

$$\vec{H} \cdot \vec{n} = H = \text{constante}$$

$$n_2 \cdot I_e = L \cdot H$$

Transformateur parfait

La perméabilité du milieu est supposée infinie

$$\vec{H} = 0 \text{ d'où } I_e = 0 \text{ et } I_2 = \frac{I_1}{n}$$

Cette hypothèse est proche de la réalité avec les TC car ils «travaillent» normalement très en-dessous de la saturation. I_2 est alors l'image fidèle de I_1 .

Transformateur linéaire

La perméabilité du milieu est constante $B = \text{Cste} \times H$ d'où i_e et i_2 sont des fonctions sinusoïdales.

Transformateur saturable sans hystérésis

La saturation traduit la variation assez brutale de μ_r d'une valeur grande à une valeur faible au point appelé «coude de saturation». L'induction b ne croît alors que lentement et i_e se déforme en présentant une pointe.

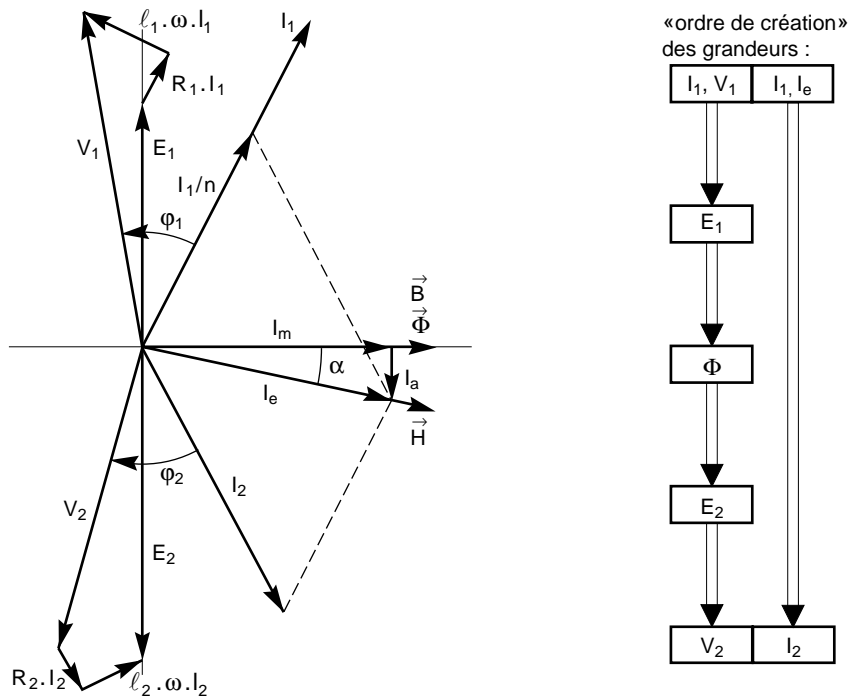


fig. 4 : représentation vectorielle d'un TC.

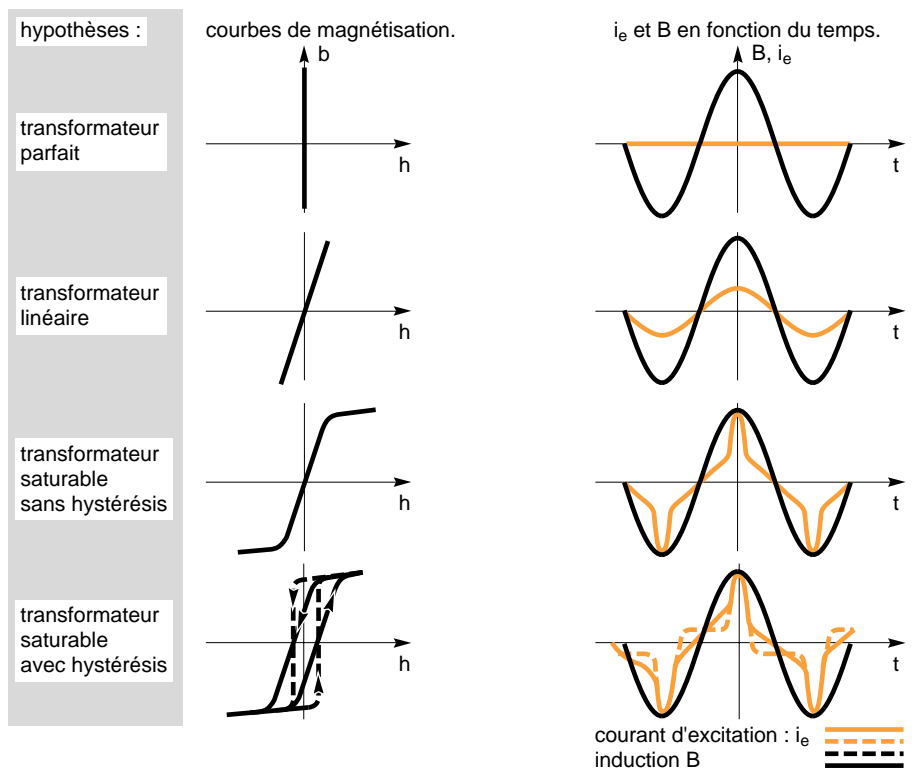


fig. 5 : courbes de magnétisation et leurs incidences sur i_e .

Transformateur saturable avec hystérésis

La courbe de magnétisation est dédoublée, traduisant la résistance du circuit magnétique aux variations d'induction. La courbe i_e présente alors un « balancement » caractéristique.

La courbe de magnétisation d'un TC peut facilement être observée à l'aide d'un oscilloscope. On applique au secondaire une tension $V_2(t)$ sinusoïdale (le primaire n'étant pas chargé). L'intensité $i_e(t)$ absorbée représente alors l'intensité d'excitation, elle est proportionnelle au vecteur champ magnétique H .

L'intégration de la tension V_2 représente le flux ϕ_2 qui est proportionnel au vecteur induction magnétique \vec{B} (cf. fig. 6a).

Intégrer une valeur sinusoïdale entraîne une rotation de $\pi/2$ (90°).

Il suffit donc, sur un oscilloscope :

- de réaliser le balayage avec i_e ,
- d'appliquer la tension V_2 sur l'amplificateur vertical.

On obtient ainsi la courbe de magnétisation du matériau (cf. fig. 6b).

caractérisation des TC

Les TC sont caractérisés dans la pratique par les grandeurs suivantes (d'après les normes NF C 42-502 et CEI 185).

Tension du TC

C'est la tension de service à laquelle le primaire du TC est soumis. Rappelons que le primaire est au potentiel de la HT et que le secondaire (qui ne doit jamais être ouvert) a très généralement une de ses bornes à la terre.

Comme pour tout matériel, on définit également une tension maximale de tenue pendant 1 mn à fréquence industrielle et une tension maximale de tenue à l'onde de choc (voir les normes en annexe).

Ex. : pour une tension nominale de 24 kV, le TC doit supporter 50 kV durant 1 mn à 50 Hz et 125 kV à l'onde de choc.

Le rapport nominal de transformation

Il est donné généralement sous la forme : I_1/I_2 .

I_2 est très généralement 5 A ou 1 A (pour les valeurs nominales de I_1 voir les normes en annexe).

La classe de précision nominale

Il y a deux formulations suivant l'utilisation du TC en mesure ou en protection :

- pour les TC de mesure
L'erreur en module

$$\epsilon_M = \frac{I_1/n - I_2}{I_1/n} = \frac{I_2}{n}$$

L'erreur en phase

$$\epsilon_\phi = (I_1, I_2) 10^{-2} \text{ rd}$$

Il est donné une classe de précision X (généralement 0,5 ou 1) qui exprime des valeurs limites de l'erreur en module ϵ_M et de l'erreur de déphasage ϵ_ϕ en fonction du taux de charge N :

$$N = \frac{I_1}{I_{1n}} \quad (N \text{ variant de } 0,1 \text{ à } 1,2)$$

pour $N = 1$ $\epsilon_M = X$ (en classe 0,5 pour $I_1 = I_{1n}$ on a $\epsilon_M = 0,5\%$)

(pour le détail des valeurs voir les normes en annexe).

- pour les TC de protection

L'erreur composée ϵ_c

$$\epsilon_c = \frac{1}{I_1/n} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (i_2 - \frac{i_1}{n})^2 \cdot dt$$

Le TC de protection est caractérisé par 3 symboles Y, P, F_p :

Y = taux d'erreur (5 ou 10),

P = protection,

F_p = facteur limite de précision qui exprime les valeurs limites des erreurs $\epsilon_M, \epsilon_\phi, \epsilon_c$ en fonction du taux de charge N.

Pour $N = F_p$

$$\epsilon_c = Y$$

(en classe 10P5 pour $I_1 = 5 \cdot I_{1n}$ on a : $\epsilon_c = 10\%$)

(pour le détail des valeurs voir les normes en annexe).

Pour un TC travaillant à une induction nominale B_n , on définit également un coefficient de saturation K_s tel que :

$$K_s = \frac{B_s}{B_n}$$

où B_s est l'induction de saturation qui caractérise le matériau du noyau.

En pratique $K_s \approx F_p$ et ils sont souvent confondus dans les calculs.

La puissance de précision

Exprimée en VA, elle indique la puissance que le secondaire peut délivrer en respectant la classe de précision nominale Y, P, F_p .

Elle représente la consommation totale du circuit secondaire (hors TC) égale à la consommation de tous les appareils connectés ainsi que celle des fils de liaison.

(pour les valeurs nominales, voir les normes en annexe).

Il faut savoir que moins le TC est chargé (plus il est en-dessous de sa puissance de précision Y), meilleure est sa précision. Sa précision réelle est donc supérieure à sa précision nominale F_p . Ce point est développé dans le chapitre 3.

Courant de courte durée admissible

Exprimé en kA, c'est le courant I_{th} maxi admissible pendant une seconde.

(Le secondaire étant en court-circuit).

Il représente la tenue thermique du TC aux surintensités.

(les valeurs normalisées sont données dans les normes en annexe).

Pour les temps différents de 1 seconde,

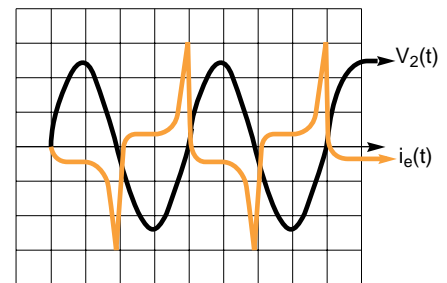
la loi de conservation de la chaleur

$I^2 \cdot t = \text{cste}$ peut être appliquée :

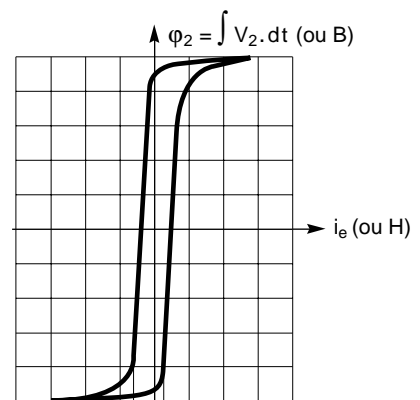
pour $t < 1$ sec. le calcul donne $I > I_{th}$ ce qui conduit à augmenter les efforts électrodynamiques.

Or, la valeur limite garantie est de

$$I_{dyn} = 2,5 \cdot I_{th}$$



a - échelles : $i_e = 0,25$ A par carreau
 $V_2 = 50$ V par carreau.



b - échelles : $i_e = 0,25$ A par carreau
 $\phi_2 = 0,077$ V.s par carreau.

fig. 6 : relevé oscillographique des courbes $i(t)$ $V_2(t)$ et $h(b)$ d'un TC, 50/5, 15 VA, 10P20 avec : $V_2 = 83$ V et $i_e = 0,26$ A.

2. généralités sur les protections de courant

Les protections ont des fonctions multiples car elles doivent :

- protéger le matériel de la destruction ou de la détérioration à la suite de défauts (court-circuit, surcharge...),
- assurer l'exploitation normale de l'ensemble de l'installation avec ses équipements (pilotage, délestage...),
- assurer la sécurité du personnel.

les transformateurs de courant

Comme il n'est pas possible de brancher directement les relais sur le réseau MT, les informations qu'ils reçoivent proviennent de transformateurs de courant, TC (cf. fig. 7) et de transformateurs de potentiel, TP. Lorsque l'intensité primaire est importante, les TC sont à barre traversante ; lorsqu'elle est faible, ceux-ci sont à primaire bobiné.

Du point de vue électrique, les TC ont plusieurs rôles :

- délivrer à leur secondaire une intensité, image fidèle de celle qui circule, dans le conducteur HT concerné,
- assurer l'isolement galvanique entre la HT et les circuits de mesure et de protection,
- protéger les circuits de mesure et de protection de toute détérioration lorsque survient un défaut sur le réseau HT.

Avec cette image de l'intensité dans le conducteur HT, le relais élabore à son tour un ordre de déclenchement en fonction du type de protection qu'il réalise et des valeurs auxquelles il a été pré-réglé [seuil(s), temporisation(s)...].

Cet ordre est transmis à un ou plusieurs appareils de coupure (disjoncteur, contacteur, interrupteur). Suivant le type de protection à réaliser, les TC sont associés et utilisés selon des schémas différents.

Protection type maxi d'intensité (cf. fig. 8)

Elle utilise directement l'information « courant » délivrée au secondaire du TC pour détecter les courants de court-circuit, de surcharge ou calculer l'état



TC à enroulement primaire traversant (câble)
1 secondaire - 600/1



TC de type bobiné à enroulement primaire bobiné
1 secondaire - 200/5



TC de type bobiné à enroulement primaire bobiné
2 secondaires - 200/5 et 100/5

fig. 7 : différents types de TC.

thermique d'une machine. A noter qu'il faut ajouter dans ce type de schéma les protections qui utilisent en plus des TP :

- protection à maximum de courant directionnel,
- protection de puissance (active ou réactive).

Protection différentielle (cf. fig. 9)

Elle mesure la différence de courant entre deux TC branchés l'un en aval, l'autre en amont d'une partie du réseau à surveiller (un moteur, un transformateur, un jeu de barres...) pour détecter et isoler rapidement tout défaut interne à cette partie.

Protection homopolaire

Elle surveille la composante, homopolaire I_0 du courant triphasé qui apparaît lors de défauts phase-terre. Deux schémas sont possibles :

- un transformateur tore en serrant les trois conducteurs de phase (si cela est réalisable). Ce montage (cf. fig. 10a) permet de détecter les courants homopolaires faibles (1 à 100 A),
- trois TC réalisant dans la connexion neutre de leur secondaire la somme des trois courants de phase. Ce montage (cf. fig. 10b) est le seul utilisable dans le cas de câbles encombrants et nombreux ou de gaine à barre. Il est déconseillé lorsque le courant homopolaire à détecter est inférieur à 5 % de I_n (voire 12 % pour les postes d'abonnés d'après la norme NF C 13-100).

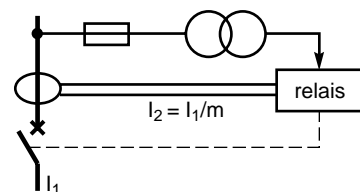


fig. 8.

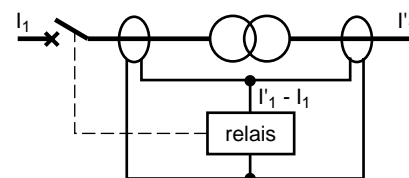


fig. 9.

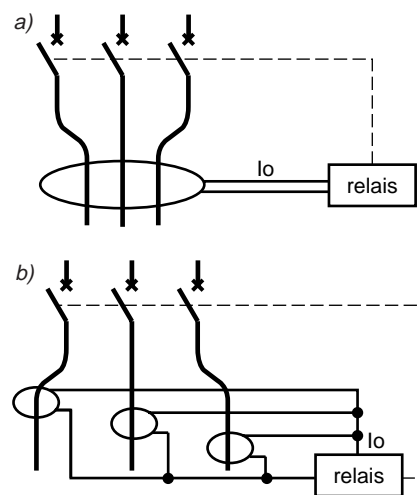


fig. 10.

les TC fonctionnels

Dans une cellule HT la fonction «transformateur de courant» prend une dimension nouvelle du fait de son contenu et de sa forme.

Ainsi :

- plusieurs TC peuvent être moulés dans la même enveloppe : un noyau pour la fonction mesure, un noyau pour la fonction protection et parfois un troisième noyau pour réaliser la protection différentielle,
- l'enveloppe est utilisée pour assurer l'isolation entre deux compartiments et l'embrochage de l'appareil de coupure : le TC est alors dit «fonctionnel». Un exemple d'application est donné dans les cellules «metalclad» pour appareillage débouché (cf. fig. 11 et 12).

On diminue ainsi l'encombrement global en utilisant une seule enveloppe isolante la mieux adaptée et ce faisant, on diminue aussi les coûts.

les relais de protection

Les matériels disponibles à ce jour reposent sur les trois technologies : électromécanique, analogique et numérique.

La plus ancienne est la technologie électromécanique, les relais sont simples et spécialisés (contrôle du courant, de la tension, de la fréquence,...) mais d'une faible précision, leurs réglages sont susceptibles de dérive dans le temps.

Les deux dernières présentent les avantages apportés par l'électronique (cf. fig. 13) :

- encombrement réduit de l'appareil,
- faible puissance nécessaire à l'acquisition de l'information «courant» (quelques fractions de VA),
- temps de réponse indépendant du courant reçu par le relais,
- fiabilité accrue par l'absence de pièces mécaniques (pas d'encrassement ou corrosion, insensibilité aux chocs),
- prix faible car ils utilisent des composants électroniques non spécifiques fabriqués en série.

Enfin dans les années 80, la technologie numérique a permis grâce à la puissance de traitement des microprocesseurs, de réaliser des unités de traitement de l'information qui peuvent :

- assurer globalement les diverses protections,

- remplacer le relayage (automatisme) de la cellule,

- fournir à l'exploitant la mesure des paramètres électriques.

Ces unités à vocation étendue sont :

- flexibles (le choix des protections se fait par une simple programmation),
- paramétrables (choix de réglages étendu),

- fiables (elles sont équipées d'auto-surveillance ou chien de garde et d'auto-test),

- économiques (leur câblage et leur temps de mise en œuvre sont réduits).

Elles permettent en outre de réaliser, grâce à des algorithmes performants et à leurs communications numériques, des fonctions supplémentaires telles que la sélectivité logique.

Profitant de cette capacité à communiquer, une véritable conduite de réseau (similaire à la gestion technique d'une installation industrielle) est maintenant réalisable.

Enfin leurs capacités d'acquisition et de traitement des informations, en provenance des capteurs, leur permettent d'exploiter pleinement les performances des nouveaux capteurs amagnétiques.

évolution technologique

Dans ce domaine des capteurs de courant, la tendance à employer des capteurs à large bande de mesure à la place des transformateurs d'intensité (1 ou 5 A) s'affirme. De tels capteurs conçus par l'application du principe de Rogowski (capteurs amagnétiques) sont commercialisés. Ils apportent aux distributeurs des solutions optimisées (réduction des variantes et facilité de choix) et largement plus performantes (meilleure linéarité de la courbe de réponse) que les transformateurs traditionnels.



fig. 11 : TC fonctionnel de cellules metalclad HT (Merlin Gerin).

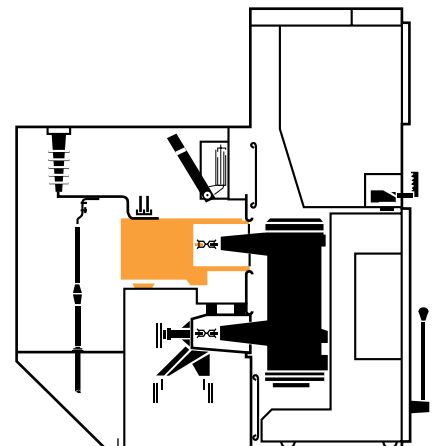


fig. 12 : exemple d'installation de TC fonctionnels dans la cellule metaclad HT 12 kV Fluair 200. (Merlin Gerin).

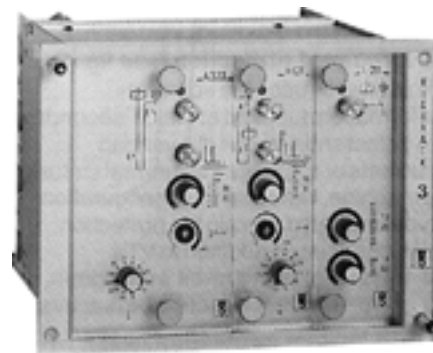


fig. 13 : relais statiques Vigirack (Merlin Gerin).

3. réponse d'un TC en régime saturé

L'apparition des relais statiques amène à revoir le comportement de l'ensemble de la protection dans le cas de forts courants : le TC se sature au-delà d'un certain seuil et l'idée première est souvent d'éviter ce phénomène en le relevant. Ceci conduit d'une part à un surcoût (TC plus performant, plus gros donc, plus encombrant), d'autre part à un danger d'échauffement excessif des relais.

Au contraire ce phénomène de saturation est utile pour la fonction « mesure » car la précision de l'image du courant primaire n'est utile que jusqu'à la valeur du courant nominal I_{1n} . Au-dessus la mesure n'a plus d'intérêt et le phénomène de saturation doit se produire pour un courant peu élevé ($2 \text{ à } 3 \cdot I_{1n}$) afin de limiter le courant secondaire et de protéger les appareils de mesure.

Pour ces motifs, il faut donc connaître la réponse du TC en régime saturé pour assurer un bon fonctionnement de la protection lorsque le courant primaire dépasse l'intensité nominale, en particulier pour les valeurs élevées qui apparaissent en cas de court-circuit.

Théoriquement, au coude de saturation, l'induction dans le noyau fait un palier et l'intensité au secondaire devient limitée. En fait nous allons vérifier par l'expérience que l'intensité au secondaire augmente légèrement et que les relais de protection fonctionnent de manière satisfaisante.

expérimentation - montage

Un courant i_1 est injecté au primaire du TC et l'on analyse ce que débite le secondaire dans une charge Z comprenant un relais R et une résistance (cf. fig. 14).

En fonction de l'intensité débitée au primaire (représentée par le paramètre

$$N = \frac{I_1}{I_{1n}})$$

au secondaire I_2 pour différentes charges Z et différents TC (cf. fig. 15).

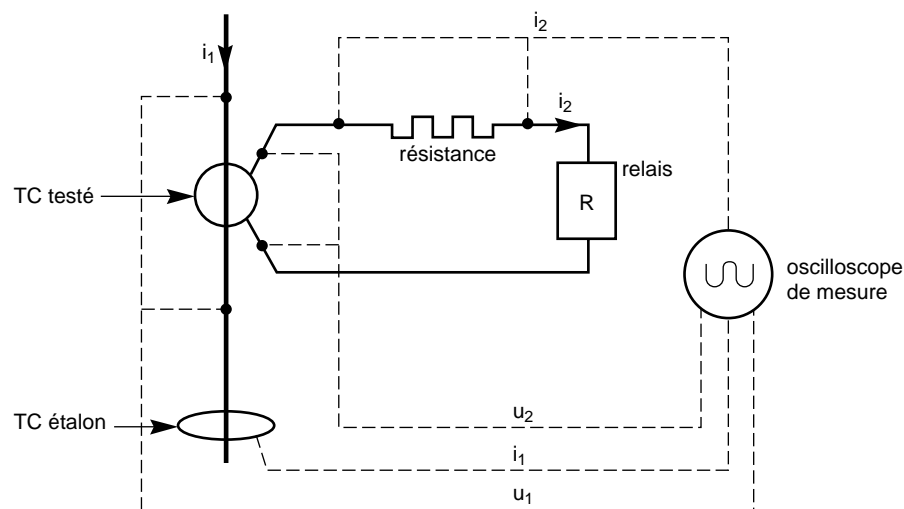


fig. 14. Schéma permettant de vérifier le bon fonctionnement des relais.

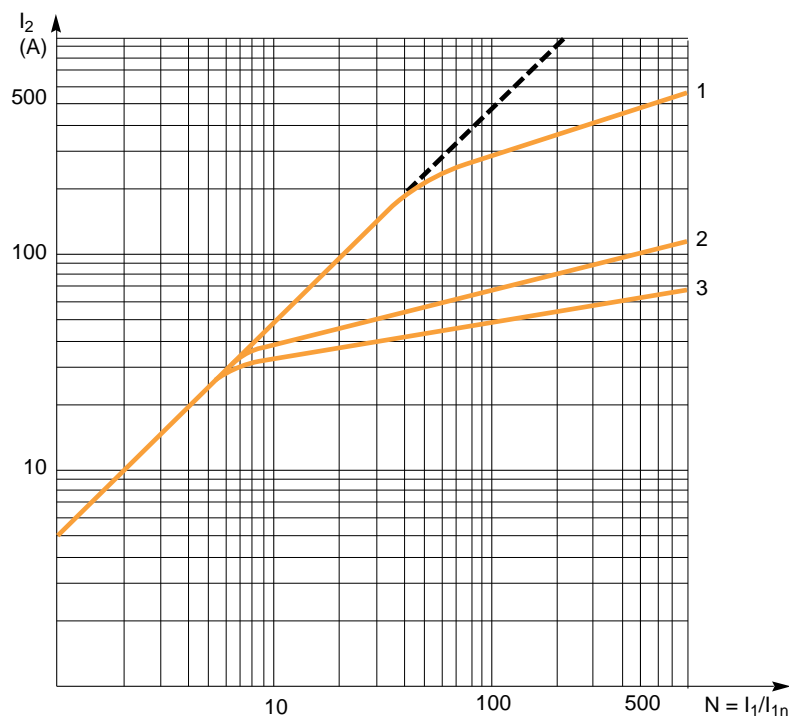


Fig. 15 : $I_2 = f(N)$ pour 1 TC seul (15 VA 10P5 100/5).

Charge Z au secondaire :

1. relais seul,
2. $Z = Z$ nominal du TC soit $0,6 \Omega$ et $\cos \varphi = 1$,
3. $Z = Z$ nominal du TC soit $0,6 \Omega$ et $\cos \varphi = 0,8$.

essai avec courants permanents symétriques

Essai à charge nominale résistive

L'essai a été réalisé avec un TC peu performant : 10P5, 50/5 avec une charge Z nominale de 15 VA (à 5 A) composée d'un relais à maximum d'intensité et d'une résistance.

Deux relais ont été utilisés :
 un relais statique Vigirack,
 un relais électromécanique.

Comme ces deux relais ont une résistance interne faible, une résistance a été ajoutée de façon à obtenir environ 0,6 Ω soit 15 VA à 5 A (filerie de liaison comprise). L'inductance du relais électromécanique étant faible (15 μH soit $\cos \varphi = 0,95$ pour le relais seul), la charge peut être considérée comme purement résistive dans les deux cas.

L'essai a consisté à faire varier le courant I_1 dans la plage de $I_{1n} = 50$ A à $I_{1max} = 54$ kA

$$\text{soit } N_{max} = \frac{54000}{50} = 1080 \text{ et}$$

$$\eta = \frac{N_{max}}{F_p} = \frac{1080}{5} = 216$$

(cette dernière valeur est significative du degré de saturation auquel a été soumis le TC).

■ résultats

L'intensité $i_2(t)$ recueillie au secondaire prend la forme d'un pic au-dessus de : $N = 10$ (cf. fig. 16a).

Néanmoins l'intensité efficace I_2 croît continûment ainsi que le montre le tracé 2 de la figure 15.

I_2 croissant, la puissance délivrée au secondaire $P_2 = Z \cdot I_2^2$ et la puissance délivrée à chaque relais $P_r = R \cdot I_2^2$ augmentent également : ceci explique le **déclenchement des deux types de relais** depuis le seuil β auquel ils ont été réglés jusqu'à N_{max} .

Essai à charge nominale en partie selfique

L'essai est similaire au précédent. Mais dans le circuit secondaire une self est introduite pour représenter le cas d'un relais électromécanique branché seul sur le secondaire et qui consommerait la puissance nominale du TC. Dans la pratique, ces relais ne descendent pas au-dessous de $\cos = 0,8$.

Dans cet essai le courant I_1 a exploré la plage $I_{1n} = 50$ A à $I_{1max} = 16400$ A

$$\text{soit } N_{max} = 328 \text{ et } \eta = \frac{N_{max}}{F_p} = 65,6$$

■ résultats

L'intensité $i_2(t)$ prend l'allure donnée figure 16b. La présence d'une self étale la pointe d'où la valeur I_2 inférieure (cf. tracé 3 de la figure 15).

Par rapport à l'essai à charge résistive pure :

- I_2 est multiplié par un facteur 0,65,
- la puissance totale délivrée au secondaire est multipliée par un facteur 0,4,

les deux relais déclenchent depuis leur seuil β jusqu'à N_{max} .

Essai à charge réduite

La charge secondaire ne comprend que le relais et les fils de liaison.

Par rapport à la charge nominale de 15 VA cela représente une charge d'environ 9 %.

■ résultats

La courbe $i_2(t)$ (cf. fig. 16c) et $i_2(N)$ (cf. tracé 1 de la figure 15) indiquent que le coude de saturation est bien plus élevé qu'à la charge nominale. Ce coude suit la loi :

$$K_s (P_2 + R_2 \cdot I_2)^2 = \text{constante}$$

avec $P_2 = Z \cdot I_2^2$ puissance totale délivrée au secondaire (consommée par le relais et les fils de connexion).

R_2 = résistance interne de l'enroulement secondaire du TC,
 K_s = coefficient de saturation (réel ou nominal).

D'où, en pratique, lorsqu'un TC débite dans une charge inférieure à sa puissance nominale de précision (en VA) la saturation se produit à un niveau de surintensité bien plus élevé que le coefficient de saturation nominal K_s .

Ce phénomène doit être pris en compte et calculé pour chaque application car il peut générer dans le secondaire des surintensités incompatibles avec les tenues thermiques et dynamiques des relais branchés au secondaire du TC (pour le calcul voir les conclusions figurant ci-après).

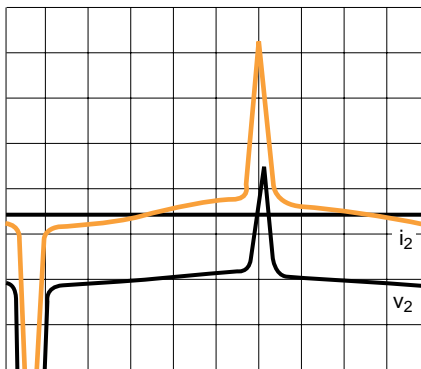


fig. 16 a - TC 15 VA 10P5 50/5
 essai à charge nominale purement résistive
 $I_1 = 16400$ A
 éch. : $i_2 = 100$ A/carreau ; $v_2 = 100$ V/carreau.

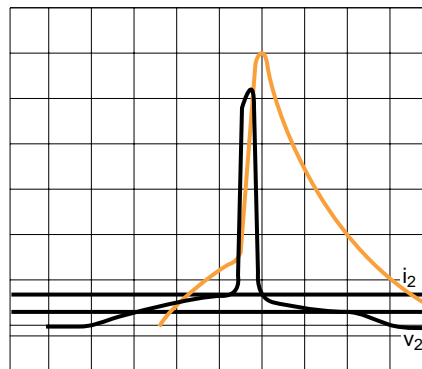


fig. 16 b - TC 15 VA 10P5 50/5
 essai à charge nominale avec $\cos \varphi = 0,8$
 $I_1 = 16400$ A
 éch. : $i_2 = 25$ A/carreau ; $v_2 = 50$ V/carreau.

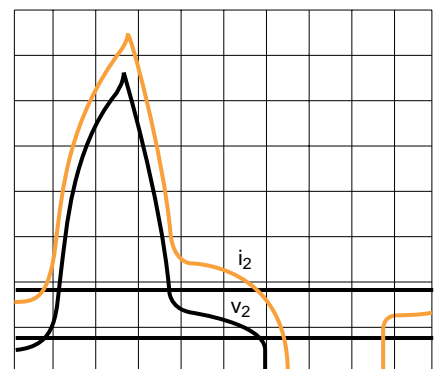


fig. 16 c - TC 15 VA 10P5 50/5
 essai à charge nominale réduite
 relais + fils de liaison - $I_1 = 14200$ A
 éch. : $i_2 = 100$ A/carreau ; $v_2 = 5$ V/carreau.

essai avec courants asymétriques

L'essai a été effectué à partir d'un courant asymétrique somme d'un courant sinusoïdal symétrique et d'une composante continue avec les caractéristiques suivantes :

$$\frac{\hat{I}}{I_{\text{eff}}} \approx 2,3$$

Ces valeurs sont légèrement inférieures à celles de la norme NF C 64-100 pour laquelle

$$\frac{\hat{I}}{I_{\text{eff}}} = 205 = 1,8 \cdot \sqrt{2}$$

soit 20 % d'asymétrie à 70 ms.

La charge secondaire est identique à celle de l'essai principal à charge nominale résistive comprenant un relais électromécanique ou statique.

■ résultats

Les deux relais répondent correctement en quelques ms et de la même manière qu'en essais symétriques dans toute la plage explorée (jusqu'à $\hat{I}_1 = 140$ kA crête avec $I_{\text{eff}} = 54$ kA).

Remarques :

■ la première crête vue au secondaire par les relais, suffit à les faire déclencher, si son énergie est suffisante : c'est le cas pour I_{eff} supérieure à 2 kA mais en-dessous de cette valeur (cf. fig. 17a) il faut attendre la troisième crête ;

■ le TC ne se sature pas pendant la première crête négative du courant primaire dans le cas $\hat{I}_1 = 4$ kA ;

■ de façon générale, la réponse délivrée par le TC sur la première crête négative du primaire (voire la seconde) est plus courte que les réponses en régime établi (qui est atteint dès la sixième crête) ;

■ les points précédents montrent que pour des facteurs de crête plus élevés (cas des enclenchements à vide de transformateurs avec un $\frac{\hat{I}}{I_{\text{eff}}} = 3,7$),

la réponse au secondaire risque de disparaître pendant les premières crêtes. Si de plus la constante de temps de la composante continue du courant primaire est élevée ($t = 80$ ms dans le cas cité), cette disparition se prolonge jusqu'à ce que le courant primaire recoupe l'axe 0 : ce phénomène est mis en évidence sur les courbes de la figure 17 (le temps de déclenchement passe à 68 ms).

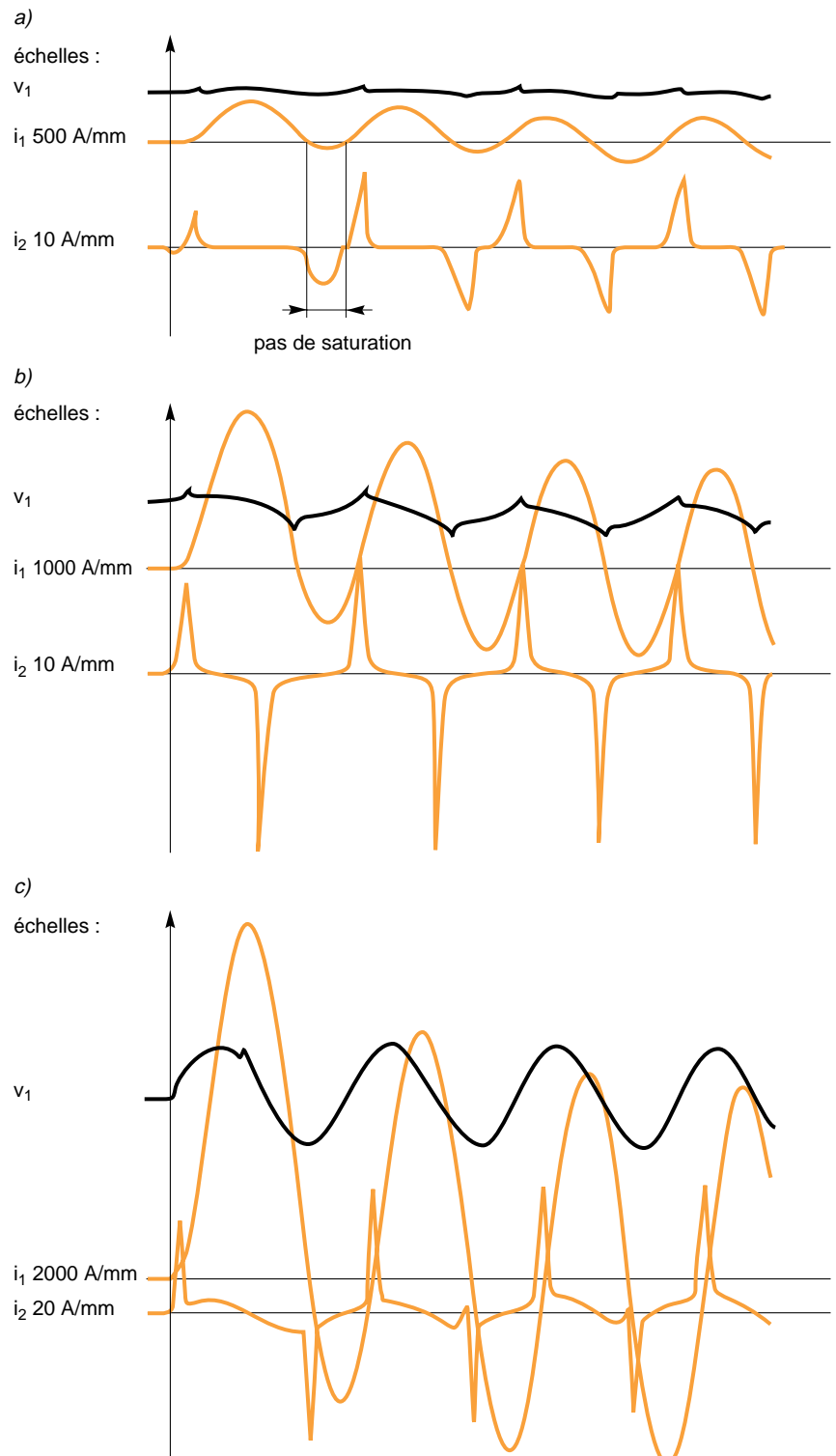


fig. 17 : réponses du secondaire d'un TC sur un courant primaire asymétrique pour :

- $I_{\text{eff}} \approx 1,4$ kA,
- $I_{\text{eff}} \approx$ pour 14 kA et $\hat{I}_1 \approx 32$ kA,
- $I_{\text{eff}} \approx 54$ kA et $\hat{I}_1 \approx 140$ kA.

conclusions sur les TC débitant sur un relais «à maxi d'intensité»

Les essais décrits précédemment démontrent que pour des relais aussi bien électromagnétiques que statiques un déclenchement est obtenu quelle

que soit la valeur du courant, même si le TC est fortement saturé.

Ainsi le coefficient de saturation K_s du TC doit donc être calculé non pas en fonction du courant de court-circuit I_{cc} mais en fonction du seuil maximum de réglage du relais associé (cf. fig. 18 et 19).

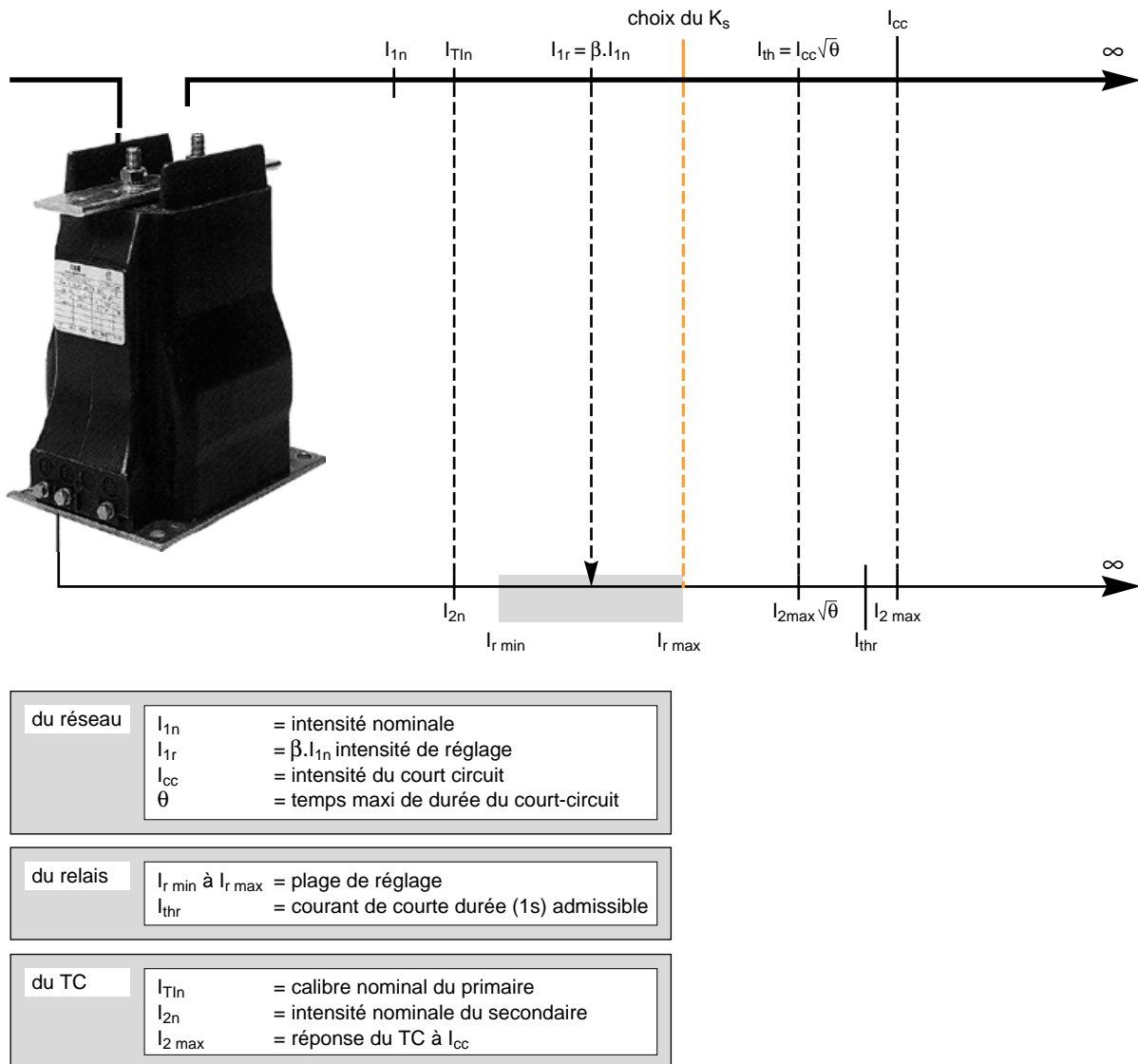


fig. 18 : caractéristiques à considérer pour définir un TC.

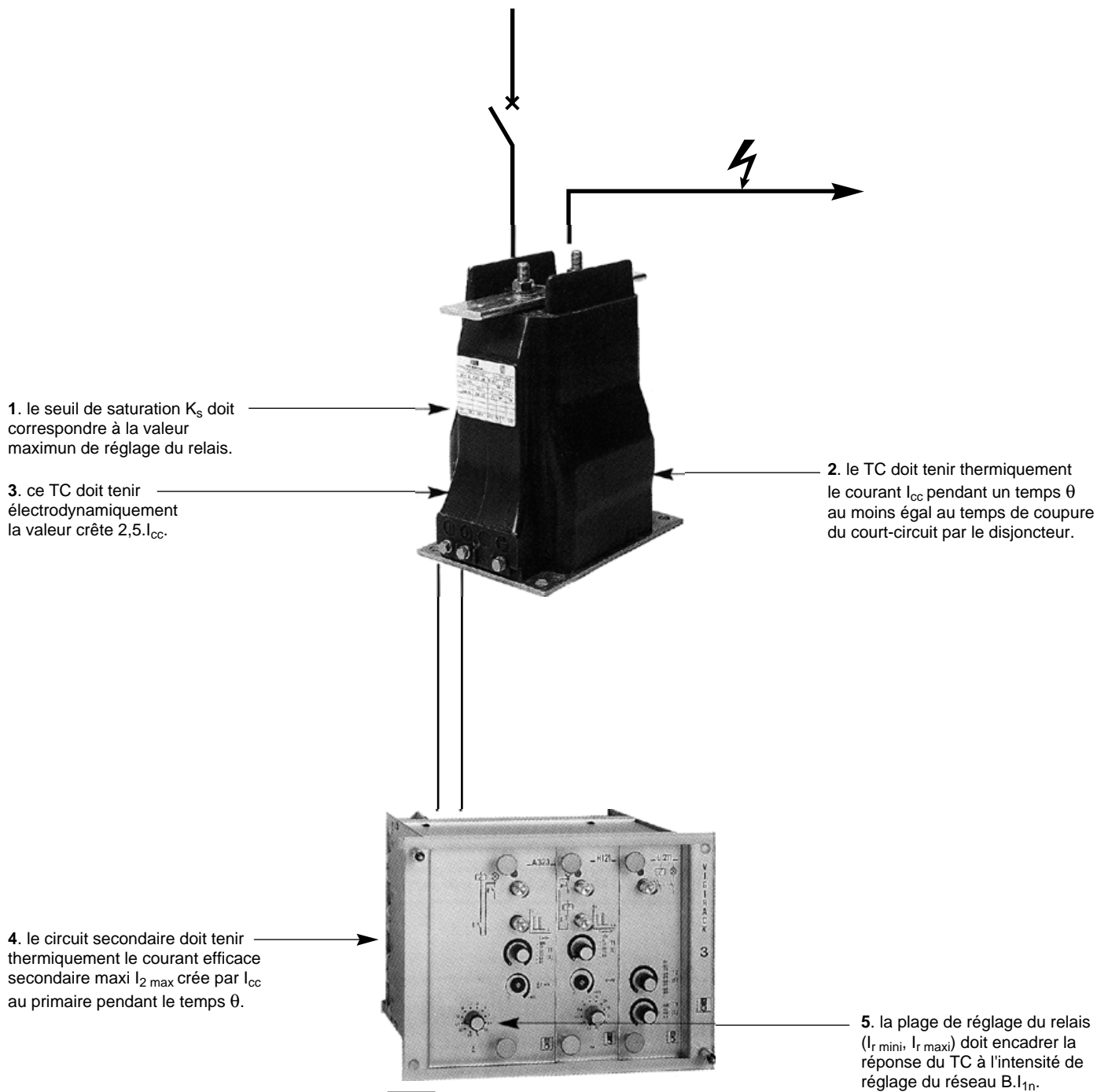


fig. 19 : règles générales pour dimensionner un TC.

4. fonctionnement en parallèle des cellules

Dans la configuration des réseaux HT, des alimentations en double jeux de barres sont souvent utilisées. Actuellement sur la plupart des cellules, il existe deux solutions :

- la cellule double jeux de barres, le disjoncteur peut être branché indifféremment sur un des jeux de barres sans discontinuité de service. Ce système présente souvent

l'inconvénient d'une grande complexité dans les verrouillages ;

- les cellules raccordées en duplex (cf. fig. 20). A partir d'éléments standards, cette solution peut remplacer avantageusement le double jeux de barres, en étant plus fiable.

Comme sur les nouvelles générations de cellules, les TC sont des éléments

standard assurant également les fonctions d'isolement entre compartiments et d'embrochage de l'appareil de coupure. Cette disposition oblige à brancher les relais (qui eux ne sont pas doublés) sur chaque secondaire de TC ; d'où l'étude suivante concernant le fonctionnement de deux TC identiques branchés en parallèle sur une même charge.

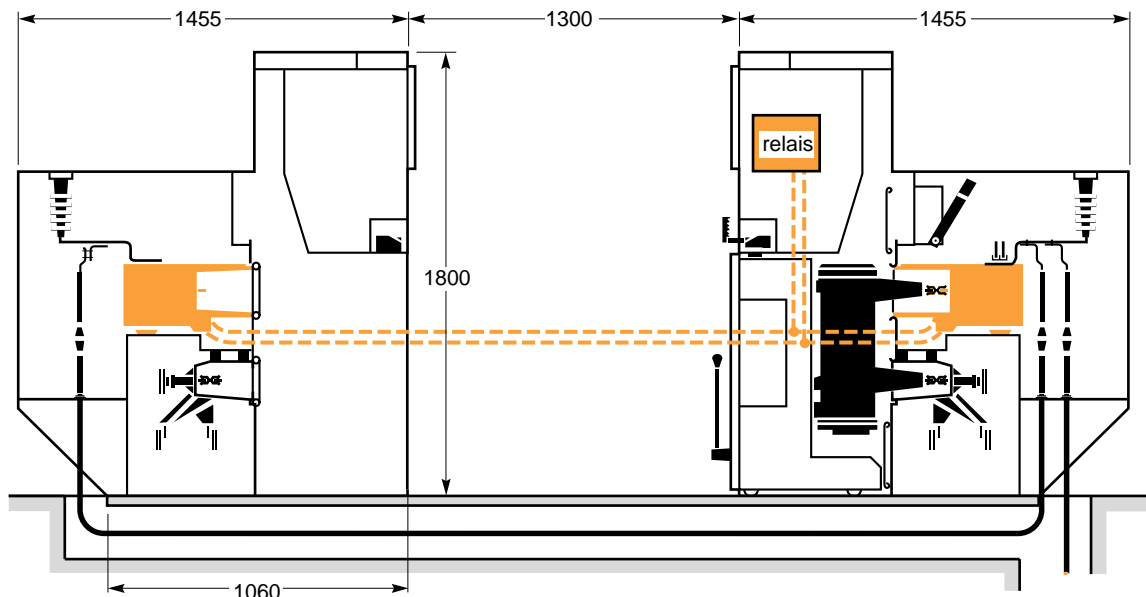


fig. 20 : raccordement de 2 cellules en duplex.

Schéma de montage

Le raccordement de deux cellules en duplex comme l'indique la figure 18 conduit au schéma de la figure 21 pour la protection.

L'un des TC (appelé « actif ») est alimenté au primaire par le réseau HT ; son secondaire débite un courant i_2 se décomposant en un courant i_m sur le secondaire de l'autre TC (appelé « mort ») et en un courant i_r sur la charge nominale de 15 VA composée d'un relais électromagnétique ou statique et d'une résistance pure.

Les essais ont été effectués sur deux TC identiques de même série (15 VA 50/5 10P5 comme dans les paragraphes précédents).

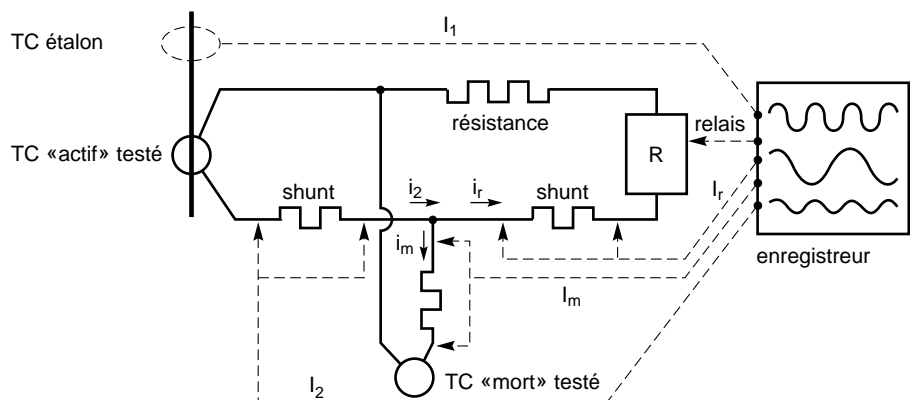


fig. 21 : schéma de montage pour l'étude du TC branché en parallèle.

Résultats

Ils sont rassemblés dans les courbes des figures 22 (intensités en fonction du temps) et figure 23 (intensités efficaces et temps de déclenchement).

Les constatations sont les suivantes :

- les deux relais répondent rapidement de leur seuil de déclenchement β à $\eta = 72$,

- le relais statique déclenche en un temps constant $T \approx 20$ ms alors que le relais électromagnétique réagit en fonction de I_2 ($T \approx 80$ ms au seuil de déclenchement à $T \approx$ quelques ms à $\eta = 72$) ;

- le courant secondaire I_2 croît continûment mais on distingue deux zones :

- avant $\eta = 10$, $I_r \approx I_2$ et $I_m \ll I_r$

le courant secondaire passe entièrement dans les relais car le TC « mort » se comporte comme une impédance infinie,

- après $\eta = 10$ $I_m \rightarrow I_2$ ce qui signifie que le courant secondaire passe en grande partie dans le TC « mort » mais cependant I_r croît continûment ce qui assure le déclenchement des relais (il ne faut pas oublier que i_r est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à i_m) ;

- par rapport à l'essai sur un TC, le courant I_r passant dans les relais pendant l'essai avec deux TC est inférieur (à $N = 300$, environ - 40 %).

Conclusion

L'association des deux TC en parallèle ne pose pas de problème :

- à faible courant, il ne passe presque rien dans le TC « mort »,

- à fort courant, il passe suffisamment de courant dans le relais pour le faire déclencher.

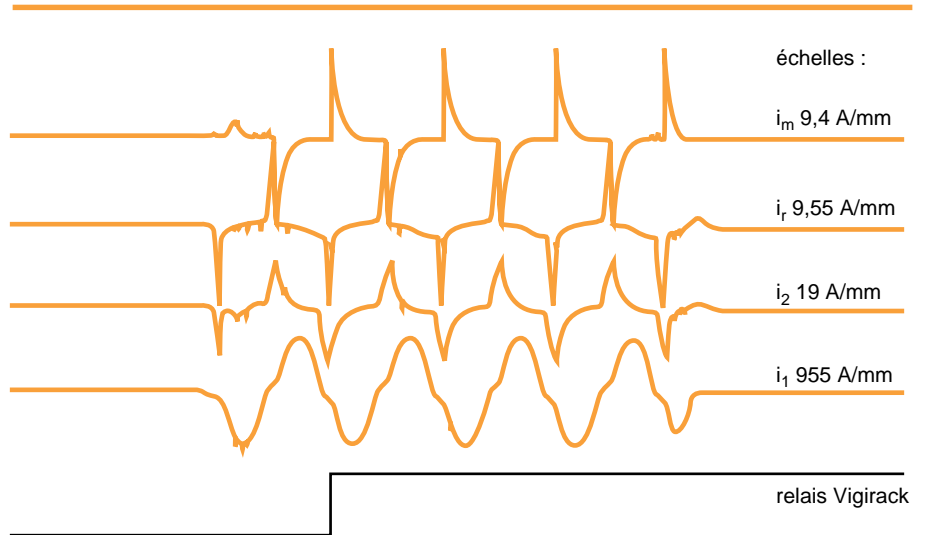


fig. 22 : intensités au secondaire de 2 TC branchés en parallèle. $I_1 = 1\ 2500$ A.

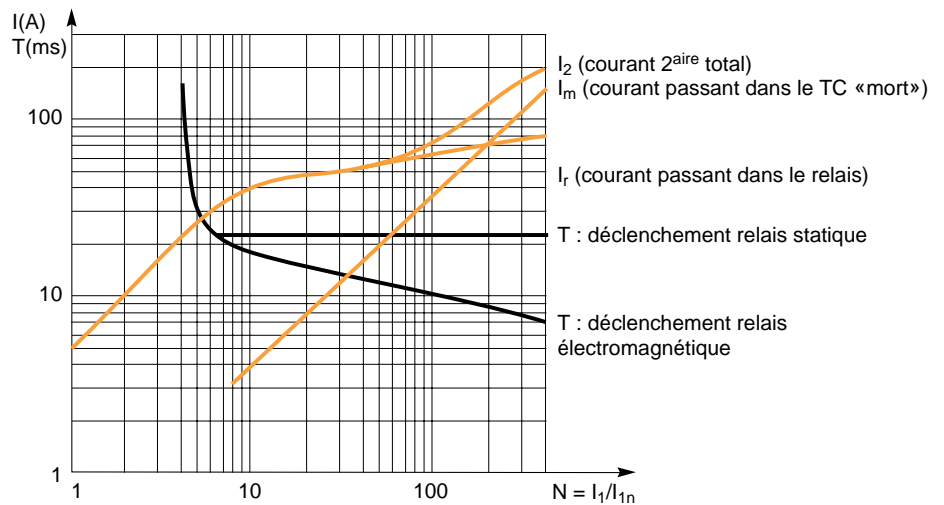


fig. 23 : intensités efficaces et temps de déclenchement des relais raccordés à 2 TC en parallèle (10P5 50/5 15 VA).

5. conclusions générales

Les conclusions des chapitres 4 et 5 montrent que :

- les relais fonctionnent correctement dans les deux cas étudiés :
- la forte saturation d'un TC,
- la mise en parallèle de deux TC ;
- ce sont les relais de type statique qui donnent la réponse la plus fiable (temps de fonctionnement constant pour tout courant supérieur au seuil de réglage).

Par ailleurs, les relais statiques ont, généralement, un temps d'acquisition très faible ce qui conduit à un fonctionnement plus sûr lorsque le TC est fortement saturé et qu'il délivre une impulsion de courant de très faible durée.

Rappelons toutefois que les phénomènes transitoires pris en compte ont été limités au courant asymétrique inférieur à :

$$\frac{\hat{I}}{I_{\text{eff}}} = 2,5$$

Ceci étant le phénomène de saturation des TC, comme l'a montré cette expérimentation, ne doit pas être considéré comme un handicap :

- lorsqu'un TC «alimente» un ou des appareils de mesure, la saturation en limitant le courant efficace au secondaire protège les appareils qui n'ont pas, par ailleurs, besoin généralement d'être très précis au-dessus de I_{1n} .
- lorsqu'un TC «alimente» un appareil de protection, le fonctionnement est assuré même s'il se sature. Il faut donc rejeter l'idée de dimensionner un TC en fonction du courant le plus élevé qu'il peut être amené à supporter au primaire. De plus, ce surdimensionnement amène des risques pour le relais et le câblage qui risquent d'être détruits.

annexe : normes relatives aux TC

NF C 42-502

Niveaux d'isolement nominaux

Les niveaux d'isolement préconisés par la norme sont donnés dans le tableau II A présenté dans la figure 24.

tension la plus élevée pour le matériel (kV)	tension de tenue	
	1 minute à la fréquence industrielle (valeur efficace) (kV)	aux ondes de choc (valeur de crête) (kV)
0,6	3	
1,2	6	
2,4	11	
3,6	16	45
7,2	22	60
12	28	75
17,5	38	95
23	45	95
24	50	125
36	70	170
52	95	250
72,5	140	325

fig. 24 : niveaux d'isolement (tableau II A).

classe de précision	erreur de courant (erreur de rapport) en pour cent, ±, pour les valeurs du courant exprimées en pour cent du courant nominal				déphasage, ± pour les valeurs du courant exprimées en pour cent du courant nominal							
					minutes				centiradians			
	% I _{1n}	10	20	100	120	10	20	100	120	10	20	100
0,1	0,25	0,20	0,1	0,1	10	8	5	5	0,30	0,24	0,15	0,15
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10	0,60	0,45	0,3	0,3
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	45	30	30	1,8	1,35	0,9	0,9
1	2,0	1,5	1,0	1,0	120	90	60	60	3,6	2,7	1,8	1,8

Note : après accord entre constructeur et utilisateur, des garanties peuvent être fournies, en ce qui concerne la précision et le déphasage, entre 120 % et 200 % de I_n.

fig. 25 : limites de l'erreur (tableau III).

classe de précision	erreur de courant (erreur de rapport) en pour cent, ±, pour les valeurs du courant exprimées en pour cent du courant nominal	
% I _{1n}	50	120
3	3	3
5	5	5

il n'est imposé aucune limite de déphasage pour les classes 3 et 5.

fig. 26 : limites de l'erreur (tableau IV).

Valeurs normales des courants nominaux

■ au primaire (en A) : **10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75**

et leurs multiples ou sous multiples décimaux.

Les valeurs préférentielles sont en gras.

■ au secondaire (en A) : 1 - 5.

Classe de précision

■ TC de mesure

Les classes de précision normales sont : 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5.

Le domaine nominal d'utilisation de la fréquence est de 96 % à 102 % de la fréquence nominale.

Pour les transformateurs des classes de précision 0,1 - 0,2 - 0,5 et 1, l'erreur de courant et le déphasage dans le domaine nominal de fréquence, ne doivent pas dépasser les valeurs du tableau III (cf. fig. 25), lorsque la charge secondaire est comprise entre 25 % et 100 % de la charge de précision.

Pour les transformateurs des classes 3 et 5, l'erreur de courant dans le domaine nominal de fréquence ne doit pas dépasser les valeurs du tableau IV (cf. fig. 26) lorsque la charge secondaire est comprise entre 50 % et 100 % de la charge de précision.

Dans tous les cas, la charge employée doit être inductive avec un facteur de puissance de 0,8, sauf si elle aborde une puissance inférieure à 5 VA ; dans ce cas son facteur de puissance est l'unité. En aucun cas la charge ne doit être inférieure à 1 VA.

■ TC de protection

Les valeurs normales des facteurs limites de précision sont : 5 - 10 - 15 - 20 - 30 - 40.

Le domaine nominal d'utilisation de la fréquence est de 90 % à 110 % de la fréquence nominale.

Les classes de précision normales sont 5P et 10P.

Pour la puissance de précision et dans le domaine nominal de fréquence, l'erreur de courant, le déphasage et l'erreur composée ne doivent pas dépasser les valeurs du tableau V (cf. fig. 27).

Pour la détermination de l'erreur de courant et du déphasage, la charge doit être inductive et égale à la charge de précision avec un facteur de puissance égal à 0,8, sauf si la puissance correspondante est inférieure à 10 VA ; dans ce cas, la charge pourrait être résistive (facteur de puissance unité). Pour la détermination de l'erreur composée, le facteur de puissance de la charge peut être compris entre 0,8 (circuit inductif) et l'unité, la valeur étant fixée par accord entre constructeur et utilisateur.

Puissance de précision

Les valeurs normales des puissances de précision sont : 2,5 - 5,0 - 10 - 15 - 30 - 75 - 100 VA.

Courant de courte durée et courant de crête admissibles

Courant de courte durée admissible (I_{th}). Pour chaque transformateur, le courant de courte durée (I_{th}) doit être spécifié.

Leurs valeurs préférentielles sont indiquées dans le paragraphe 10.1 (cf. fig. 28).

Notes

■ pour la tension la plus élevée du réseau inférieure ou égale à 36 kV, la valeur du courant de courte durée admissible est constructivement liée à la valeur du courant nominal. Elle est donc fréquemment exprimée sous la forme d'un multiple du courant nominal, dont les valeurs préférentielles sont : 40 - 80 - 100 - 200 et 300.

■ en l'absence d'indication sur les valeurs admissibles en fonction du temps, il est admis que le transformateur peut supporter pendant un temps t , exprimé en secondes, un courant dont la valeur efficace est

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	± 1,8	5
10P	± 3			10

fig. 27 : limites des erreurs (tableau V) .

donnée par la formule :

$$I'_{th} = \frac{I_{th}}{\sqrt{t_2}}$$

avec $t_2 > t_1$ sachant que I_{th} est donné pour $t_1 (= 1s)$.

■ les durées admissibles pour le courant de courte durée admissible sont fixées à partir de l'état froid. Toutefois, sur demande de l'utilisateur, le constructeur est tenu d'indiquer, pour un type d'appareil déterminé, le courant de courte durée admissible en partant d'un état correspondant au fonctionnement, au courant d'échauffement et à la température ambiante maximale. Mais, dans ce dernier cas, la vérification du courant de courte durée admissible ne peut pas être exigée au titre des essais d'acceptation.

Valeur de crête du courant admissible (I_{dyn}).

La valeur de crête du courant admissible est $2,5 \cdot I_{th}$. Toutefois une valeur différente peut être admise sous réserve qu'elle soit indiquée sur la plaque signalétique.

tension la plus élevée du réseau (kV)	I_{th} (kA)				
3,6	10	16	25	40	
7,2	8	12,5	16	25	40
12	8	12,5	16	25	40
17,5	8	12,5	16	25	40
23	8	12,5	16	25	40
24	8	12,5	16	25	40
36	8	12,5	16	25	40
72,5	20	25			
100	20				
245	20	31,5			
420	40				

fig. 28 : valeurs préférentielles de I_{th} (paragraphe 10.1).

CEI 185

C'est cette norme qui fait référence. La NF C 42-502 diffère peu de cette norme CEI. Les différences sont les suivantes :

Niveaux d'isolement nominaux

La norme CEI donne deux tableaux :
 ■ le même tableau que la norme NF C pour les pays européens,
 ■ un autre tableau conforme à la pratique des USA avec des valeurs un peu plus rigoureuses, voir tableau II B (cf. fig. 29).

Valeurs normales des courants nominaux

Mêmes valeurs préférentielles au primaire.

Au secondaire possibilités d'un $I_{2n} = 2 A$.

Classe de précision

■ TC de mesure

Les erreurs de courant en module et en phase sont les mêmes en classe 3 et 5. Pour les classes 0,1 - 0,2 - 0,5 et 1, les erreurs sont les mêmes sauf pour la colonne 10 % de I_{1n} qui est remplacée par 5 % de I_{1n} avec les erreurs mentionnées dans le tableau IV A de la figure 30. De plus la norme CEI définit deux classes supplémentaires 0,2 S et 0,5 S pour les TC d'application particulière (connexion avec des compteurs d'énergie électrique spéciaux). Dans ce tableau les erreurs en module et en phase sont données pour $I_{2n} = 5 A$ seulement.

■ TC de protection

La CEI donne les mêmes limites d'erreur ; seule différence : le facteur limite de précision $F_p = 40$ n'existe pas.

Puissance de précision

La CEI ne donne les mêmes valeurs normales que jusqu'à 30 VA. Au-delà la puissance peut être choisie de façon à répondre aux besoins.

Courant de courte durée et courant crête

La norme CEI ne définit pas de valeurs préférentielles de I_{th} pour chaque tension de réseau comme le fait la norme NF C. Par contre, l'application de la loi $i^2 \cdot t = Cste$ pour définir le I_{th} est limitée à :
 $0,5 < t < 5 s$.

tension la plus élevée pour le matériel Um (valeur efficace)	tension assignée de tenue au choc de foudre (valeur de crête) puissance du réseau		tension assignée de tenue de courte durée à fréquence industrielle (valeur efficace)
	≤ 500 kVA	> 500 kVA	
kV	kV	kV	kV
4,40	60	75	19
13,20	95	110	34
13,97			
14,52			
26,4	150		50
36,5	200		70

fig. 29 : niveaux d'isolement nominaux fixés pour les U.S.A (tableau II B).

classe de précision	erreur ϵ_M pour $I_1 = 5 \%$ de I_{1n}					erreur ϵ_ϕ pour $I_1 = 5 \%$ de I_{1n}										
						minutes					centiradians					
0,1	0,4					15					0,45					
0,2	0,75					30					0,9					
0,5	1,5					90					2,7					
1	3					180					5,4					
classe de précision	erreur ϵ_M pour les valeurs en % du courant nominal I_{1n}					erreur ϵ_ϕ pour les valeurs exprimées en % du courant nominal I_{1n}										
						minutes					centiradians					
	% I_{1n}	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S		0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S		1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

fig.30 : classe de précision (tableau IV A).

