



Michel Collombet

Ingénieur INPG en 1968, il rejoint le groupe Schneider en 1975, où il devient responsable des développements électroniques numériques à SES (Systèmes Electroniques de Sûreté). Il est maintenant chargé des développements électroniques à DBTP (Division Basse Tension de Puissance).



Bernard Lacroix

Ingénieur ESPCI 74 (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle de Paris), il a travaillé 5 ans chez Jeumont Schneider où il a participé, entre autre, au développement du variateur de vitesse à hacheur du TGV. Entré chez Merlin Gerin en 1981, il a été successivement technico-commercial dans l'activité onduleur, puis responsable commercial de l'activité protection des personnes. Depuis 1991, il est en charge de la prescription dans le domaine de la distribution BT de Puissance.

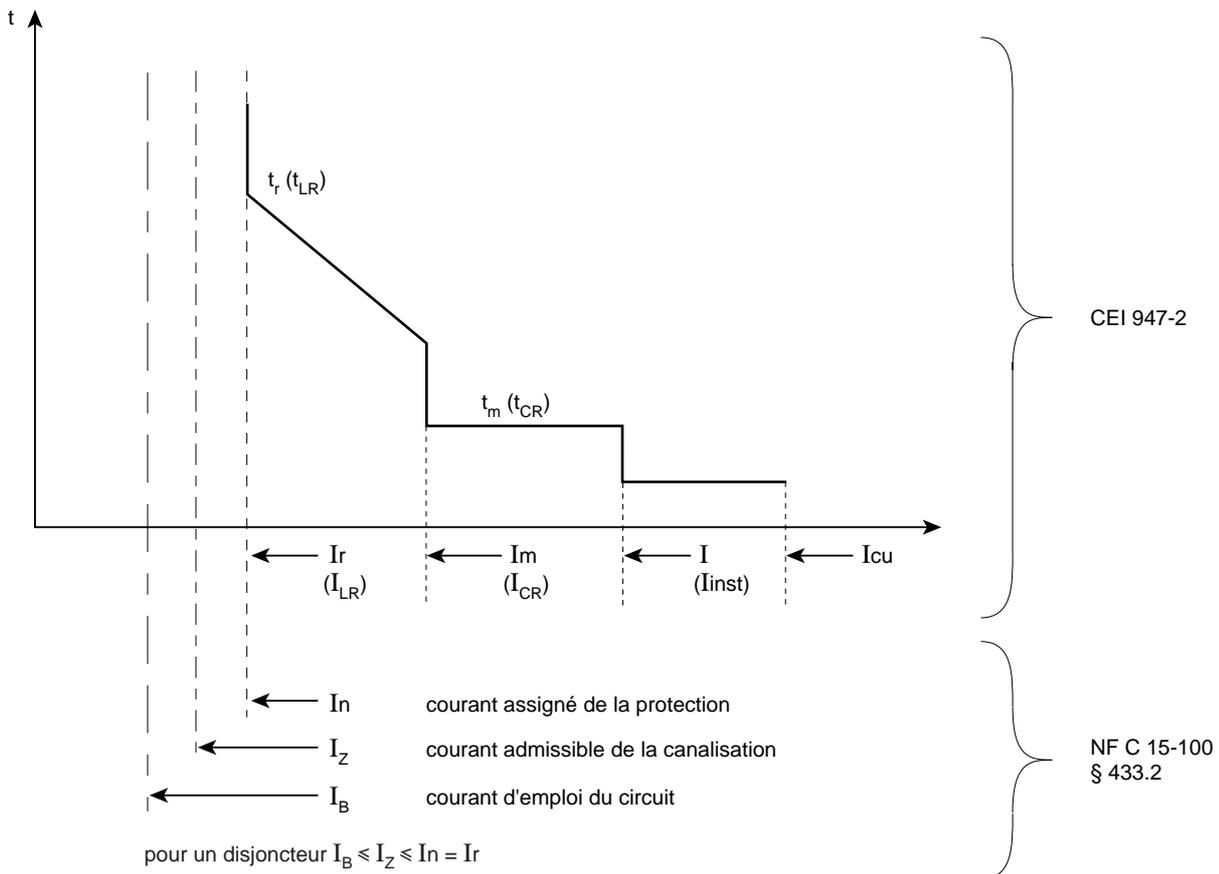
n° 182

**les disjoncteurs BT
face aux courants
harmoniques,
impulsionnels et
cycliques**

lexique

ASIC	Application Specific Integrated Circuit.
Filtre IIR	Infinite Impulse Respond.
GFP	Ground Fault Protection.
I	seuil de déclenchement de la protection magnétique instantanée.
I_{cu}	pouvoir de coupure ultime (maximum) d'un disjoncteur.
I_m	réglage de la protection magnétique ou Court Retard (I_{CR}).
I_r	réglage de la protection thermique ou Long Retard (I_{LR}).
t_m	réglage de la temporisation d'un déclencheur magnétique ou de la protection Court Retard (t_{CR}).
t_r	réglage (éventuel) du retard de la protection thermique ou de la temporisation de la protection Long retard (t_{LR}).

D'autres grandeurs de courant sont définies dans la norme d'installation NF C 15-100 ; selon la figure ci-dessous.



les disjoncteurs BT face aux courants harmoniques, impulsionnels et cycliques

sommaire

1. Rappel sur le disjoncteur BT	Rôle d'un disjoncteur	p. 4
	Technologie / organisation d'un disjoncteur BT	p. 4
	La mesure du courant	p. 5
2. Les courants harmoniques	Rappels théoriques sur les courants harmoniques	p. 8
	Générateurs de courants harmoniques	p. 8
	Gestion des courants harmoniques par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT	p. 10
	Exemples de courants d'appel	p. 11
3. Les courants impulsionnels et cycliques	Gestion des courants impulsionnels par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT	p. 11
	Charges à courants cycliques	p. 12
	Gestion des courants cycliques par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT	p. 13
	Les réglages des disjoncteurs électroniques	p. 14
	Les apports du numérique à la sûreté d'exploitation	p. 14
4. Disjoncteurs électroniques : des possibilités étendues	La communication par BUS	p. 15
	Les normes des disjoncteurs BT	p. 15
	Disjoncteurs électroniques : de nouvelles possibilités offertes	p. 15
	5. Conclusion	p. 16
	6. Bibliographie	p. 16

L'évolution des récepteurs, résultat des avancées technologiques de cette dernière décennie, a amené plus de contraintes pour la distribution électrique. De ce fait, les protections ont dû s'adapter, notamment vis-à-vis de trois phénomènes :

- courants harmoniques importants dus à la multiplication des charges non linéaires utilisant l'électronique de puissance (redresseurs, alimentations à découpage...);
- courants impulsionnels provoqués par la mise sous tension de récepteurs à fort courant d'appel tels que : charges capacitives, transformateurs BT/BT ;
- courants cycliques résultant du fort développement de l'automatisation des charges suivant des cycles répétitifs (robots de soudage, chauffage par trains d'ondes).

L'objet de ce Cahier Technique est de montrer comment les déclencheurs électroniques prennent en compte ces nouvelles exigences et tendent à remplacer les déclencheurs magnétothermiques, et par ailleurs, comment, grâce aux possibilités de la technologie numérique, ils sont devenus des capteurs/actionneurs «intelligents et communicants».

1. rappel sur le disjoncteur BT

rôle d'un disjoncteur

Le rôle principal assigné à un disjoncteur est de protéger l'installation électrique, et les conducteurs situés en aval, contre les conditions anormales de fonctionnement : les surcharges et les courts-circuits. Pour assurer efficacement cette fonction, le déclencheur du disjoncteur doit prendre en compte l'évolution des récepteurs.

Celle-ci se caractérise par :

- une « pollution » accrue en harmoniques.

Le développement de l'électronique de puissance, donc des charges non linéaires : machines de traitement de l'information, redresseurs, gradateurs, hacheurs... et l'évolution de la technologie des récepteurs - lampes à décharges, lampes fluorescentes...-, ont augmenté l'intensité des courants harmoniques dans les réseaux de distribution.

- des courants « impulsifs » plus fréquents dus aux charges classiques et nouvelles générant des courants d'appel importants :

- condensateurs pour la compensation du $\cos \varphi$ (dont la valeur de référence a augmenté), transformateurs BT/BT,
- mais aussi redresseurs avec condensateurs en tête de plus en plus répandus (lampes à starter électronique, ordinateurs...).

- des récepteurs commandés suivant des « cycles ».

L'automatisation plus poussée entraîne des manœuvres plus répétitives de récepteurs tels que moteurs de process, robots de production, régulations thermiques par trains d'ondes...

En parallèle à cette évolution, l'exigence d'une meilleure continuité de service s'est accrue ; ainsi :

- pour éviter les manques de tension, améliorer la continuité de service implique d'installer des sources de remplacement telles que les Groupes Electrogènes (GE). Celles-ci ont des caractéristiques particulières que la protection devra intégrer ; par exemple, impédance de source plus élevée ce qui augmente les perturbations dues

aux courants harmoniques et réduit aussi la valeur des courants de défaut, donc modifie la valeur du réglage des protections.

- pour éviter les déclenchements intempestifs, afin d'atteindre les exigences de sécurité et de confort dans le tertiaire, et les coûts liés aux interruptions de courant dans l'industrie, il est fondamental de ne déclencher que si le risque est réel.

technologie / organisation d'un disjoncteur BT

De 1 à 6300 A, les disjoncteurs sont largement utilisés dans les installations BT. Leur déclencheur est réalisé suivant 2 technologies :

- déclencheurs magnétothermiques. Principalement pour les gammes domestiques et industrielles de petit calibre. Sur des appareils de type modulaire, le déclencheur est intégré au disjoncteur.

- déclencheurs électroniques. Autrefois exclusivement réservés aux disjoncteurs de fort calibre, l'évolution est sensible (cf. fig. 1) vers ce type de déclencheur, car cette solution offre une grande souplesse et devient de plus en plus économiquement abordable.

En effet, l'emploi de technologies numériques, notamment l'utilisation simple de circuits intégrés spécifiques (ASIC) permet :

- de réaliser des déclencheurs universels qui donnent plus de facilités de réglage,

- de traiter plus d'informations,
- d'assurer la communication nécessaire au contrôle-commande de l'installation.

Déclencheur magnétothermique

Ce déclencheur comporte un bilame et une bobine d'électro-aimant en général montés en série dans le circuit à protéger.

L'action du bilame est d'autant plus rapide que la surcharge est élevée. La bobine réagit à partir de surintensités importantes de façon quasi instantanée suivant le principe de l'électro-aimant.

Déclencheur électronique

Ce déclencheur comprend des capteurs, une électronique de traitement et de commande et un actionneur (cf. fig. 2).

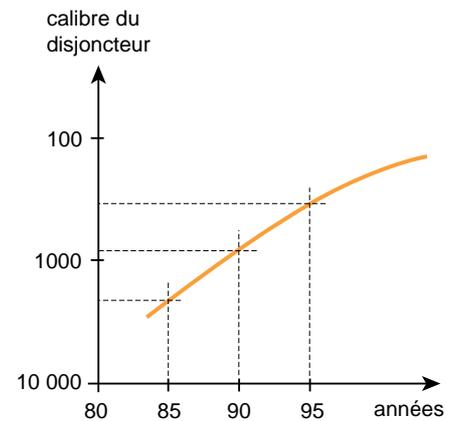


fig. 1 : évolution des déclencheurs électroniques.

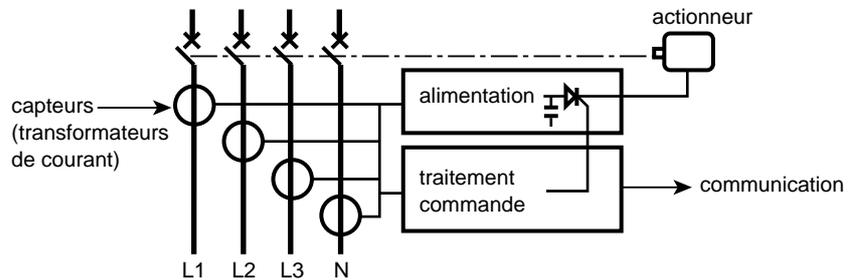


fig. 2 : blocs fonctionnels d'un déclencheur électronique.

■ capteurs.

D'une part, les capteurs de courant élaborent l'image du courant à mesurer et d'autre part, pour avoir la meilleure sûreté de fonctionnement, ils fournissent l'alimentation électrique du déclencheur (déclencheurs à propre courant).

Comme ces capteurs doivent réaliser cette double fonction - mesure et alimentation du déclencheur -, ils utilisent un circuit magnétique (« TC fer »).

■ traitement de l'information.

Ce traitement comporte schématiquement les fonctionnalités suivantes (cf. fig. 3) :

- fonction ① : numériser le signal fourni par le capteur à l'aide d'un convertisseur analogique/digital pour suivre en temps réel l'évolution du courant,
- fonction ② : compenser la saturation des TC (s'il y a lieu). En effet, les TC à noyau magnétique sont saturables pour les fortes valeurs de courant et ce phénomène est amplifié en cas d'élévation de température (cf. fig. 4),
- fonction ③ : calculer la valeur RMS du courant primaire,
- fonction ④ : comparer la valeur RMS aux seuils prédéterminés par l'utilisateur. Selon la valeur, cette comparaison se fait avec ou sans temporisation : en cas de dépassement, l'électronique enverra un ordre électrique à un actionneur qui le transformera en une action mécanique de déverrouillage du disjoncteur.

■ actionneur.

La problématique de l'actionneur est de réaliser des efforts instantanés très importants... sans pour autant consommer beaucoup de courant électrique. Son action revient à réaliser un effort de quelques Newtons sur quelques millimètres, c'est-à-dire à produire quelques joules pendant

quelques millisecondes, soit quelques centaines de Watts !

De ce fait, l'actionneur doit avoir un très fort rendement, ce qui exclut l'utilisation d'électro-aimants (bobines) et implique l'utilisation de systèmes à énergie potentielle.

Grâce à cela, le déverrouillage ultra rapide du disjoncteur est possible en toutes circonstances.

la mesure du courant

Déclencheur magnétothermique

Dans ce type de déclencheur, le bilame ne fournit pas, en fait, de valeurs de courant, mais réagit thermiquement et mécaniquement à ses effets.

■ thermique.

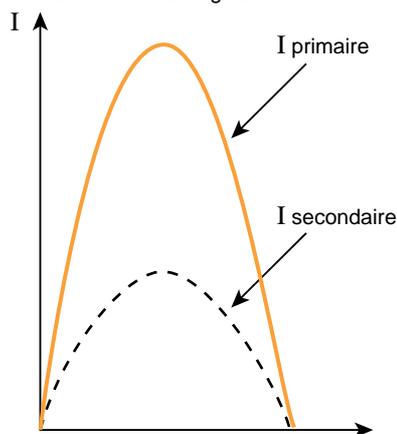
L'échauffement d'un bilame fait appel au même principe que celui des conducteurs, c'est-à-dire que la température d'échauffement est proportionnelle à l'apport d'énergie ($J = RI^2t$) provoqué par le passage d'un courant constant (I) pendant un temps donné (t). Le déclenchement est

donc provoqué pour une énergie J_0 ; de ce fait, une relation $t = f(I)$ est définie. Celle-ci est caractérisée de façon normative (CEI 947-2) par un point particulier (I,t) correspondant à une surcharge de 30 % pendant 2 heures. Ce paramètre détermine le bilame donc le calibre du déclencheur thermique.

Dans la pratique, un bilame est :

- à chauffage direct pour les petits disjoncteurs : le courant transitant par le pôle du disjoncteur traverse intégralement le bilame ; la constante de temps du bilame est dans ce cas faible et comparable à celle des câbles protégés,
- à chauffage indirect pour les gros disjoncteurs : un fil parcouru par le courant à surveiller est placé dans l'environnement immédiat du bilame. La distance - d'où résulte une impédance thermique - introduit un retard dans l'échauffement du bilame qui a ainsi une constante de temps augmentée. Toutefois, cette constante de temps demeure en général bien plus faible que celle des câbles protégés.

a) échantillonnage et numérisation du signal



b) correction de saturation

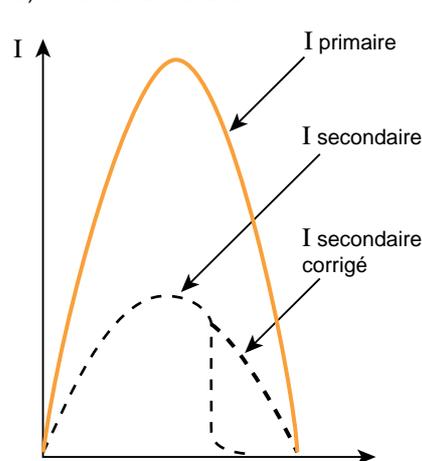


fig. 4 : échantillonnage et correction de la saturation éventuelle des TC.

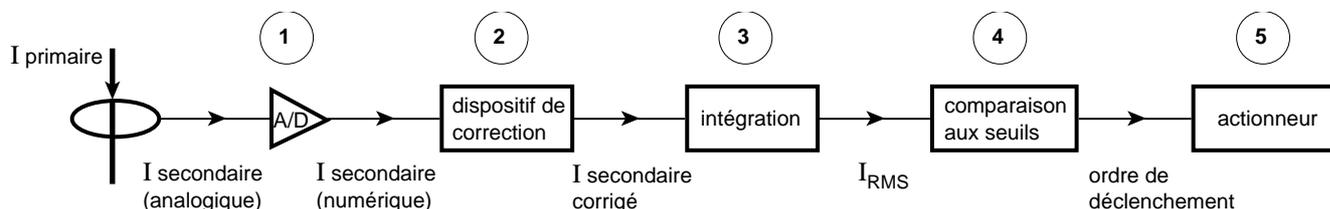


fig. 3 : schéma fonctionnel.

Dans les 2 cas, la constante de temps thermique du bilame est non réglable.

■ magnétique

En cas de court-circuit, le courant de défaut qui traverse la bobine crée un champ magnétique suffisant pour provoquer le déplacement d'une palette mobile. Celle-ci libère le mécanisme d'accrochage à ressorts et ouvre les contacts par action brusque.

Le réglage du seuil se fait au niveau de l'entrefer.

Au delà du seuil choisi, le temps de fonctionnement est sensiblement constant (quelques millisecondes à 50 millisecondes) (cf. fig. 5).

Les déclencheurs magnéto-thermiques ne mesurent pas la valeur du courant contrôlé.

Disjoncteur électronique

■ protection thermique (Long Retard)

Le déclencheur à technologie numérique utilise le modèle d'échauffement et refroidissement d'un conducteur.

En fait, il **modélise** la température du conducteur en calculant son échauffement en temps réel suivant son équation thermique. Une bonne approximation consiste à considérer que l'échauffement et le refroidissement d'un câble entre t et t + dt se fait selon les principes physiques suivants :

□ échauffement :

il résulte de l'apport de calories principalement par effet joule : $A i^2 t dt$. A = constante fonction de la résistance, de la masse, de la chaleur spécifique du conducteur,

□ refroidissement :

il résulte des pertes par conduction, convection, et rayonnement. Ces pertes sont quasiment proportionnelles à la différence de température entre le conducteur et la température ambiante, c'est-à-dire à l'échauffement θ . Soit au total $-\lambda \theta dt$ λ étant fonction des caractéristiques physiques et géométriques de l'installation du câble.

L'équation thermique du câble est donc :

$$d\theta = A i^2 t dt - \lambda \theta dt \text{ ou encore}$$

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = A i^2 t (1)$$

avec $\tau = 1/\lambda =$ constante de temps thermique du conducteur.

Si l'on procède par échantillonnage numérique à la fréquence f tel que

$dt = 1/f$, on obtient une équation numérique équivalente à (1) :

$$\theta_{t+dt} = [1-\alpha] \theta_t + \beta i^2 t$$

$$\text{avec } d\theta = \theta_{t+dt} - \theta_t,$$

$$\alpha = 1/\tau f \text{ et } \beta = A dt = A/f$$

$$\text{soit } \theta_{k+1} = [1-\alpha] \theta_k + \beta I_k^2 (2)$$

si la mesure à l'instant t représente la k-ième mesure et à l'instant t + dt la k + 1-ième.

La résolution de cette équation numérique permet alors la **modélisation exacte de l'échauffement du conducteur**.

Or l'équation (2) représentant la température calculée par étalonnage n'est ni plus ni moins que la fonction de transfert numérique d'un filtre passe bas du 1^{er} ordre (cf. fig. 6) auquel on applique comme signal d'entrée I_k^2 soit :

$$S_{k+1} = S_k + \gamma [I_k^2 - \gamma S_k]$$

$$= [1-\gamma] S_k + \gamma I_k^2$$

S_{k+1} représente la valeur efficace I_{eff} du courant après k + 1 échantillons.

De ce fait, la mise en place d'un tel filtre donne simplement la température du câble par son équivalent en valeur efficace du courant.

□ avantages de la technologie numérique :

- permet de calculer I_k^2 très simplement,
- permet de calculer la valeur efficace I_{eff} du courant donc l'échauffement, sur une période de temps compatible avec les constantes de temps des conducteurs (de l'ordre de plusieurs minutes à plusieurs heures, car les conducteurs ont des inerties thermiques (τ) différentes suivant leur taille). Cette caractéristique est intégrée dans le filtre intégrateur IIR - Infinite Impulse Respond - de l'algorithme de calcul ; la constante de temps est définie selon le dimensionnement du disjoncteur car celui-ci est lié à la

section et à l'inertie thermique des câbles qu'il doit protéger),

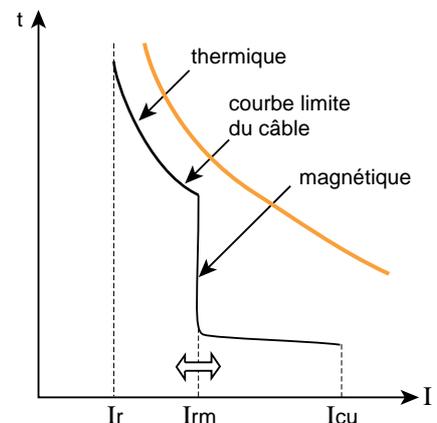
- le traitement de l'équation en temps réel rend ce calcul indépendant de la fréquence du réseau.

Cette gestion de l'échauffement, qui permet de suivre l'évolution des échauffements/refroidissements des conducteurs, est aussi appelée "mémoire thermique" du déclencheur électronique.

■ réalisation de la protection thermique : Long Retard (LR) et mémoire thermique.

Le comportement thermique d'un câble défini par l'équation (2) correspond aussi à la fonction long retard du disjoncteur électronique. Elle protège les câbles et les récepteurs contre les surcharges.

La valeur de la température θ , ou son équivalent courant I_{eff} calculé par filtrage numérique, est comparée à la valeur de réglage du seuil du long retard, liée à la limite admissible θ_m (cf. fig. 7), réalisant ainsi l'équivalent numérique de la fonction du bilame.



I_r = réglage du thermique
 I_{rm} = réglage du magnétique
 I_{cu} = pouvoir de coupure ultime

fig. 5 : courbe de déclenchement d'un disjoncteur magnétothermique.

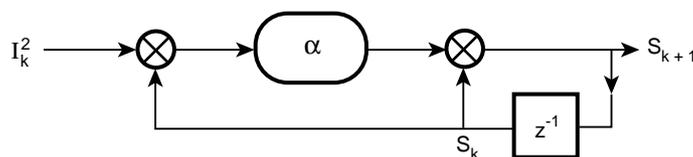


fig. 6 : algorithme de filtrage (R) du filtre numérique passe bas.

La connaissance en permanence de l'équivalent de la température du câble permet, outre le non dépassement de θ_m , des possibilités nouvelles dans la protection de la charge et du câble telles que :

- l'indication de surcharge et la gestion du départ protégé.

Une indication est possible dès que l'on dépasse le courant de réglage ou certains seuils préréglés. Cela permet le contrôle de charge du départ.

L'exploitant peut ainsi prévenir un déclenchement par surcharge en délestant un départ non prioritaire.

Ce type d'information constitue une ouverture vers les automatismes de distribution,

- la mémorisation des échauffements après arrêt d'alimentation.

Si une surcharge provoque le déclenchement du disjoncteur, ou s'il se produit une rupture de l'alimentation électrique en amont (passage sur source de remplacement, par exemple) le suivi du refroidissement continue de se faire. Mais la gestion est alors

différente puisque l'électronique n'est plus alimentée.

Dès la coupure, la température des conducteurs dans le temps est modélisée par la tension de décharge d'un circuit à constante de temps très importante (similaire à la constante thermique des conducteurs).

Au retour de l'alimentation, par remise en service du disjoncteur ou enclenchement de la charge, l'électronique du déclencheur va récupérer la valeur de tension résiduelle qui sera utilisée comme nouvelle température initiale des conducteurs dans l'algorithme de filtrage modélisant l'échauffement des conducteurs.

- protection contre les courts-circuits (Court Retard - CR).

La fonction court retard protège le réseau contre les surintensités élevées (en général, en distribution, de l'ordre de $10 I_n$ réglable par l'utilisateur).

Elle est réalisée, de la même façon que la protection long retard, par

filtrage mais la valeur efficace du courant est traitée sur une période de temps (quelques ms) compatible avec la rapidité d'intervention nécessaire à cette fonction. Un retard intentionnel réglable par l'utilisateur est aussi intégré dans le traitement de l'information (cf. fig. 8).

- réalisation de la protection Instantanée.

La protection instantanée protège contre les courts-circuits francs.

Le traitement est effectué sur la valeur crête non filtrée. Elle ne possède pas de temporisation.

Protections long retard, court retard et instantanée donnent «la» courbe de déclenchement d'un disjoncteur à déclencheur électronique (cf. fig. 9).

Ces éléments de fonctionnement étant traités, il convient d'examiner maintenant comment les courants perturbés ou les applications particulières sont prises en compte par un disjoncteur à déclencheur électronique.

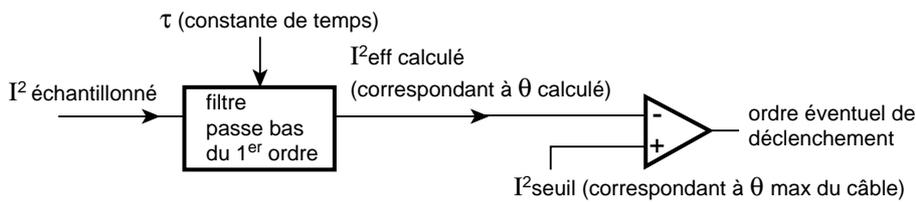


fig 7 : réalisation de la fonction Long Retard LR.

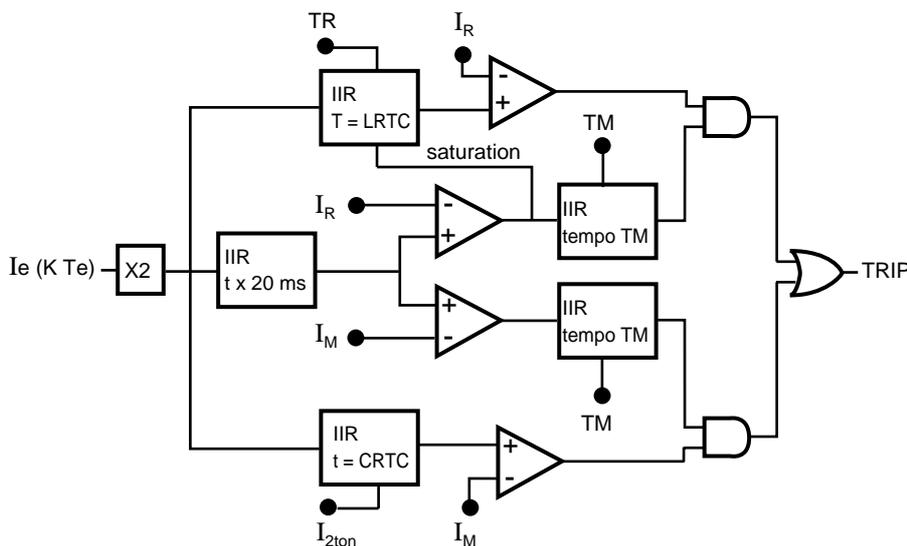


fig 8 : structure de l'ensemble des filtres long retard et court retard.

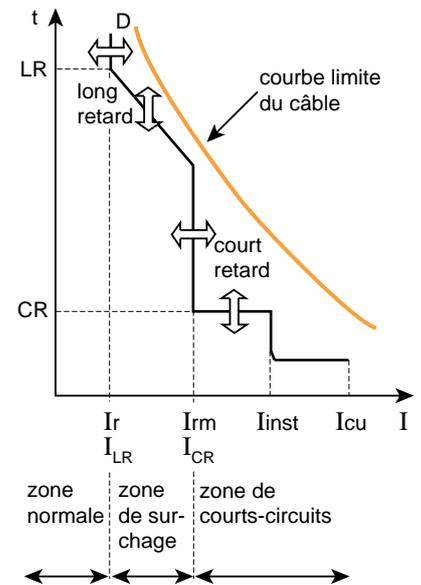


fig. 9 : courbes de déclenchement d'un disjoncteur électronique.

2. les courants harmoniques

Du fait de l'évolution des récepteurs, (en particulier l'usage de plus en plus fréquent de convertisseurs statiques), les courants rencontrés sur les réseaux de distribution ne sont plus des sinusoïdes à 50 Hz parfaites... loin s'en faut !

Au niveau de la mesure, ces courants ont une influence gênante principalement en fonctionnement normal pour le contrôle des effets thermiques ; dans le cas de courants de défauts au-delà de $10 I_n$ leur effet est pratiquement nul.

rappels théoriques sur les courants harmoniques

Charges non linéaires et harmoniques

La loi d'Ohm exprime une proportionnalité (linéarité) entre courant et tension sinusoïdaux à la fréquence industrielle.

Certains récepteurs (dits non linéaires) ont pour effet de déformer l'onde sinusoïdale de courant et par conséquent de tension.

Cette déformation s'analyse à l'aide de la décomposition en série de Fourier, qui fait apparaître des courants dits "harmoniques" qui se superposent à l'onde sinusoïdale initiale (le fondamental) et créent sa déformation.

Décomposition harmonique (de Fourier)

Tout courant et tension dans un réseau électrique peut être représenté par la superposition d'une composante continue, d'une composante sinusoïdale à la fréquence industrielle et d'un certain nombre de composantes sinusoïdales (harmoniques) ayant une fréquence multiple de la fréquence industrielle. L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de Fourier de la fonction courant ou tension $y(t)$:

$$y(t) = Y_0 + Y_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

Y_0 = amplitude de la composante continue,
 Y_1 = valeur efficace de la composante sinusoïdale 50 Hz (ou fondamental),
 ω = pulsation du fondamental,
 φ_1 = déphasage du fondamental
 Y_n (pour $n > 1$) = valeur efficace de la composante harmonique de rang n ,
 $n\omega$ = pulsation de l'harmonique n ,
 φ_n = déphasage de l'harmonique n .

Loi d'Ohm

En présence de récepteurs non linéaire, la loi d'Ohm s'applique uniquement entre courant et tension harmoniques de même rang "n" avec une valeur d'impédance calculée pour une pulsation égale à n fois celle du fondamental :

$$U_n = Z(n\omega) \times I_n.$$

On peut dire que la déformation de l'onde de courant amène une déformation correspondante de la tension, pour chaque rang d'harmonique, dont l'amplitude et la phase dépendent de la valeur de l'impédance pour chaque fréquence harmonique. Il n'y a plus de relation simple entre les valeurs efficaces de ces deux ondes considérées globalement.

Courant efficace déformé

$I_{\text{eff}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_n^2 + \dots}$
que l'on peut exprimer de même par les différents taux d'harmoniques en courant h_{ni} : I_n/I_1 :

$$I_{\text{eff}} = I_1 \sqrt{1 + h_{2i}^2 + h_{3i}^2 + \dots + h_{ni}^2} \dots \\ = I_1 \sqrt{1 + D_i^2}$$

ce qui fait apparaître le taux de distorsion en courant D_i .

Facteur de crête du courant

Pour le fondamental,
 I_1 crête : $\sqrt{2} I_1$, et le facteur de crête est $\sqrt{2}$.

Pour le courant déformé total,

$$I_{\text{crête}} = K I_{\text{eff}} = K \cdot I_1 \sqrt{1 + D_i^2}$$

Effets des harmoniques

■ effet du facteur crête :
□ si le facteur de crête est supérieur à $\sqrt{2}$, il y a un risque de déclenchement intempestif si les

protections déduisent I_{eff} à partir de $I_{\text{crête}}$,

□ si le facteur de crête est inférieur à $\sqrt{2}$, il y a un risque de surchauffement du fait du non déclenchement de ces mêmes protections ;

■ échauffements.

Pour un récepteur donné, ayant un courant nominal I_n à 50 Hz, le courant efficace dans les conducteurs sera plus élevé car multiplié par $\sqrt{1 + D_i^2}$, d'où :

□ pertes supplémentaires et donc surchauffement des transformateurs, des câbles et des générateurs,
□ pertes magnétiques, échauffements et couples parasites dans les machines tournantes ;

■ circulation de courants élevés dans le neutre en présence d'harmonique 3 et multiple de 3.

De ce fait, pour la protection des conducteurs, c'est la valeur efficace que les déclencheurs thermiques doivent prendre en compte.

Le lecteur particulièrement intéressé par le phénomène harmonique peut lire le Cahier Technique n° 152.

générateurs de courants harmoniques

Redresseurs

Les redresseurs type pont de Graëtz triphasés créent des déformations harmoniques.

Ce type de redresseur, relativement répandu dans tous les appareils industriels car très économique, est cependant pollueur pour le réseau d'énergie. Ces redresseurs se retrouvent dans de nombreuses applications industrielles telles que variateurs de vitesse, onduleurs, alimentations informatiques. Ils se retrouvent aussi dans le tertiaire du fait de la prolifération des alimentations à découpage des applications bureautiques et des lampes fluorescentes à ballast électronique.

La forme du courant d'entrée dépend fortement de la présence d'une inductance de lissage. La majorité des redresseurs n'en comporte pas.

■ exemple 1 : (cf. fig. 10)

Courant d'entrée d'un redresseur triphasé (pont de Graëtz non contrôlé).

La décomposition harmonique correspondant au courant de la figure 10 est (en pourcentage de l'amplitude du fondamental et avec le déphasage par rapport à ce dernier) :

h_1	(50 Hz)	=	100 %
h_5	(250 Hz)	=	33 % (180°)
h_7	(350 Hz)	=	2,7 %
h_{11}	(550 Hz)	=	7,3 % (180°)
h_{13}	(650 Hz)	=	1,6 %
h_{17}	(850 Hz)	=	2,6 % (180°)

taux de distorsion global :

$$D = \sqrt{h_3^2 + h_5^2 + h_7^2 + \dots + h_{17}^2} = 6 \%$$

$$I_{\text{eff}} = 106 \% \text{ de } I_{h_1}$$

$$I_{\text{max}} / \sqrt{2} = 78 \%$$

Cela signifie qu'un déclencheur électronique basé sur une mesure efficace à partir du courant crête mesurerait une valeur efficace de 78 au lieu de 106. Il y aurait, donc, une sous-protection de l'installation dans ce cas de figure.

■ exemple 2 : (cf. fig.11)

Courant d'entrée du redresseur triphasé d'un variateur de vitesse pour moteur asynchrone.

La décomposition harmonique correspondant au courant de la figure 11 est (en pourcentage de l'amplitude du fondamental et avec le déphasage par rapport à ce dernier) :

h_1	(50 Hz)	=	100 %
h_5	(250 Hz)	=	85 % (180°)
h_7	(350 Hz)	=	72 %
h_{11}	(550 Hz)	=	41 % (180°)
h_{13}	(650 Hz)	=	27 %
h_{17}	(750 Hz)	=	8 % (180°)

taux de distorsion global, ici :

$$D = \sqrt{h_3^2 + h_5^2 + h_7^2 + \dots + h_{15}^2} = 58 \%$$

$$I_{\text{max}} / \sqrt{2} = 203 \%$$

Cela signifie qu'un déclencheur électronique basé sur une mesure efficace à partir du courant crête mesurerait une valeur efficace de 203 au lieu de 158. Il y aurait, donc, une sur-protection de l'installation dans ce cas de figure.

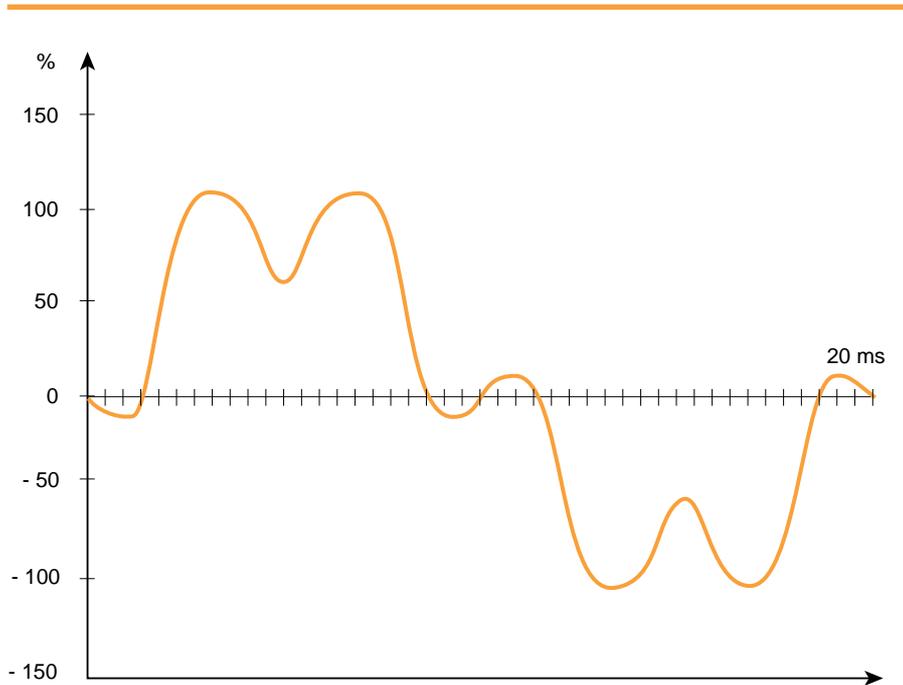


fig. 10 : exemple 1 : redresseur.

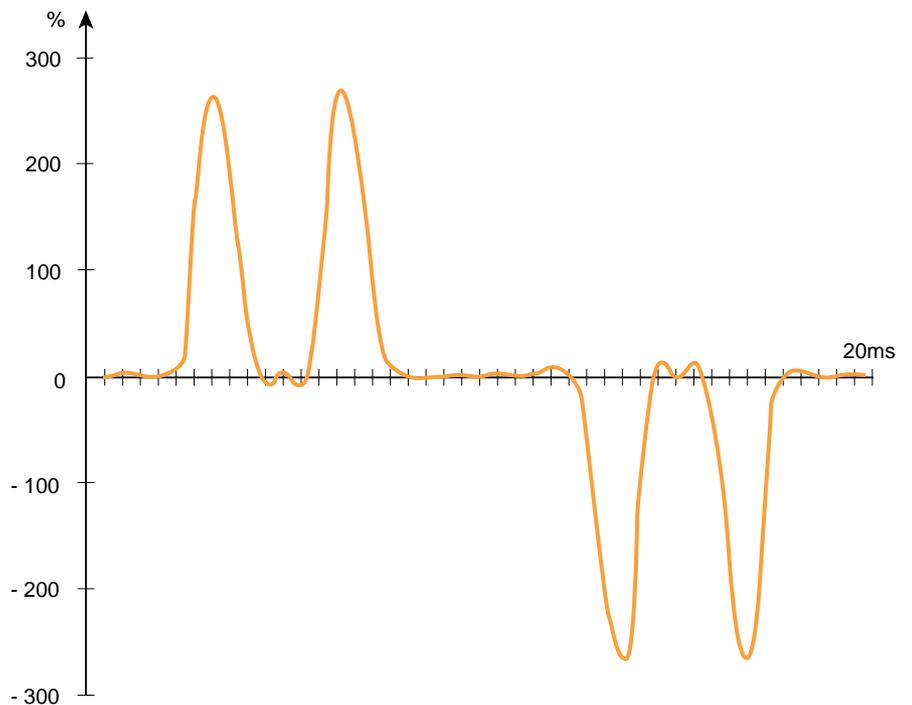


fig. 11 : exemple 2 : variateur de vitesse à fréquence variable.

Éclairage fluorescent classique

En régime établi, on note la présence de courants harmoniques (cf. fig. 12). La décomposition harmonique pour le courant phase donne :

h_1	(50 Hz)	=	100 %
h_3	(150 Hz)	=	35 %
h_5	(250 Hz)	=	27 % (180°)
h_7	(350 Hz)	=	16,1 % (180°)
h_9	(450 Hz)	=	2,2 % (180°)
h_{11}	(550 Hz)	=	3,4 %
h_{13}	(650 Hz)	=	1,1 %

$D = 42,6 \%$,

$I_{\text{eff}} = 199 \%$ de $I_{h_1} = 39 \text{ A}$.

A noter que, s'agissant de récepteurs monophasés bien répartis, le courant efficace dans le neutre est de 33 A du fait des harmoniques de rang 3 et multiples, alors qu'il devrait être nul.

gestion des courants harmoniques par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT

Les premiers déclencheurs électroniques étaient de technique analogique. Au niveau du circuit de mesure la solution consistait à mettre en œuvre, derrière un redresseur double alternance, un simple filtre RC. Cette technique répondait assez bien au besoin tant que les phénomènes harmoniques restaient marginaux.

L'évolution technologique, en particulier les solutions intégrées de type ASIC intégrant un grand nombre de composants a rendu possible la réalisation d'un échantillonnage rapide

et très fin du signal. L'utilisation, maintenant, d'un filtre numérique permet de calculer simplement la valeur efficace et de modéliser l'équation thermique du conducteur (cf. § 1).

La problématique est alors de définir la fréquence de l'échantillonnage pour avoir une valeur efficace précise.

Pour calculer la valeur efficace vraie d'un signal de fréquence fondamentale f chargé d'harmoniques

jusqu'au rang n , le théorème de Shannon indique qu'il faut échantillonner ce signal à la fréquence $2n \cdot f$. Pratiquement, l'échantillonnage retenu pour les déclencheurs électroniques est 1600 Hz ce qui permet une prise en compte des courants harmoniques jusqu'au rang 16.

Les exemples précédents ont montré que des courants harmoniques au-delà du rang 16 sont parfaitement négligeables.

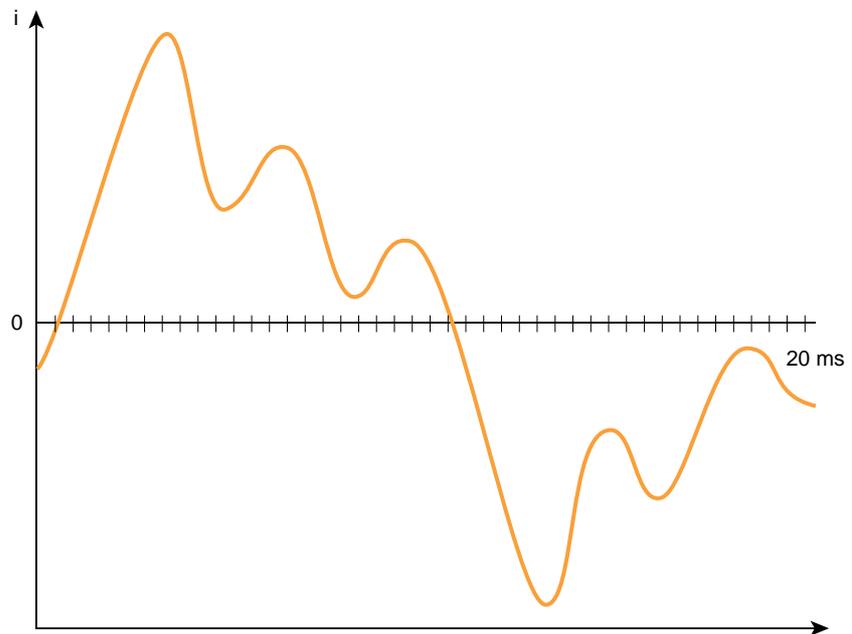


fig. 12 : éclairage fluorescent.

3. les courants impulsionsnels et cycliques

Pour certains départs, le principal problème à résoudre est de bien discriminer le courant normal de mise sous tension du courant de défaut. Les différentes charges présentant ce type de problème sont principalement des récepteurs tels que transformateurs BT/BT, moteurs, lampes au tungstène, fluorescentes... Un autre cas à résoudre est de bien protéger les câbles qui alimentent des récepteurs à courant cyclique. Nous allons, dans ce chapitre, examiner ces deux cas.

exemples de courants d'appel

Transformateurs BT/BT

Un primaire de transformateur est une self à circuit magnétique. A la mise sous tension, un double phénomène peut se produire :

- d'une part l'établissement du courant de charge (régime transitoire) d'un circuit LR (ayant les caractéristiques en régime établi du primaire du transformateur) ;
- d'autre part, du fait de la présence du circuit magnétique saturable, une forte pointe de courant, en fonction de l'instant de mise sous tension, due à la saturation du circuit magnétique.

On observe donc une courbe d'enclenchement telle que celle de la figure 13 qui se traduit par une série de pointes s'amortissant suivant une loi exponentielle.

La première pointe de courant atteint fréquemment 10 à 15 fois le courant assigné du transformateur et même jusqu'à plus de 20 fois le courant nominal pour les faibles puissances (≤ 10 kVA). Le courant d'enclenchement s'amortit très rapidement avec une constante de temps de l'ordre de quelques dizaines de ms.

A titre d'exemple : pour un transformateur BT/BT de 50 kVA, la

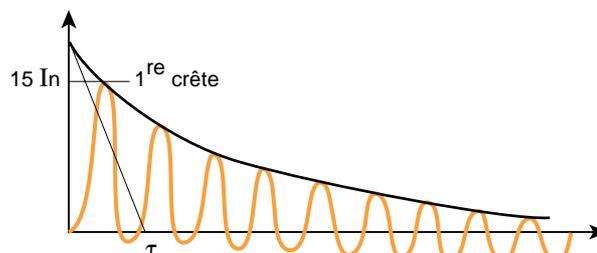


fig 13 : enclenchement d'un transformateur.

pointe est de l'ordre de $15 I_n$ et la constante de temps du phénomène 20 ms (cf. fig. 13).

Moteurs

Les moteurs asynchrones représentent 90 % des moteurs utilisés. Ce type de moteur présente au démarrage un appel de courant dont la courbe enveloppe a l'allure de la figure 14 (pour un démarrage direct). Une pointe d'excitation (8 à $12 I_n$) suivie d'un courant de démarrage (de 5 à $8 I_n$) (cf. fig. 14).

Eclairage fluorescent

Les lampes fluorescentes absorbent aussi un courant thermique très important à la mise sous tension.

Alimentations à découpage

Les alimentations à découpage en entrée des charges informatiques par exemple présentent des pointes de l'ordre de $10 I_n$ pendant la mise sous tension (charge d'un condensateur à travers un redresseur).

Il convient également de noter que beaucoup de récepteurs ont un courant d'appel après une coupure brève qui est supérieure au courant de première mise sous tension : l'exemple classique est la batterie de condensateurs qui reste chargée.

L'électronique numérique a permis de réaliser la protection court-retard bien adaptée à la différenciation des

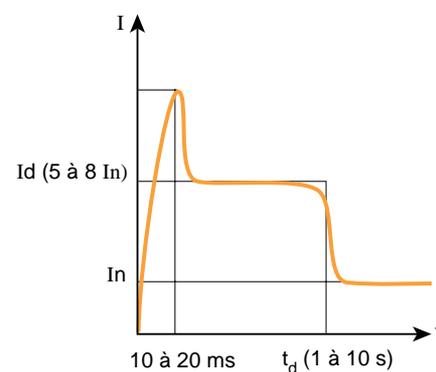


fig. 14 : enclenchement d'un moteur.

courants impulsionsnels par rapport aux courants de court-circuit (cf. fig. 5).

gestion des courants impulsionsnels par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT

Examinons comment un déclencheur électronique gère les courants transitoires supérieurs au seuil du court-retard.

Si le courant dépasse le seuil I_m , le déclencheur au moyen du filtrage IIR calcule sur une période très courte (quelques ms) la valeur efficace du courant, ce qui va « lisser » cette surcharge.

C'est une sorte de temporisation fonction de l'énergie du courant impulsionnel.

■ s'il s'agit d'un courant impulsionnel normal qui fournit une puissance importante dans un temps très court, puis diminue rapidement, le seuil de déclenchement n'est pas atteint. La prise en compte de l'énergie de la pointe (et non de sa valeur crête) permet de passer ce transitoire même s'il dure plusieurs périodes, alors qu'un déclencheur magnétique aurait fonctionné (cf. fig. 15).

■ si le transitoire se révèle être un défaut persistant (cf. fig. 16) l'incrémentation du filtre de la fonction court-retard se poursuit très rapidement ce qui provoque le déclenchement rapide après le dépassement du seuil. Cette technique permet aussi de surveiller des courants de défauts particuliers - par exemple courant résultant du blocage rotor d'un moteur.

charges à courants cycliques

Le fonctionnement intermittent d'un moteur, d'une charge, génère des échauffements rapides surtout si les courants à la mise sous tension sont importants.

Les câbles d'alimentation, comme les charges, subissent les mêmes contraintes de courant, mais pas obligatoirement les mêmes échauffements (constantes de temps thermiques différentes). Il existe des protections spécifiques pour certains récepteurs.

La valeur des surintensités qu'un câble peut supporter est fonction de l'échauffement initial et du temps de refroidissement qui s'écoule entre deux surintensités consécutives.

Ainsi, un câble peut être dimensionné pour l'énergie qu'il véhicule si le cycle est inférieur à sa constante de temps thermique.

En reprenant le modèle d'équation thermique d'un câble, l'échauffement cyclique d'un câble peut être représenté par une courbe du type de celle de la figure 17.

C'est le cas par exemple de soudeuses, de contacteurs statiques à trains d'ondes ou de moteurs à démarrages cycliques.

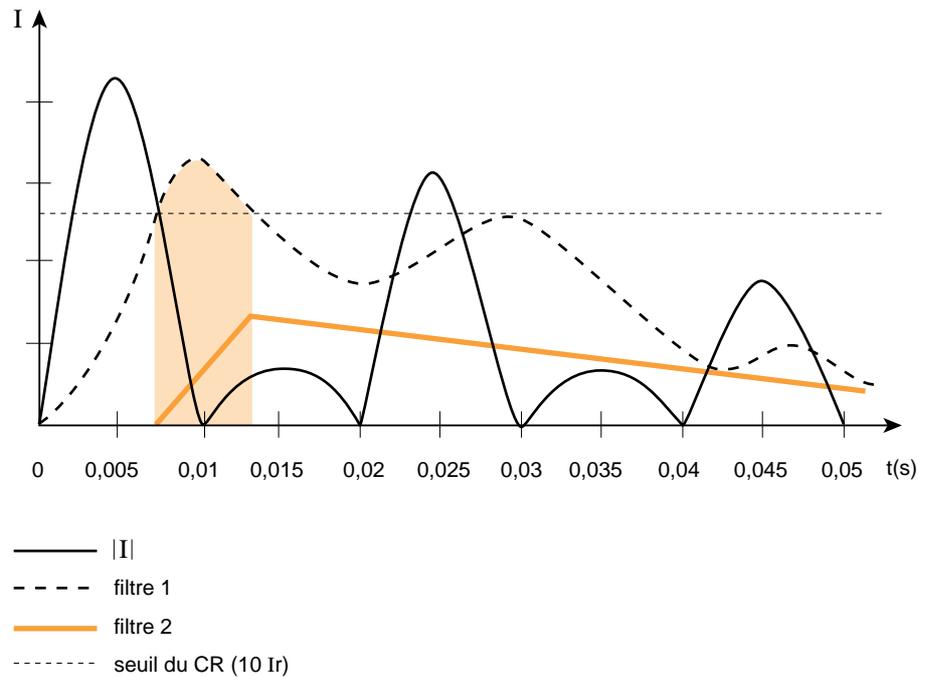


fig 15 : courant impulsionnel résolu par «lissage» du filtre IIR.

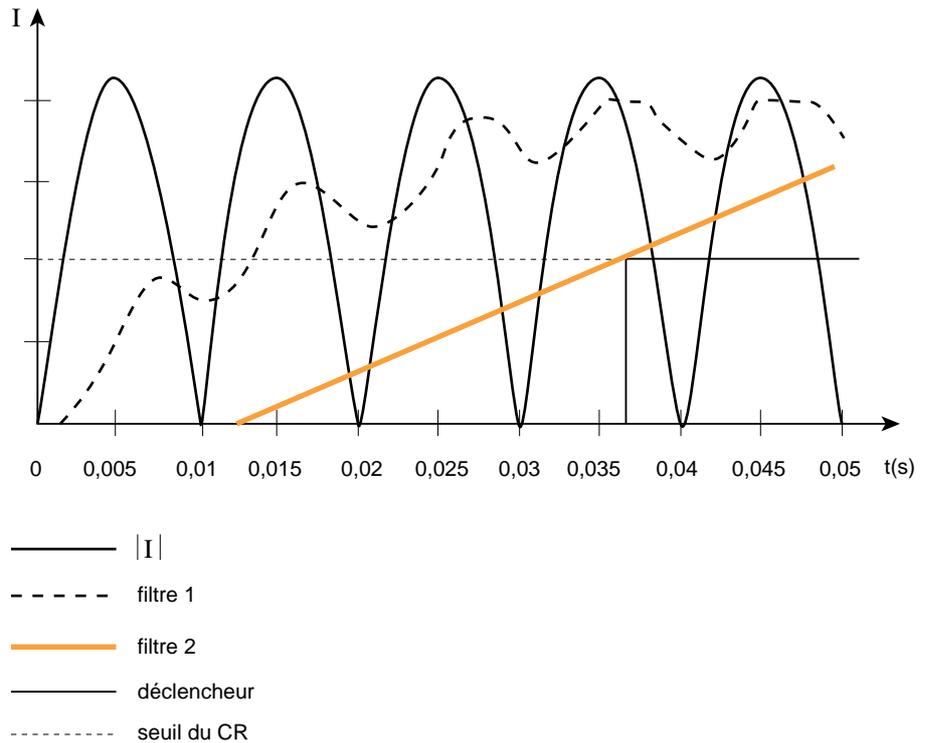


fig 16 : défaut persistant.

gestion des courants cycliques par les déclencheurs électroniques des disjoncteurs BT

Les déclencheurs à électronique numérique prennent en compte l'état de refroidissement et gèrent finement la contrainte thermique sur les conducteurs comme ceci a été expliqué à la fin du premier chapitre. Quelles que soient les caractéristiques du courant cyclique I/I_n , période, rapport cyclique, le câble est protégé si le courant assigné de la protection (I_r) est correct. Mais pour utiliser au maximum les possibilités du câble sans

déclenchement du disjoncteur et limiter les contraintes en cas de défaut, il faut utiliser les larges possibilités de réglage des protections Long et Court Retard.

A titre d'exemple, la figure 18 explicite les cas extrêmes :

- I/I_r élevé, mais de faible durée ;
- I/I_r proche de 1, mais de longue durée.

Ici, comme pour les courants d'appel, on peut constater la supériorité des déclencheurs électroniques, ceci grâce à l'existence de la fonction court-retard, mais surtout de par la meilleure performance de sa fonction thermique par rapport aux bilames.

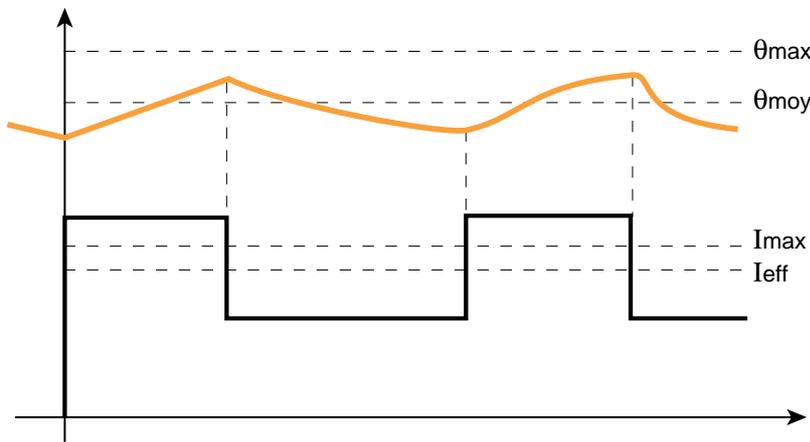


fig. 17 : échauffement cyclique d'un conducteur, avec charge continue plus charge cyclique.

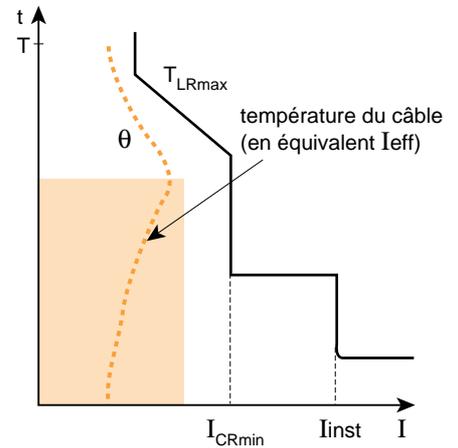
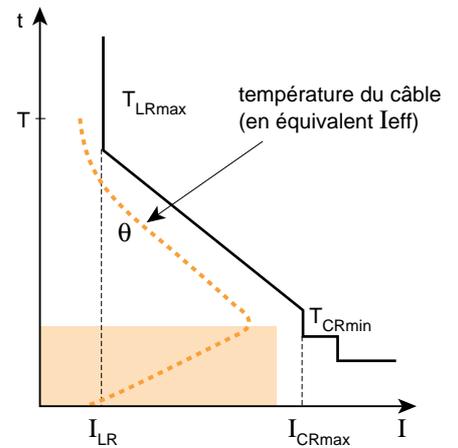


fig. 18 : réglages du Long Retard et du Court Retard pour des charges cycliques fortes et brèves ou faibles et longues (régime établi)

4. disjoncteurs électroniques : des possibilités étendues

les réglages des disjoncteurs électroniques

Face aux courants déformés et non constants, les déclencheurs électroniques simplifient la tâche du concepteur d'installation et des exploitants, ceci notamment grâce à son aptitude à prendre en compte les courants efficaces vrais, à gérer les surintensités ; mais aussi grâce à la souplesse et à l'étendue des réglages.

Courants harmoniques

Du fait de la prise en compte exacte des effets des courants harmoniques, aucun réglage particulier - liés à ces courants - n'est nécessaire au niveau du déclencheur.

La possibilité de connaître la valeur efficace du courant en temps réel, par sa mesure grâce à l'électronique, permet éventuellement d'affiner le réglage de I_R . De plus, la technologie numérique permet de transmettre facilement cette information sur un ampèremètre - en local ou à distance - ou sur bargraph.

Courants impulsionnels

La possibilité offerte par l'électronique de discerner les courants impulsionnels des courants de défaut permet de mieux protéger les câbles tout en évitant les déclenchements intempestifs.

Courants cycliques

L'ajustement du courant I_R pour le dimensionnement exact des conducteurs est parfaitement compatible avec un fonctionnement présentant des surcharges normales, ceci en jouant sur les réglages des protections court et long retard.

Courbes de déclenchement

Un des intérêts des disjoncteurs électroniques est de procurer une protection « universelle ». Avec un même déclencheur, la prise en compte de l'ensemble des besoins des exploitants est possible grâce à la souplesse et à l'étendue des réglages.

En effet, l'électronique permet des réglages dans une large plage tant en seuil qu'en temporisation.

Outre la possibilité de bien répondre au problème des courants d'appel et cycliques, c'est un avantage certain dans la mise en œuvre de la sélectivité chronométrique.

C'est aussi la possibilité avec un même appareil de protéger un transformateur, un câble ou un alternateur (cf. à titre d'exemple la figure 19).

les apports du numérique à la sûreté d'exploitation

Le numérique, utilisant des ASIC à grande intégration, permet de réaliser de multiples fonctions de mesure, de protection, de contrôle-commande, de communication.

Cette technologie confère en plus une fiabilité et une immunité (compatibilité électromagnétique) plus grande qu'avec des technologies discrètes.

De multiples fonctions

Outre les fonctions de protection des conducteurs actifs contre les surintensités et courts-circuits, d'autres fonctions sont intégrées ou intégrables, à titre d'exemple :

- protection contre les défauts de terre (Ground Fault Protection -GFP-), cette fonctionnalité étant souvent demandée pour les installations aux USA,
- contrôle de charge par calcul de I_{eff}/I_{LR} qui fournit à l'utilisateur une indication du niveau de charge du départ concerné,
- courant de court-circuit coupé,
- nombre de manœuvres (utile pour gérer la maintenance).

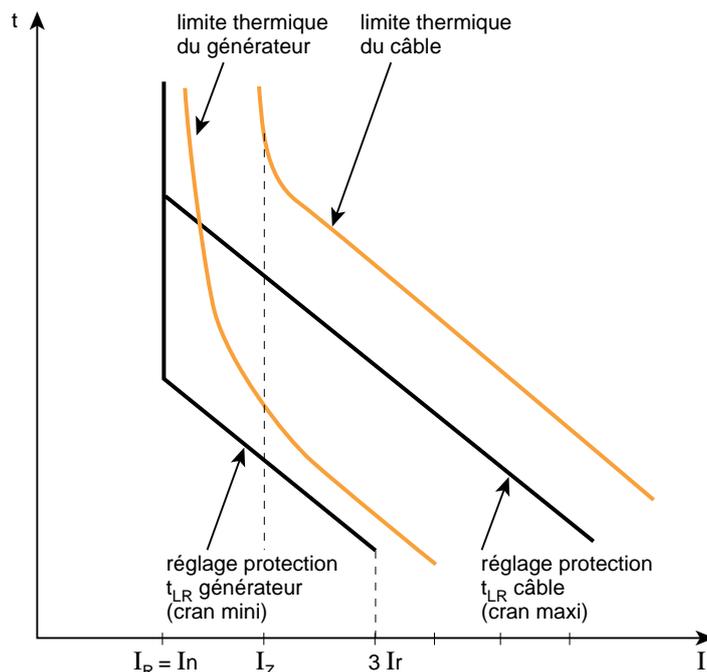


fig. 19 : courbes de déclenchement long retard d'un disjoncteur électronique protégeant un câble ou un générateur

Fiabilité

Le disjoncteur se doit d'être un appareil à très haut niveau de fiabilité. C'est pourquoi, l'électronique intégrée possède une fonction d'auto-surveillance qui signale un dysfonctionnement éventuel du microprocesseur ou une élévation anormale de la température.

De plus, elle doit satisfaire aux essais définis dans les normes CEI 801 et CEI 1000, précisant la tenue CEM des appareils. En particulier, l'immunité aux champs magnétiques.

la communication par BUS

La technologie numérique et la position du disjoncteur dans l'installation électrique permettent de mettre à disposition facilement sur le Bus, l'ensemble des paramètres pertinents nécessaires à la bonne exploitation du réseau. L'électronique numérique

intégrée permet la communication vers les systèmes de gestion de la distribution électrique et de supervision. Les données transmises correspondent à des informations de l'environnement du disjoncteur :

- position des commutateurs de réglage,
- intensités des courants de phase et de neutre,
- dépassement du seuil contrôle de charge,
- alarme de surcharge,
- cause de déclenchement.

L'utilisation de ces informations pour établir des historiques permet à l'exploitant et/ou au gestionnaire de mieux gérer son installation.

les normes des disjoncteurs BT

Les disjoncteurs de type industriel répondent à la norme CEI 947-2.

Le poids de plus en plus important des problèmes d'environnement, en particulier de Compatibilité ElectroMagnétique (CEM), a poussé les instances de normalisation à intégrer dans la norme des disjoncteurs des recommandations relatives à ces phénomènes (cf. fig. 20).

disjoncteurs électroniques : de nouvelles possibilités offertes

La garantie apportée par la norme

Le respect de la norme CEI 947-2, en particulier l'annexe F et une conception adaptée sont des gages de fiabilité pour un disjoncteur électronique. De plus, les tests demandés par la CEI 947-2 garantissent au concepteur d'installation et à l'utilisateur **une parfaite aptitude à la fonction** de protection (cf. Cahier Technique n° 150, pour plus de détails).

essai	perturbations	essais réalisés
F.4.1	courants non-sinusoïdaux.	3 essais avec facteur de crête ≈ 2 H3 $\approx 80\%$; H5 $\approx 50\%$ et H3 $\geq 60\%$ + H5 $\geq 14\%$ + H7 $\geq 7\%$.
F.4.2	creux et interruptions.	réduction du courant de 30 % ; 60 % ; 100 % pendant 0,5 à 50 périodes.
F.4.3	variations de fréquence.	gamme de fréquences du disjoncteur. Pas de 1 Hz.
F.5 F.5.2.2.1 F.5.2.2.2	transitoires conduits et perturbations HF : CEI 1000-4-4 transitoires rapides. CEI 1000-4-5 ondes de chocs.	onde 5/50 ns (Fr: 2, 5 kHz) niveau 4 kV, onde 1,2/50 μ s - 6 kV et 8/20 μ s - 3 kA.
F.6	perturbations électrostatiques CEI 1000-4-2.	décharge au contact 8 kV.
F.7	perturbations par champs électromagnétiques CEI 1000-4-3	de 26 à 1000 MHz. 10 V/m. modulation d'amplitude 80 % 1 MHz.

fig. 20 : tableau des essais CEM suivant l'annexe F de la norme CEI 947-2.

5. conclusion

Les disjoncteurs BT ≥ 250 A, à déclencheur électronique, sont parfaitement adaptés aux contraintes diverses rencontrées dans les installations.

La puissance de calcul actuelle des ASIC a permis de nombreux progrès, ainsi :

- malgré l'augmentation des courants harmoniques, la protection long retard prend en compte la vraie valeur efficace,
- la mémoire thermique, plus performante que les bilames à

chauffage indirect, permet de mieux suivre l'évolution de la température des câbles notamment dans le cas de charges à fonctionnement cyclique,

- les réglages de la protection court retard permettent de mieux gérer, que les magnétiques, les courants de mise sous tension,
- la largeur des divers réglages permet l'adaptation aux câbles de section différente et aux générateurs.

Outre ces fonctions de protection, l'électronique numérique permet au disjoncteur de transmettre par Bus des

mesures, des états... d'accéder au téléajustage, et bien sûr d'être télécommandés. Ainsi les disjoncteurs modernes sont devenus des capteurs actionneurs intelligents qui, dans le cadre de la Gestion Technique de la distribution Electrique (GTE), contribuent grandement à faciliter l'exploitation des réseaux et à améliorer la continuité de service. Un seul regret... l'électronique coûte encore trop cher pour être utilisée dans les disjoncteurs de calibre inférieur à 250 A.

6. bibliographie

Normes

- CEI 947-2 : Appareillage à basse tension - 2^e partie : disjoncteurs.
- NF C 63-120 : Appareillage à basse tension - 2^e partie : disjoncteurs.
- CEI 364/NF C 15-100 : Installation électrique des bâtiments.
- CEI 801 : Compatibilité électromagnétique pour les matériels de mesure et de commande dans les processus industriels.
- CEI 1000 : Compatibilité électromagnétique (CEM).
- CEI 50 : Index général du vocabulaire électrotechnique.

Cahiers Techniques Merlin Gerin

- Perturbations électriques en BT, Cahier Technique n° 141 - R. CALVAS.
- Evolution des disjoncteurs BT avec la norme CEI 947-2, Cahier Technique n° 150 - E. BLANC.
- Technique de coupure des disjoncteurs, Cahier Technique n° 154 - R. MOREL.
- Coupure en BT par limitation du courant, Cahier Technique n° 163 - P. SCHUELLER.

- La sélectivité énergétique en BT, Cahier Technique n° 167 - R. MOREL, M. SERPINET.

Autres documents Merlin Gerin

- Guide de l'installation électrique 07/91.
- Les filtres IIR et FIR - E. SUPITZ.
- La distribution électrique de qualité - D. FRAISSE.
- L'électronique dans les disjoncteurs BT - D. FRAISSE.

Autres documents externes

- Guide de l'ingénierie électrique.
- J3E n° 619.
- Le contact électrique - M. RIVAL.