



Marc Serpinet

Entre chez Merlin Gerin en 1972, et travaille jusqu'en 1975 dans les bureaux d'études des équipements Basse Tension. Il est alors particulièrement chargé de la définition des armoires électriques suivant les schémas d'installation. Depuis, il conduit des essais de recherche et développement dans le domaine des disjoncteurs Basse Tension. Est diplômé ingénieur ENSIEG en 1981. En 1991, après avoir piloté, de la pré-étude à l'industrialisation, un projet pour disjoncteurs Compact, il prend la responsabilité du bureau d'étude «anticipation électromécanique»



Robert Morel

Ingénieur ENSMM Besançon, entre chez Merlin Gerin en 1971 et se spécialise dans la conception de l'appareillage électrique Basse Tension. Il contribue à l'étude du système Sellim. En 1980 a en charge le développement de disjoncteurs Compact et d'interrupteurs Interpact. En 1985 devient responsable du bureau d'étude «coupure Basse Tension» de la division Basse Tension de Puissance.

n° 167

**la sélectivité
énergétique
en BT**

lexique

Ec

Energie que laisse passer le dispositif de protection lors de la coupure, elle est caractérisée par $\int i_c^2 \cdot dt \approx I^2 \cdot t_c$.

ic

Courant de court-circuit traversant réellement le disjoncteur du fait de la limitation (le courant coupé est plus faible que Ip).

Ip

Courant de court-circuit présumé qui se développerait en l'absence de dispositifs de protection (valeur efficace).

Ir

Correspond au réglage de la protection contre les surcharges.

tc

Temps réel de coupure (extinction de l'arc).

UT

Unité de Traitement électronique.

Actionneur

Dispositif capable de développer une action mécanique.

Calibre

Correspond au réglage maximum du déclencheur.

Déclencheur instantané à haut seuil (DIN)

Déclencheur instantané utilisé pour limiter la contrainte thermique sur court-circuit.

Déclencheur instantané (INS)

Déclencheur qui ne possède aucun dispositif de retard intentionnel et dont l'action intervient à partir de quelques In (protection contre les courts-circuits).

Déclencheur long retard (LR)

Déclencheur qui possède un dispositif de retard intentionnel de plusieurs secondes (protection contre les surcharges).

Déclencheur retardé ou court-retard (CR)

Déclencheur qui possède un dispositif de retard intentionnel de quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes.

Si le retard diminue lorsque Ip augmente, on parle de court-retard dépendant (CRD).

Disjoncteur limiteur

Disjoncteur qui, lors de la coupure d'un courant de court-circuit, limite le courant à une valeur nettement inférieure au courant présumé (Ip).

Disjoncteur sélectif

Disjoncteur équipé d'un dispositif de retard intentionnel (sélectivité chronométrique).

Sélectivité partielle

La sélectivité est partielle lorsqu'elle est assurée jusqu'à une certaine valeur du courant Ip.

Sélectivité totale

La sélectivité est totale lorsqu'elle est assurée quelle que soit l'intensité du courant de défaut présumé.

Taille

Correspond au découpage de la gamme ex. : taille 160 A, 250 A, 630 A, 800 A ...

la sélectivité énergétique en BT

sommaire

1. La sélectivité en BT	Définition	p. 4
	Contribution à l'objectif de sécurité et de disponibilité	p. 4
	Zones de sélectivité	p. 5
2. Les techniques de sélectivité lors des courts-circuits	Sélectivité ampèremétrique	p. 6
	Sélectivité chronométrique	p. 6
	Sélectivité «SELLIM»	p. 7
	Sélectivité logique	p. 7
	Emploi des différents types de sélectivité	p. 7
3. La sélectivité énergétique	Cadre de représentation des énergies	p. 8
	Caractérisation d'un disjoncteur Compact NS	p. 9
	Caractérisation des déclencheurs	p. 10
4. Intérêt et mise en œuvre de la sélectivité énergétique	Disjoncteur limiteur équipé d'un déclencheur à pression	p. 12
	La sélectivité avec les Compact NS	p. 13
	Association avec le matériel traditionnel de protection	p. 14
5. Conclusion		p. 15
6. Annexe : rappel sur la coupure avec limitation		p. 16

L'objet de ce Cahier Technique est de présenter une nouvelle technique de sélectivité des déclenchements lors d'un court-circuit : la sélectivité énergétique. Plus simple et plus efficace que les techniques habituelles de sélectivité, elle est mise en œuvre sur la gamme des disjoncteurs Compact NS utilisés dans la distribution BT de puissance. Pour que la sélectivité soit assurée quel que soit le courant de défaut présumé il suffit d'avoir des disjoncteurs, amont et aval, de taille différente (rapport $\geq 2,5$) avec des calibres dans un rapport $\geq 1,6$.

Après un bref rappel sur les techniques classiques de sélectivité, les auteurs examinent sous un angle énergétique le comportement des disjoncteurs et des divers déclencheurs.

Ils montrent ensuite que la sélectivité totale est possible jusqu'au pouvoir de coupure des disjoncteurs, sur plusieurs étages, et sans utiliser la sélectivité chronométrique.

1. la sélectivité en BT

définition

Dans une installation électrique les récepteurs sont reliés aux générateurs à travers une succession de dispositifs de protection, sectionnement et commande. Ce Cahier Technique traite essentiellement de la fonction protection par disjoncteur.

Dans le cadre de la distribution radiale (cf. fig. 1) le but de la sélectivité est de déconnecter du réseau le récepteur ou le départ en défaut, et seulement celui-ci, dans un but de continuité de service maximale.

Si une étude de sélectivité n'est pas ou est mal réalisée, un défaut électrique peut solliciter plusieurs dispositifs de protection. Ainsi un seul défaut peut provoquer la mise hors tension d'une partie plus ou moins grande de l'installation. Il en résulte une perte anormale de disponibilité de l'énergie électrique sur les départs sains.

Les surintensités rencontrées dans une installation sont de différents types :

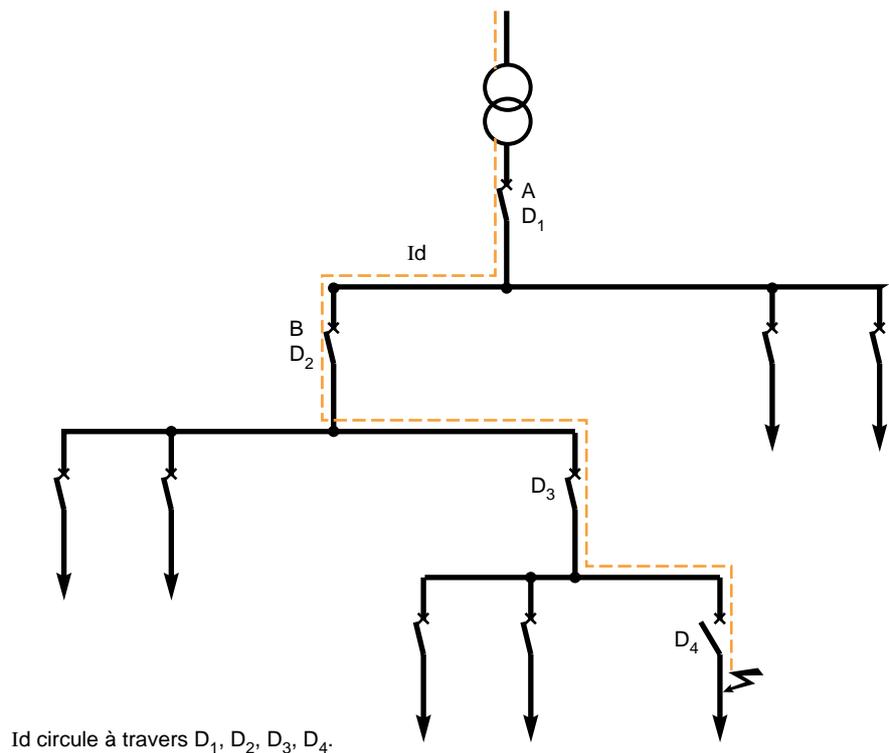
- surcharge,
- court-circuit,
- pointe de courant d'enclenchement, mais aussi :
- fuite de courant à la terre,
- courant transitoire dû à un creux ou à une absence momentanée de tension.

Pour garantir une continuité de service maximale il est nécessaire d'employer des dispositifs de protection coordonnés entre eux.

A noter que les creux de tensions peuvent provoquer l'ouverture intempestive de disjoncteurs par les déclencheurs à manque de tension.

contribution à l'objectif de sécurité et de disponibilité

A chaque type de défaut correspond un dispositif de protection spécifique, (protection contre les courants de surcharge, de court-circuit, de défaut à la terre, ou les manques de tension...), mais un défaut peut solliciter simultanément plusieurs types de



I_d circule à travers D_1, D_2, D_3, D_4 .

fig. 1 : plusieurs disjoncteurs sont concernés par le défaut I_d .

dispositifs de protection, ceci normalement ou par effet secondaire.

Exemples

- un courant de court-circuit élevé crée un creux de tension et peut solliciter le dispositif de protection contre les baisses de tension.
- un défaut d'isolement peut être à la fois perçu comme un défaut homopolaire par un dispositif de protection différentielle et un défaut de surintensité par le dispositif de protection contre les courts-circuits, (ceci concerne les schémas des liaisons à la terre TN et IT).
- un courant de court-circuit élevé peut entraîner le fonctionnement du dispositif de protection contre les défauts à la terre (dans le cas de schémas de liaisons à la terre TT) suite à des saturations locales du tore

sommateur créant ainsi un faux courant homopolaire.

Pour un réseau donné l'étude de la sélectivité, ou plus généralement le plan de protection d'une installation, utilise les caractéristiques des dispositifs de protection publiées par les constructeurs.

Cette étude commence par l'analyse des besoins en dispositifs de protection spécifiques à chaque type de défaut, suivie de l'analyse de la coordination des différentes protections pouvant être sollicitées. Elle permet d'obtenir la meilleure continuité de service tout en garantissant la protection des biens et des personnes.

Dans le chapitre qui suit, nous allons nous limiter au problème de sélectivité dans le cas de surintensité (surcharges et courts-circuits).

Dans ce cadre la sélectivité entre disjoncteurs se matérialise très simplement par l'ouverture ou non de plusieurs disjoncteurs (cf. fig. 2).

Sélectivité totale

La distribution est dite totalement sélective si, et seulement si, quelle que soit la valeur du courant de défaut, seul le dispositif de protection situé le plus en aval, parmi ceux sollicités par le défaut, s'ouvre et reste ouvert.

Sélectivité partielle

La sélectivité est dite partielle si la condition ci-dessus n'est plus respectée au delà d'un certain courant de défaut.

zones de sélectivité

Deux types de défauts de surintensité peuvent être rencontrés dans une installation de distribution électrique :

- les surcharges,
- les courts-circuits.

On considère généralement que les surcharges sont des surintensités comprises entre 1,1 et 10 fois l'intensité de service.

Au delà, il s'agit de courts-circuits à éliminer dans un temps aussi réduit que possible, par intervention des déclencheurs instantanés (INS), ou courts-retards (CR) du disjoncteur.

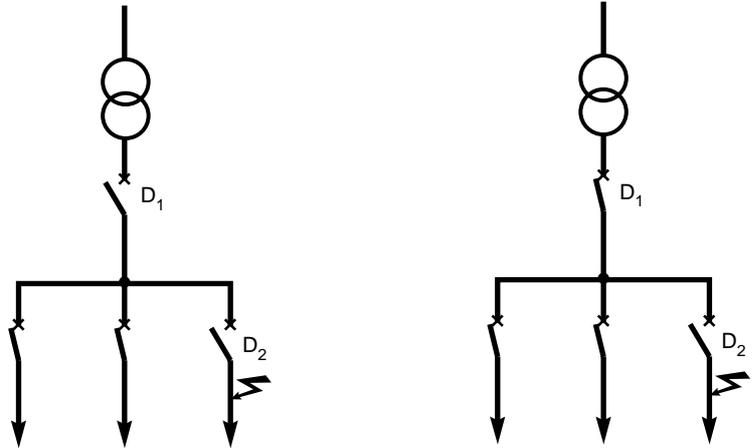
L'étude de sélectivité diffère suivant le type de défaut.

Dans la zone des surcharges

Cette zone se situe à partir du seuil de fonctionnement I_{LR} du dispositif long retard (LR). La courbe de déclenchement $t_c = f(I_p)$ est généralement à temps inverse afin de mieux s'adapter à la courbe de contrainte thermique admissible par les câbles.

La méthode connue et largement diffusée consiste à tracer, dans un système de coordonnées log-log, les courbes des déclencheurs LR concernés par le défaut (cf. fig. 3).

Pour une valeur quelconque de la surintensité, la sélectivité est assurée en surcharge si le temps de non-déclenchement du disjoncteur amont D_1 est supérieur au temps maximal de coupure du disjoncteur D_2 (y compris le temps d'arc). Cette condition est réalisée en pratique si le rapport I_{LR1}/I_{LR2} est $> 1,6$.



a) : ouverture de D_1 et D_2 .

⇒ non sélectivité : énergie non disponible pour les départs sains.

b) : ouverture de D_2 , et D_1 reste fermé.

⇒ sélectivité : continuité de service pour les départs sains.

fig. 2 : comportement des disjoncteurs lors d'un défaut.

Dans la zone des courts-circuits

La sélectivité se traite par comparaison des courbes du disjoncteur amont et du disjoncteur aval.

Les techniques qui permettent d'aboutir à la sélectivité sur courts-circuits entre deux disjoncteurs sont basées sur l'utilisation de disjoncteurs et/ou de déclencheurs de type ou de réglage différents, afin d'éviter que les courbes ne se chevauchent.

Ces techniques sont nombreuses, elles sont présentées dans le chapitre qui suit.

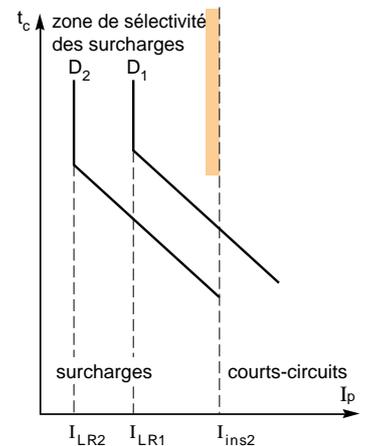


fig. 3 : sélectivité aux surcharges.

2. les techniques de sélectivité lors des courts-circuits

Plusieurs techniques permettent d'atteindre l'objectif de la sélectivité sur court-circuit entre deux appareils :

- la sélectivité ampèremétrique,
- la sélectivité chronométrique,
- la sélectivité «SELLIM»,
- la sélectivité logique,
- la sélectivité énergétique (objet des chapitres 3 et 4).

sélectivité ampèremétrique

Elle résulte de l'écart entre les seuils des déclencheurs instantanés ou court-retard des disjoncteurs successifs.

Surtout utilisée en distribution terminale, elle fait appel à des disjoncteurs rapides, dépourvus de dispositif de retard intentionnel au déclenchement.

Elle s'applique dans le cas de défauts de court-circuit et conduit généralement à une sélectivité partielle.

Elle est d'autant plus efficace que les courants de défaut sont différents selon qu'ils apparaissent en un point ou un autre du réseau, ceci du fait de la résistance non négligeable des conducteurs de faible section (cf. fig. 4).

La zone de sélectivité est d'autant plus importante que l'écart entre les seuils des déclencheurs instantanés de D_1 et de D_2 est important, et que le point de défaut est éloigné de D_2 (I_{cc} faible < I_{ins} de D_1).

Le rapport minimal entre I_{ins1} et I_{ins2} est de 1,5 pour tenir compte de la précision des seuils.

sélectivité chronométrique

Pour garantir une sélectivité totale les courbes de déclenchement des deux disjoncteurs ne doivent se superposer en aucun point quelle que soit la valeur du courant de court-circuit présumé.

Pour les courants de défaut importants, la sélectivité totale est garantie si les deux parties horizontales des courbes, à droite de I_{ins1} , sont distinctes.

Plusieurs solutions sont utilisées pour atteindre cet objectif :

- la plus classique consiste à choisir des disjoncteurs sélectifs équipés d'un dispositif de retard intentionnel.

- la deuxième s'applique seulement au dernier étage de la distribution et consiste en l'utilisation d'un disjoncteur limiteur.

Emploi de disjoncteurs sélectifs

Le terme sélectif a deux significations :

- le déclencheur du disjoncteur est équipé d'un système de temporisation fixe ou réglable ;
- l'installation et le disjoncteur sont capables de supporter le courant de défaut pendant la durée du retard intentionnel (tenue thermique et tenue électrodynamique).

Un disjoncteur sélectif est normalement précédé (en amont) d'un autre disjoncteur sélectif dont le retard intentionnel est plus important.

L'emploi de ce type de disjoncteurs qui correspond à la sélectivité chronométrique conduit, en cas de défaut, à des temps totaux de coupure supérieurs à 20 ms (une période), pouvant aller jusqu'à quelques centaines de ms (cf. fig. 5).

Lorsque l'installation (et éventuellement le disjoncteur) n'est pas capable de supporter pendant la temporisation un fort I_{cc} , il est nécessaire que le disjoncteur D_1 soit équipé d'un déclencheur instantané à haut seuil (DIN).

Dans ce cas, la zone de sélectivité est limitée au seuil du DIN du disjoncteur amont (cf. fig. 5).

Emploi de disjoncteurs limiteurs et sélectivité «pseudo-chronométrique»

Ces disjoncteurs sont caractérisés par :

- le fait qu'ils limitent fortement le courant de court-circuit grâce à leur rapidité d'ouverture et leur tension d'arc élevée.
- le fait que plus le courant de court-circuit présumé est élevé plus ils sont rapides.

Ainsi le choix d'un disjoncteur aval limiteur permet d'obtenir une sélectivité «pseudo-chronométrique» entre deux étages de protection. Cette solution, par son effet de limitation et de rapidité d'élimination du défaut, permet en outre de limiter les contraintes thermiques et électrodynamiques dans l'installation (cf. fig. 6).

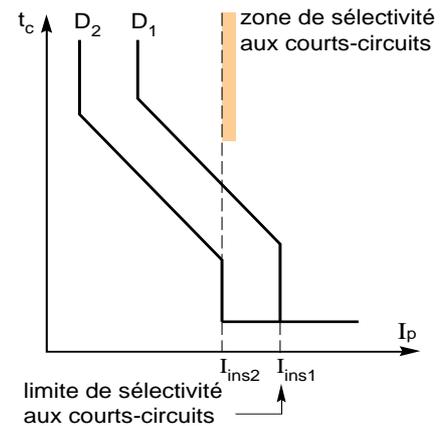
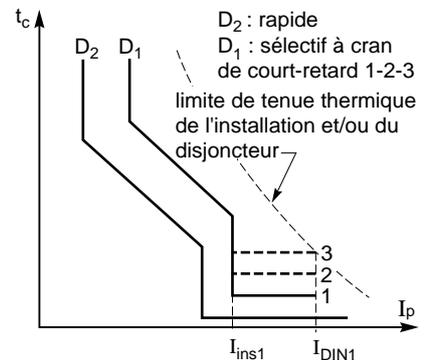
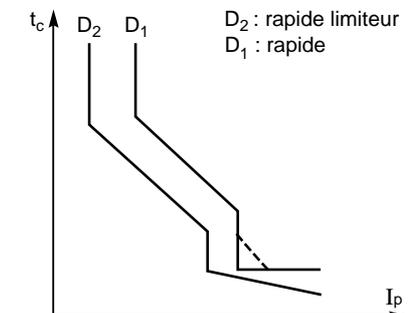


fig. 4 : sélectivité ampèremétrique.



Nota : l'emploi d'un déclencheur instantané à haut seuil DIN fixe la limite de sélectivité.

fig. 5 : sélectivité chronométrique.



Remarque : l'emploi sur D_1 de déclencheurs à court-retard dépendant (pointillé) favorise la sélectivité.

fig. 6 : sélectivité pseudo chronométrique.

sélectivité «SELLIM»

Le système «SELLIM» présente plusieurs intérêts :

- la sélectivité,
- la filiation,
- la réduction des contraintes dans l'installation.

Il consiste à installer en amont d'un disjoncteur D_2 rapide, un disjoncteur D_1 ultra limiteur équipé d'un déclencheur spécifique dont la particularité est de ne pas déclencher lors de la première demi-onde de courant de défaut (cf. fig. 7).

Un défaut conséquent en B sera perçu par les deux disjoncteurs.

D_2 équipé d'un déclencheur instantané s'ouvre dès que le courant de défaut est supérieur à son seuil de déclenchement et élimine le défaut en moins d'une demi-période.

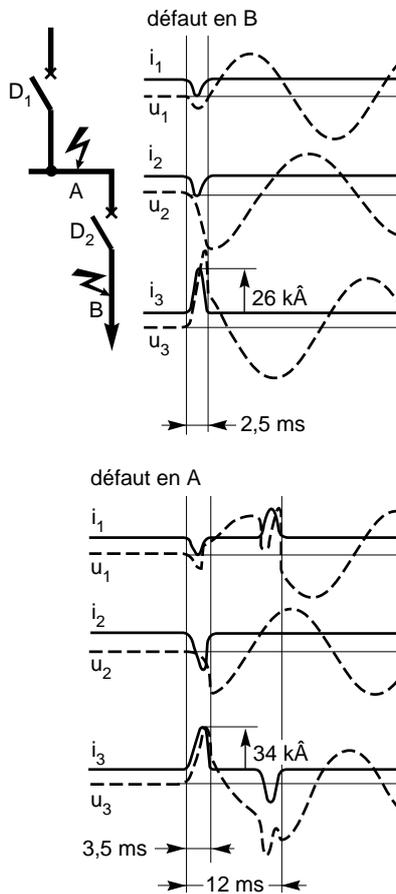


fig. 7 : sélectivité «SELLIM»
(D_1 = Compact C250 L SB
 D_2 = Compact C125 N).

D_1 ne voit qu'une onde de courant et ne déclenche pas. Toutefois le courant de défaut provoque la répulsion des contacts, ce qui limite le courant et les contraintes qui en découlent. Cette limitation du courant de défaut permet l'emploi en aval de disjoncteurs dont le pouvoir de coupure est inférieur au courant de défaut présumé.

Un défaut en A provoque la répulsion des contacts du disjoncteur limiteur ce qui entraîne une limitation des contraintes dues au courant de défaut et l'ouverture de D_1 après la deuxième demi-onde de courant limité.

sélectivité logique

Elle nécessite un transfert d'informations entre les déclencheurs des disjoncteurs des différents étages de la distribution radiale.

Son principe est simple (cf. fig. 8) :

- tous les déclencheurs qui voient un courant supérieur à leur seuil de

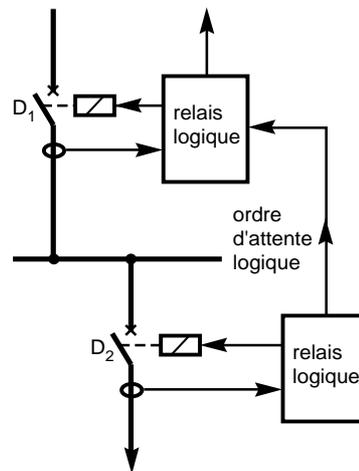


fig. 8 : sélectivité logique.

fonctionnement envoient un ordre d'attente logique à celui qui est juste en amont.

- le déclencheur du disjoncteur situé immédiatement en amont du court-circuit ne reçoit pas d'ordre d'attente et agit immédiatement.

Ainsi à tous les étages de la distribution, les temps d'élimination d'un défaut restent faibles.

La sélectivité logique s'applique aux disjoncteurs BT sélectifs de forte intensité, elle est surtout utilisée sur les réseaux HT industriels. Pour plus de détails, voir le Cahier Technique n° 2 «Protection des réseaux par le système de sélectivité logique».

emploi des différents types de sélectivité

Les différents types de sélectivité présentés ci-avant sont habituellement combinés pour obtenir la meilleure disponibilité de l'énergie électrique ; voir à titre d'exemple la figure 9.

Les études de sélectivité sont réalisées, à ce jour, grâce à des tableaux fournis par les constructeurs. Ceux-ci donnent les limites de sélectivité pour chaque combinaison de disjoncteurs et pour chacun de leurs déclencheurs.

Les coûts résultant d'une non sélectivité éventuelle et du choix de l'appareillage sont pris en compte.

La sélectivité énergétique présentée dans le chapitre qui suit est une innovation qui va considérablement simplifier les études en distribution BT et permettre d'obtenir, sur plusieurs étages, la sélectivité totale au moindre coût.

circuit concerné	type de sélectivité				type de disjoncteur
	logique	chronométrique	«SELLIM»	pseudo-chronométrique	
origine de l'installation BT					sélectif logique
distribution de puissance					sélectif rapide limiteur SELLIM
distribution terminale					rapide

fig. 9 : exemple d'emploi des différents types de sélectivité.

3. la sélectivité énergétique

La sélectivité énergétique est une amélioration et une généralisation de la sélectivité «pseudo-chronométrique» décrite au chapitre précédent : la sélectivité est totale si, pour tout I_p , l'énergie que laisse passer le disjoncteur aval est inférieure à l'énergie nécessaire à l'entrée en action du déclencheur du disjoncteur amont.

La mise en œuvre technologique du principe de la sélectivité énergétique a fait l'objet d'un brevet déposé par Merlin Gerin, puis de la création des disjoncteurs Compact NS.

Ces disjoncteurs rapides et fortement limiteurs répondent à l'évolution du besoin :

- augmentation des puissances installées, ce qui entraîne une augmentation des courants de court-circuit et donc des pouvoirs de coupure ;
- souci de minimiser les contraintes dans l'installation et de limiter le courant de défaut en intensité et durée.

Pour raisonner en énergies et comprendre la sélectivité énergétique, le choix du cadre de représentation des courbes de fonctionnement est un élément important, défini dans le paragraphe ci-après.

Nous examinerons ensuite le comportement énergétique des disjoncteurs limiteurs et des divers déclencheurs.

cadre de représentation des énergies

Les courbes $t_c = f(I_p)$ utilisées habituellement pour les études de sélectivité sont inexploitable avec les disjoncteurs limiteurs lorsque les courants sont supérieurs à $25 I_n$ (ce qui correspond à des temps de coupure inférieurs à 10 ms à la fréquence de 50 Hz).

La sélectivité doit être étudiée à partir des phénomènes transitoires et non plus à partir des phénomènes périodiques. La compréhension de la

sélectivité énergétique nécessite la caractérisation et l'exploitation de :

- l'onde de courant que laisse passer le disjoncteur lors de la coupure caractérisée par son intégrale de joule $\int i^2 . dt$ (souvent exprimée par $I^2 . t$), elle correspond à l'énergie de coupure E_c .
- la sensibilité des déclencheurs à l'énergie correspondant à l'impulsion de courant.

Ainsi, tout à fait logiquement ces caractéristiques sont représentées par des courbes $I^2 . t = f(I_p)$ à la place de $t_c = f(I_p)$, (cf. fig. 10).

Il est à noter que la norme CEI 947-2 prévoit la caractérisation des disjoncteurs par ces types de courbes.

Pour des raisons pratiques, la courbe $I^2 . t = f(I_p)$ est représentée dans un système de coordonnées log-log.

Pour l'étude de sélectivité, les limites du $I^2 . t$ de coupure (E_c des disjoncteurs) se situe entre 10^4 et 10^7 $A^2 . s$ pour des courants présumés variant entre 1 et 100 kA. Trois décades seront donc prises pour E_c et deux pour le courant.

En considérant que la demi-onde de courant coupé est équivalente à une demi-sinusoïde qui a la même pente à l'origine que le courant présumé, l'énergie de coupure E_c peut être exprimée en fonction du I_p à partir des expressions suivantes (voir annexe coupure avec limitation) :

□ pour $t \geq 10$ ms

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 . t$$

□ pour $t < 10$ ms

$$(3) \Rightarrow E_c = 4 . f^2 . I_p^2 . t_{vc}^3$$

ou

$$(4) \Rightarrow E_c = \frac{\hat{i}_c^3}{4\sqrt{2} . f . I_p}$$

En partant de ces équations il est possible d'améliorer le système d'axes $I^2 . t / I_p$ afin de disposer d'informations supplémentaires : temps virtuel de coupure (t_{vc}) et i crête limité (\hat{i}_c).

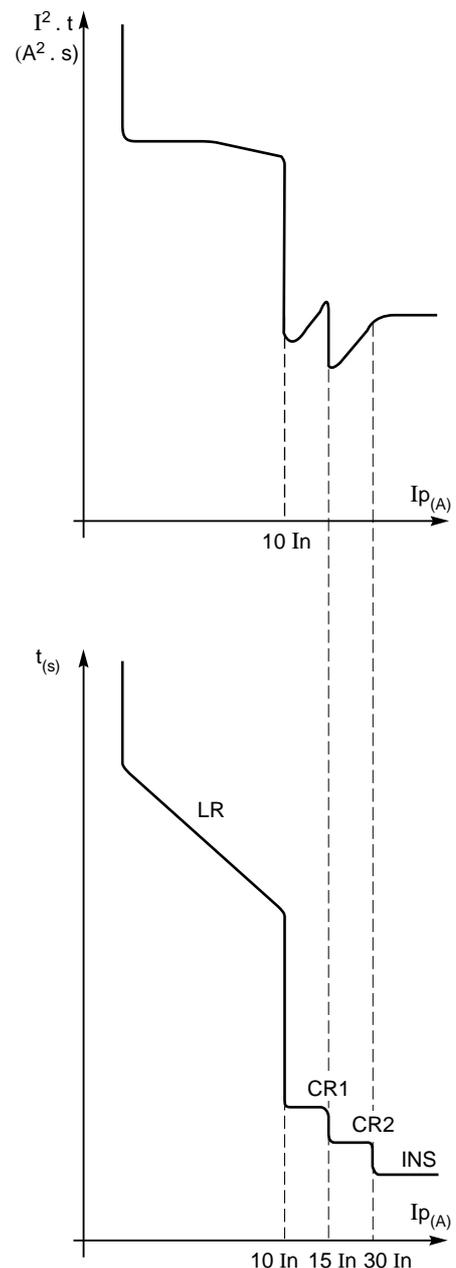


fig. 10 : courbes $t_c = f(I_p)$ et $I^2 . t = f(I_p)$ d'un disjoncteur équipé d'un déclencheur électronique.

Droites des temps (cf. fig. 11)

Un réseau de droites pour des temps de coupure constants, peut, à une fréquence donnée, être reporté sur le canevas log-log.

Exemple pour $f = 50$ Hz, le tracé des droites pour :

■ $t = 20$ ms correspond au temps de coupure le plus couramment rencontré lorsque I_p est supérieur au seuil des instantanés et inférieur au seuil de répulsion des contacts :

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}.$$

■ $t = 10$ ms qui est le temps de coupure au seuil de limitation :

$$(2) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot 10^{-2}.$$

■ $t = 9$ à 4 ms qui traduisent le comportement du disjoncteur en limitation :

$$(3) \Rightarrow E_c = I_p^2 \cdot t_{vc}^3 \cdot 10^4.$$

Droites des courants crêtes

De même à partir de l'équation (4)

$$E_c = \frac{\hat{i}_c^3}{4\sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

un réseau de courbes correspondant à des courants crêtes limites, constants, peut être reporté sur le tracé de base (cf. fig. 11).

A noter que ce cadre de représentation permet de caractériser les disjoncteurs et les déclencheurs en 50 Hz pour des défauts triphasés, bipolaires ou unipolaires.

caractérisation d'un disjoncteur Compact NS

Représentation du $I^2 \cdot t$ de coupure

La caractéristique du $I^2 \cdot t$ que laisse passer un disjoncteur est issue d'essais de type normalisés ou de simulations numériques réalisées à une tension et une fréquence données.

Les courbes qui suivent correspondent à des défauts triphasés en 400V/50 Hz. Les mêmes courbes peuvent être tracées pour d'autres fréquences ou d'autres tensions.

Les valeurs relevées sont les valeurs maximales obtenues pour différents angles d'enclenchement (limites supérieures) (cf. fig. 12).

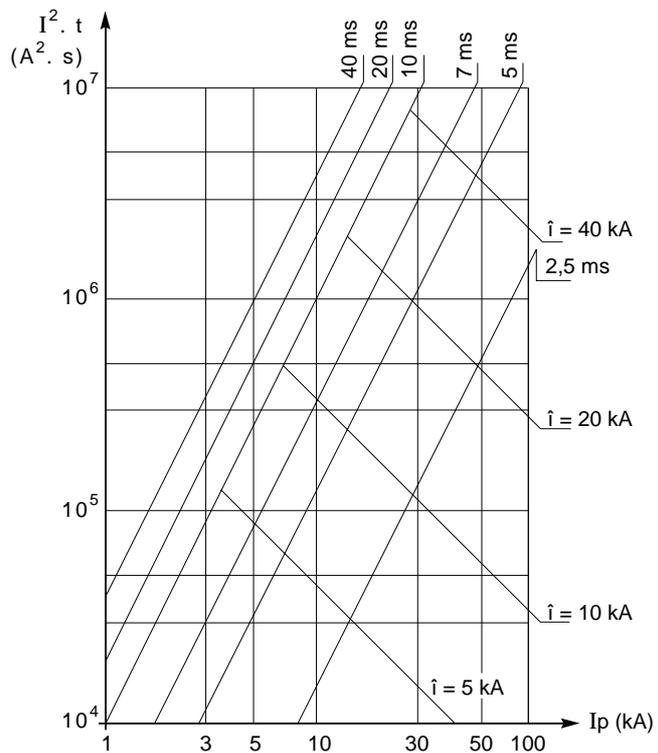


fig. 11 : cadre de représentation des énergies.

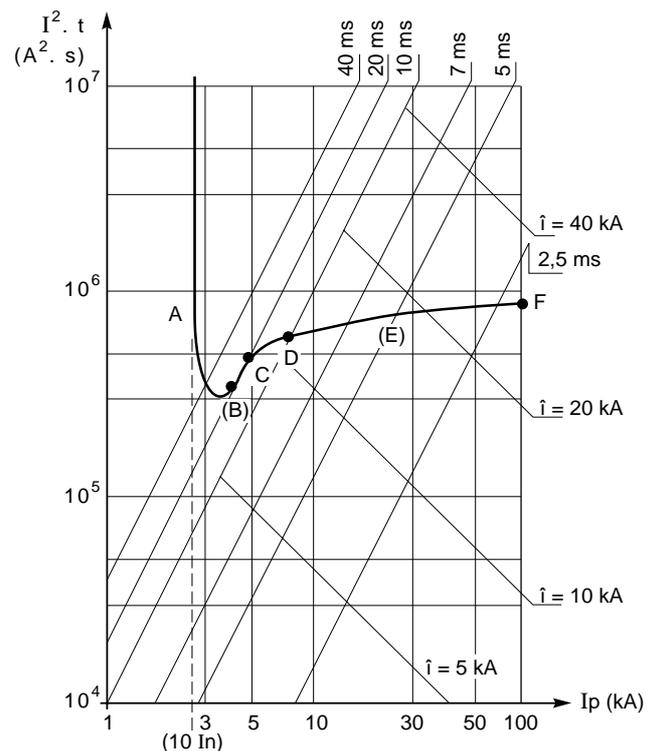


fig. 12 : courbe de coupure d'un disjoncteur limiteur.

Interprétation de la courbe

Différentes informations apparaissent sur la courbe de la figure 12 qui correspond à un disjoncteur Compact NS de taille 250 A, équipé d'un déclencheur électromécanique à court-retard dépendant (CRD) dont le seuil est à $10 I_n$.

Elles caractérisent les différentes phases du comportement en coupure du disjoncteur limiteur selon la valeur du courant de court-circuit présumé I_p .

■ point A : lorsque le courant de défaut atteint le seuil de fonctionnement du déclencheur, le temps de coupure est typiquement de 50 ms pour un déclencheur INS ou CRD.

■ point B : lorsque le courant de défaut est supérieur au courant de seuil du déclencheur, le temps de coupure diminue et se stabilise à 20 ms à partir de $16 I_n$.

■ point C : lorsque le courant de défaut se situe au niveau du seuil de répulsion des contacts, il se produit un début de limitation du courant par insertion d'une tension d'arc dans le circuit. Cette limitation entraîne la remise en phase de la tension et du courant ce qui se traduit par des temps d'élimination du défaut qui passe de 20 à 10 ms à mesure que I_p augmente.

■ point D : lorsque le courant de défaut est de l'ordre de 1,7 fois le seuil de répulsion, l'énergie de propulsion des contacts est suffisante pour qu'ils s'ouvrent totalement ; le temps de coupure est alors typiquement de 10 ms. Cette coupure, de type réflexe, est autonome et ne nécessite un déclencheur que pour confirmer l'état déclenché du disjoncteur et éviter que les contacts ne se referment intempestivement.

■ zone E : lorsque le courant de défaut évolue au-delà de 2 fois le seuil de répulsion des contacts la limitation du courant de défaut est de plus en plus efficace, ce qui se traduit par des temps de coupure de plus en plus courts.

■ point F : la fin de la courbe représente la limite du pouvoir de coupure du disjoncteur.

La courbe ainsi tracée est très riche en informations :

- seuil du déclencheur (I seuil ; point A) ;
- $I^2 \cdot t$ de coupure en fonction du courant présumé ;
- courant de début de répulsion (I_r ; point C) ;

- PdC (point F) ;
- temps de coupure (t_{vc}) en fonction du courant présumé ;
- courant crête limité (\hat{i}_c) en fonction du courant présumé ;
- courant au-delà duquel $t_{vc} < 10$ ms (début de limitation).

caractérisation des déclencheurs

Les déclencheurs sont caractérisés par leur temps de réponse à un courant donné, (onde, demi-onde ...).

En faisant varier la durée et la valeur crête du courant, ce qui correspond à différents courants limités par un disjoncteur, on obtient par essais successifs une série de points qui peuvent être reportés sur le support décrit précédemment afin d'obtenir la courbe caractéristique d'un déclencheur.

Déclencheurs magnétiques

■ déclencheur instantané

Composé en général d'un U magnétique et d'une palette, il assure la protection contre les courts-circuits. Son temps d'intervention est inférieure à 50 ms à son seuil de fonctionnement (situé entre 5 et

10 fois le courant nominal) puis décroît rapidement en dessous de 10 ms lorsque le courant augmente (cf. fig. 13).

■ déclencheur à haut seuil (DIN)

Comme indiqué au paragraphe «Sélectivité chronométrique», les DIN ont pour rôle, dans le cadre de l'emploi de la sélectivité chronométrique, de limiter la contrainte thermique (cf. fig. 5) pour l'installation et l'appareil de coupure.

Le déclencheur DIN est un déclencheur instantané dont le seuil est de quelques dizaines de I_n .

Il peut être de type électromagnétique ou électronique.

■ déclencheur à temporisation constante

Il s'agit d'un déclencheur instantané équipé d'un système retardateur de type «horlogerie» afin de rendre son déclenchement sélectif par rapport au disjoncteur aval.

Les retards peuvent être compris entre 10 et 500 ms, ils sont en général réglables par crans. La figure 13 donne la courbe (cran 20 ms) correspondant à un court-retard.

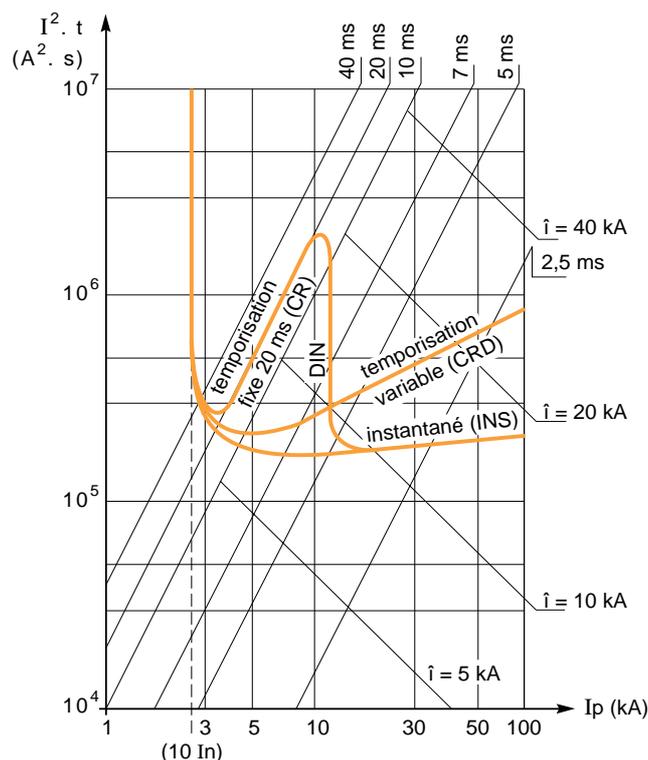


fig. 13 : courbes de différents déclencheurs magnétiques.

Si la contrainte thermique ($I^2 \cdot t$) du fait d'un retard important, doit être limitée, le DIN intervient (cf. fig. 13).

■ déclencheur à temporisation variable en fonction de I_p (court-retard dépendant : CRD).

La temporisation est réalisée par l'inertie d'une masse, cette temporisation est ainsi inversement proportionnelle à I_p (cf. fig. 13).

Déclencheur électronique

Les instantanés des déclencheurs électroniques sont sensibles à la valeur efficace (RMS) ou à la valeur crête du courant. Leur caractéristique $I^2 \cdot t$ est, pour les forts courants de défaut, théoriquement sur une droite $\hat{i}_c = \text{constante}$.

En réalité ceci est vrai pour des durées d'impulsion de courant supérieures au temps de réaction de la partie actionneur du déclencheur (typiquement 4 ms), en dessous de cette valeur l'inertie de la partie mécanique du déclencheur fait que l'on retrouve, pour des forts I_p , une caractéristique du type déclencheur électromécanique instantané.

Il devient alors nécessaire de caractériser le déclencheur par sa courbe $E_c = f(I_p)$ en effectuant des essais identiques à ceux effectués avec les déclencheurs magnétiques.

Ces déclencheurs peuvent être du type instantané ou du type retardé.

Il est possible d'associer plusieurs types de déclencheurs électroniques, par exemple :

- 10 à 15 In CR (40 ms),
- 15 à 30 In CR (10 ms),
- > à 30 In INS

La figure 14 illustre cet exemple, les courbes de cette association sont à rapprocher de celles de la figure 10 pour l'énergie de coupure du disjoncteur.

Déclencheurs avec détection d'arc

Généralement associés à des déclencheurs électroniques, les détecteurs d'arc peuvent être utilisés pour assurer la protection :

- d'une cellule : si un arc apparaît dans une cellule, le détecteur d'arc commande l'ouverture du disjoncteur d'arrivée,
- d'un disjoncteur sélectif : le détecteur d'arc, placé dans la chambre de coupure, provoque, via le déclencheur électronique, le déclenchement instantané du disjoncteur.

L'autoprotection de l'appareil est ainsi réalisée et permet son emploi jusqu'à la limite de sa tenue électrodynamique.

Déclencheur à pression

Dans un disjoncteur la pression qui apparaît dans la chambre de coupure est une conséquence de l'énergie développée par l'arc.

Cette pression peut, à partir d'un certain niveau de courant de défaut, devenir un moyen de détection et de déclenchement.

Ceci est obtenu en canalisant l'expansion des gaz dans l'enceinte de coupure vers un piston dédié à la commande du système d'ouverture du disjoncteur (cf. fig. 15).

Le déclencheur à pression peut être utilisé :

■ pour assurer l'autoprotection d'un disjoncteur sélectif (comme le détecteur d'arc),

■ pour améliorer le comportement en coupure et la sûreté de fonctionnement d'un disjoncteur rapide limiteur.

Si à chaque disjoncteur est associé un déclencheur à pression bien calibré, la sélectivité entre les disjoncteurs de taille différente est assurée pour toute surintensité supérieure à 20 In.

C'est ce déclencheur à comportement énergétique ($I^2 \cdot t$ constant) qui est à la base de la sélectivité énergétique mise en œuvre avec les disjoncteurs limiteurs Compact NS.

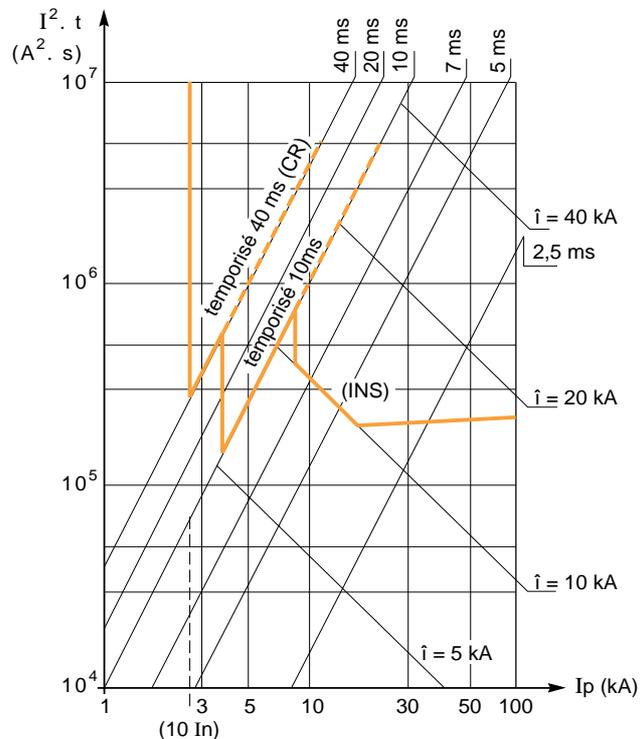


fig. 14 : exemples d'association de courbes de déclencheurs électroniques.

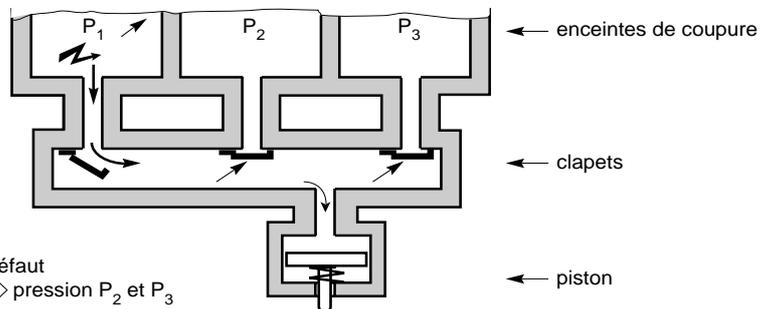


fig. 15 : principe du déclencheur à pression.

4. intérêt et mise en œuvre de la sélectivité énergétique

Rappelons que le système déclencheur d'un disjoncteur, qu'il soit électromécanique, électronique ou mixte, doit être le meilleur possible au niveau des critères suivants :

- contraintes minimales pour l'installation (limiter \hat{i} et $I^2 \cdot t$),
- sûreté du déclenchement (sécurité),
- perturbation minimale de la partie saine de l'installation (creux de tension),
- facilité des études de sélectivité.

disjoncteur limiteur équipé d'un déclencheur à pression

Le déclencheur à pression, associé à un déclencheur CRD, électromagnétique ou électronique à double court-retard permet de répondre de façon optimale aux critères ci-dessus.

La figure 16 montre la « sensibilité énergétique » de cette association. Plus le courant de court-circuit présumé est important, plus le temps de réaction est réduit, ce qui conduit à un déclenchement à énergie $I^2 \cdot t$ quasiment constante.

L'énergie que laisse passer le disjoncteur limiteur, lors de la coupure, suit la même loi avec un léger décalage.

Contraintes pour l'installation

- Elles sont réduites par rapport à celles observées avec les disjoncteurs limiteurs de la génération précédente. Si l'on reprend l'exemple de la figure 16, pour un disjoncteur Compact NS 250 A, et un I_p de 40 kA :
- le temps de coupure est de 4ms,
 - le courant crête est de 20 kA,
 - le $I^2 \cdot t$ est de $8 \cdot 10^5 \cdot A^2 \cdot s$

Sûreté de fonctionnement

Le déclencheur à pression fait partie du mécanisme d'ouverture sur court-circuit et dépend donc de la taille du disjoncteur.

Le déclencheur CRD, réglable (calibre), qu'il soit de type électromécanique (cf. fig. 13) ou électronique (cf. fig. 14) est physiquement indépendant du déclencheur à pression.

Cette séparation physique améliore la sûreté de fonctionnement.

Creux de tension

Dans une installation, les creux de tension sollicitent les déclencheurs à manque ou minimum de tension des disjoncteurs ainsi que les contacteurs.

Leur ouverture intempestive, suite à un creux de tension provoqué par un court-circuit, entraîne une perte de continuité de service.

C'est pourquoi, une étude de sélectivité doit aussi concerner la tenue des contacteurs et des déclencheurs à manque de tension face aux creux de tension.

Le creux de tension sur le réseau dure jusqu'à ce que la tension d'arc qui vient s'opposer à la tension de la source permette l'extinction du courant ; le creux de tension est donc fonction du type de disjoncteur et/ou de déclencheur utilisé :

- avec les disjoncteurs non limiteurs, le creux de tension est important et sa

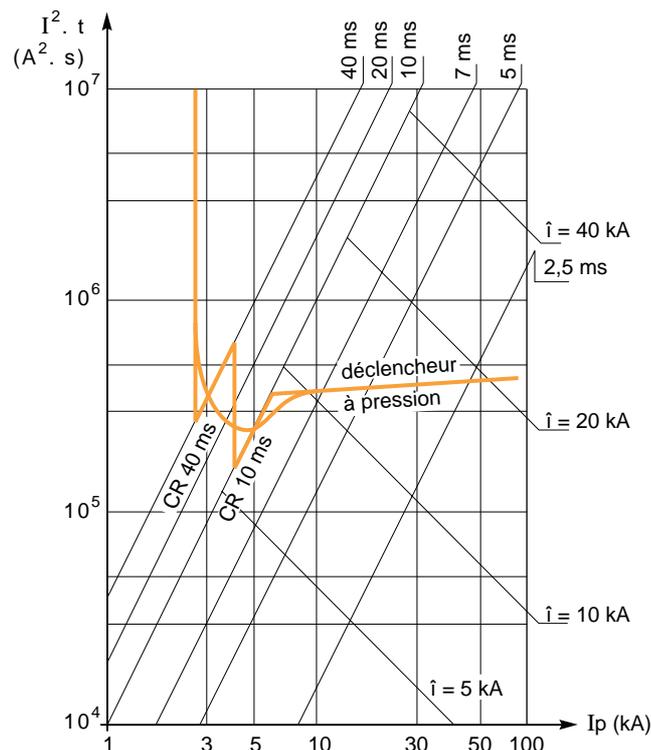


fig .16 : courbes d'association de déclencheurs (électromagnétique et pression ou électronique et pression).

durée est de l'ordre de 10 à 15 ms (cf. fig. 17),

■ avec les disjoncteurs limiteurs, l'apparition rapide d'une tension d'arc significative permet de minimiser le creux de tension en durée et en amplitude (cf. fig. 17).

Le creux de tension est de l'ordre de 5 ms et de 50 % de la tension nominale pour des courants proches du courant de répulsion des contacts.

Le creux de tension est de l'ordre de 30 % de la tension nominale pour des courants plus élevés mais avec des durées de l'ordre de 3 à 4 ms. Plus le I_{cc} est élevé plus le creux de tension est de faible durée.

Les déclencheurs à minimum de tension éventuellement associés aux disjoncteurs ne sont pas affectés par de tels creux de tension.

Sélectivité

L'énergie que laisse passer le disjoncteur qui coupe étant fortement limitée, elle est insuffisante pour solliciter le déclencheur du disjoncteur amont qui reste fermé.

la sélectivité avec les Compact NS

La gamme Compact NS, qui comprend les tailles 100 - 160 - 250 - 400 - 630 A permet par application de la sélectivité énergétique, et ceci selon le rapport des tailles et calibres des disjoncteurs mis en œuvre, soit la sélectivité partielle, soit la sélectivité totale jusqu'au pouvoir de coupure.

Sélectivité totale

La figure 18 donne un exemple de sélectivité totale jusqu'à 100 kA

sur trois étages avec des disjoncteurs de taille 100 - 250 - 630 A équipés de divers déclencheurs.

Avec les disjoncteurs Compact NS cette sélectivité est totale jusqu'à 150 kA.

Pour qu'il y ait sélectivité totale, il suffit que l'énergie que laisse passer un disjoncteur soit inférieure à l'énergie nécessaire au fonctionnement du déclencheur du disjoncteur amont.

Règle pratique

La sélectivité est totale et sans réserve si :

- les tailles des disjoncteurs successifs sont dans un rapport $\geq 2,5$
- et si les calibres sont dans un rapport supérieur à 1,6.

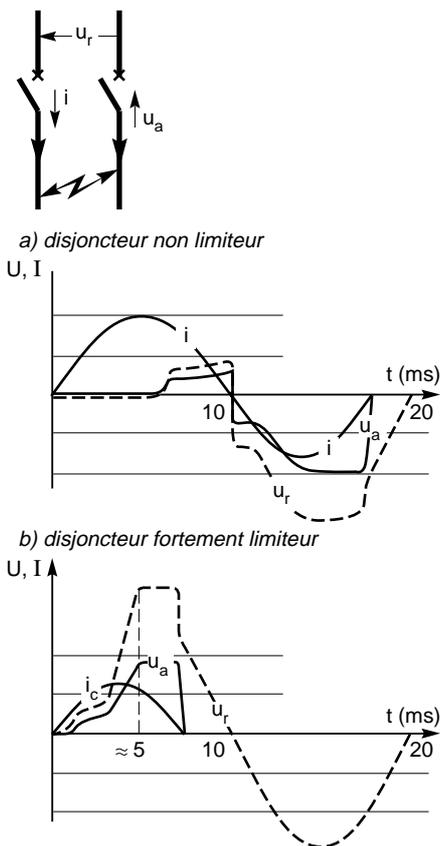
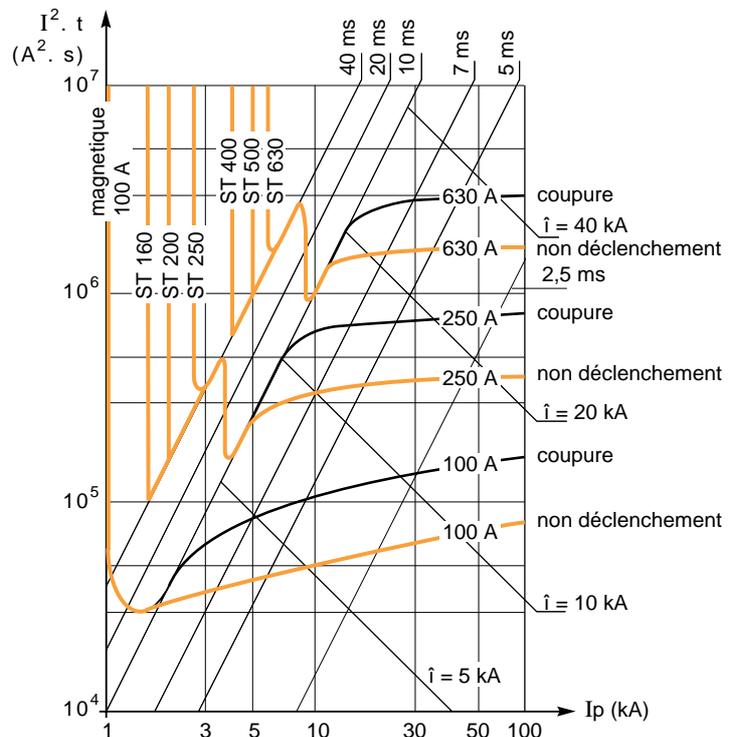


fig. 17 : le creux de tension sur le réseau dépend du type de disjoncteur employé.



Nota :

ST 160 - ST 200 et ST 250 : déclencheurs électroniques équipant des disjoncteurs de taille 250 A.
ST 400 - ST 500 et ST 630 : déclencheurs électroniques équipant des disjoncteurs de taille 630 A.

fig. 18 : sélectivité totale entre les disjoncteurs Compact NS de tailles 100, 250 et 630 A .

Sélectivité partielle

Si la règle pratique énoncée ci-avant n'est pas respectée, la sélectivité devient partielle. La figure 19 montre que, entre un disjoncteur de taille 160 A et un disjoncteur de taille 250 A équipé d'un déclencheur de calibre 250 A, la sélectivité est assurée jusqu'à un courant de court-circuit présumé de 4 800 A. Cette limite est plus élevée que celle obtenue, dans le même cas de figure, avec les Compact standard.

Filiation avec les Compact NS

Rappelons que la filiation, dont l'emploi est prévu par la norme NF C 15-100 permet au disjoncteur amont d'aider le disjoncteur aval à couper les forts courants de court-circuit ; ceci, il faut bien le préciser, au détriment de la sélectivité (sauf avec le système «SELLIM»).

Pour les Compact NS la filiation ne modifie en rien les sélectivités totale et partielle, évoquées ci-avant.

Par contre un Compact NS peut toujours aider un disjoncteur aval, de type différent dont le pouvoir de coupure est insuffisant.

association avec le matériel traditionnel de protection

Disjoncteurs standard

Dans une installation existante, les disjoncteurs fortement limiteurs Compact NS peuvent être utilisés, pour extension d'une installation existante ou en remplacement d'un disjoncteur existant, sans perturber la limite de sélectivité atteinte initialement. En effet, si le nouveau disjoncteur est :

- en position aval, le fort pouvoir limiteur du nouvel appareil ne peut qu'améliorer la limite de sélectivité qui peut même devenir totale (cf. fig. 20).

- en position amont, la limite de sélectivité est au moins égale à l'ancienne valeur, et le fort pouvoir de limitation du disjoncteur Compact NS renforce éventuellement la filiation.

Fusibles

Les courbes $I^2 \cdot t = f(I_p)$ (fournies par les constructeurs de fusibles) concernent :

- l'énergie nécessaire à la fusion (préarc),
- l'énergie qui traverse le fusible lors de la coupure.

Pour qu'il y ait sélectivité, entre un disjoncteur placé en amont et un fusible, le déclencheur de ce disjoncteur ne doit pas être sensible à la somme de ces énergies.

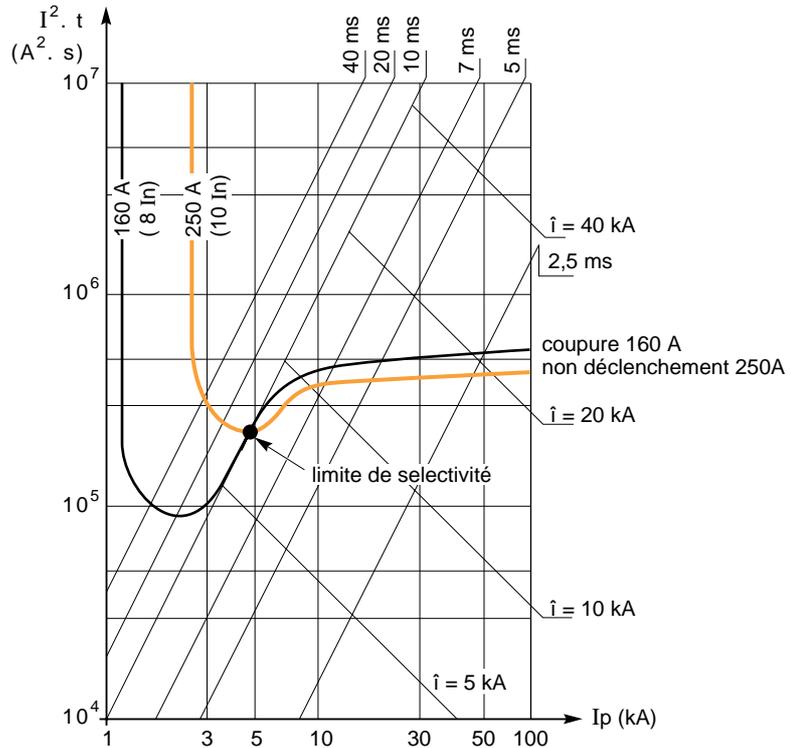


fig. 19 : sélectivité partielle entre disjoncteurs Compact NS, 250 A et 160 A.

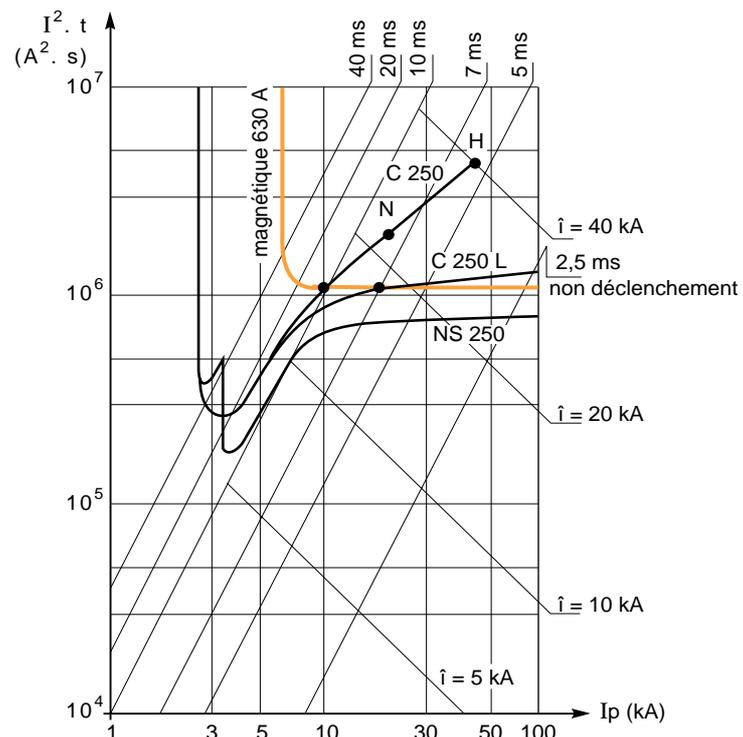


fig. 20 : le remplacement d'un disjoncteur Compact C250 N, H ou L par un Compact NS 250 donne une meilleure sélectivité. Sur cet exemple, elle devient totale.

5. conclusion

Les disjoncteurs fortement limiteurs, et d'autant plus rapides que le courant de défaut présumé est important, permettent moyennant le respect de règles simples d'obtenir une sélectivité totale sur plusieurs étages. Ceci avant de faire éventuellement appel à la sélectivité chronométrique.

C'est une innovation technique importante qui permet de :

- simplifier considérablement les études de sélectivité,
- minimiser les efforts

électrodynamiques, les contraintes thermiques ainsi que les creux de tension consécutifs aux courts-circuits.

Ce nouveau principe de sélectivité, dite énergétique, mis au point grâce à la parfaite maîtrise de l'énergie que laissent passer les disjoncteurs lors de la coupure, ainsi que de la sensibilité des déclencheurs à cette même énergie, contribue à l'amélioration de la disponibilité de l'énergie électrique.

6. annexe : rappel sur la coupure avec limitation

La figure 21 montre l'évolution des courants et tensions correspondant au phénomène de limitation sur une demie période.

La loi qui régit l'évolution du courant de court-circuit (i_c) est :

$$U_r - U_a = r \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \approx L \cdot \frac{di}{dt}$$

■ à l'origine du court-circuit, U_a est nulle, i_c et i_p sont égaux et ont la même pente.

■ lorsque U_a est égale à U_r , i_c passe par son maximum (\hat{i}_c) car sa dérivée est nulle.

■ lorsque U_a est supérieure à U_r , i_c décroît et s'annule au temps t_c .

Il est constaté que l'onde de courant coupé est équivalente à une demi-sinusoïde de période égale à deux fois le temps virtuel de coupure (t_{vc}).

Avec ces informations, il devient aisé de déterminer l'énergie dissipée dans les impédances du circuit concerné.

L'expression réduite de cette énergie, appelée « énergie de coupure » est :

$$E_c = \int_0^{t_{vc}} i_c^2 \cdot dt$$

i_c étant une fonction sinusoïdale

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \hat{i}_c^2 \cdot t_{vc} \quad (1).$$

Il est intéressant d'exprimer E_c en fonction de I_p et de la durée (t_{vc}) de la coupure :

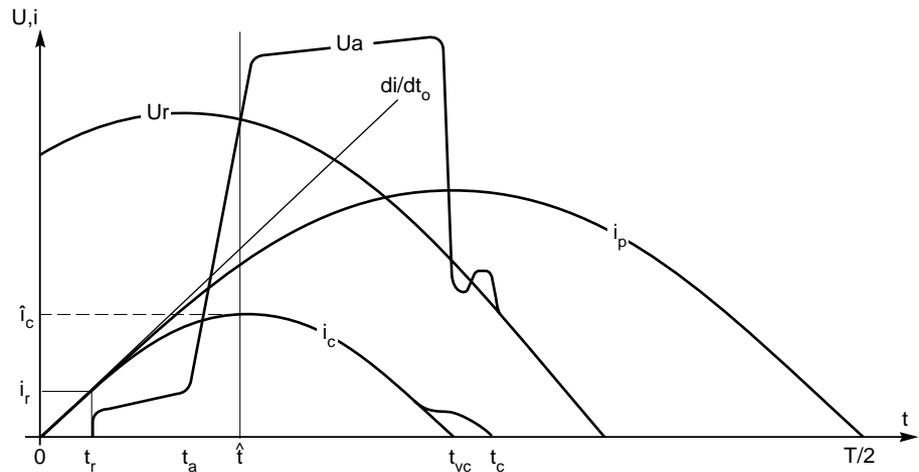
■ $t_{vc} \geq 10$ ms

Cette durée signifie que le courant de défaut est faible, donc les contacts du disjoncteur ne répulsent pas, il n'y a pas de tension d'arc donc :

$$i_c = i_p \text{ et } \hat{i}_c = \sqrt{2} \cdot I_p ;$$

l'expression (1) devient :

$$E_c = I_p^2 \cdot t \quad (2).$$



U_a : tension d'arc
 U_r : tension du réseau
 i_p : courant présumé
 i_c : courant coupé (limité)
 \hat{i}_c : courant maximal coupé
 i_r : courant de répulsion des contacts

\hat{t} : instant de \hat{i}_c
 t_a : instant de l'apparition de l'arc
 t_c : temps de coupure
 t_r : instant de répulsion des contacts
 t_{vc} : temps virtuel de coupure
 ω : pulsation de l'onde coupée

fig. 21 : coupure avec limitation.

■ $t_{vc} < 10$ ms

Le disjoncteur limite le courant de défaut.

i_c et i_p ont la même pente à l'origine, donc :

$$\frac{di}{dt} = \omega \cdot I_p \cdot \sqrt{2} = \omega' \cdot \hat{i}_c$$

$$\text{avec } \omega' = \frac{\pi}{t_{vc}}$$

$$t_{vc} \cdot \omega \cdot I_p \cdot \sqrt{2} = \pi \cdot \hat{i}_c$$

d'où :

$$\hat{i}_c = t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}$$

ou

$$t_{vc} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}}$$

Si de l'expression (1) on extrait :

$$\hat{i}_c^2 = \frac{2 \cdot E_c}{t_{vc}}$$

on obtient :

$$\frac{2 \cdot E_c}{t_{vc}} = (t_{vc} \cdot 2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2})^2$$

d'où :

$$E_c = 4 \cdot f^2 \cdot I_p^2 \cdot t_{vc}^3 \quad (3).$$

Toujours à partir de (1), mais en s'intéressant à \hat{i}_c

$$t_{vc} = \frac{2 \cdot E_c}{\hat{i}_c^2} = \frac{\hat{i}_c}{2 \cdot f \cdot I_p \cdot \sqrt{2}}$$

on obtient :

$$(4)$$

$$E_c = \frac{\hat{i}_c^3}{4 \sqrt{2} \cdot f \cdot I_p}$$

Les expressions (3) et (4) permettent de tracer les droites des temps et des courants crête.