



Collection technique

Cahier technique n° 163

Coupure en BT par limitation
du courant

P. Schueller



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

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

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

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

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

Rubrique : **maîtrise de l'électricité**

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

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

Avertissement

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

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

n° 163

Coupure en BT par limitation du courant

Pierre Schueller



Ingénieur Arts et Métiers et Institut d'Electrotechnique de Grenoble, entré chez Merlin Gerin en 1967, il a d'abord participé à la conception de disjoncteurs limiteurs basse tension pour la distribution terminale, puis industrielle.

Aux Services Techniques de la Division Basse Tension de Puissance, il a dirigé de 1983 à 1996 le bureau d'étude ayant en charge le développement des capteurs et actionneurs.

Depuis, il est en charge des domaines de la normalisation et de la propriété industrielle pour le compte des Equipements et Systèmes Basse Tension.

Coupure en BT par limitation du courant

Ce Cahier Technique est une introduction simple aux principes de la limitation de courant en basse tension, technique développée par Merlin Gerin en courant continu dès 1930, et en alternatif à partir de 1954. Il facilite la compréhension des avantages que procure l'emploi des disjoncteurs-limiteurs dans une installation électrique. Le document se termine par une bibliographie détaillée à même de satisfaire la curiosité scientifique.

Sommaire

1 Généralités	1.1 Définition	p. 4
	1.2 Pourquoi limiter ?	p. 4
	1.3 Comment limiter ?	p. 5
	1.4 Conditions à respecter par u_a pour limiter courant	p. 5
	1.5 Cas particulier des disjoncteurs miniatures	p. 6
2 Moyens d'obtention de la tension u_a	2.1 Résistance à changement d'état	p. 7
	2.2 Résistance à coefficient de température positif	p. 7
	2.3 Résistance variable que constitue l'arc de coupure lui-même	p. 7
3 Propulseurs de contacts et déclencheurs ultra-rapides	3.1 Propulseurs de contacts	p. 8
	3.2 Déclencheurs ultra-rapides	p. 9
4 Conclusion		p. 10
5 Bibliographie		p. 11

1 Généralités

1.1 Définition

Un dispositif est limiteur lorsque le courant qu'il laisse passer, sur court-circuit, est nettement inférieur en amplitude au courant présumé (cf. **fig. 1**).

Dans le cas d'un disjoncteur limiteur, il y a simultanément, à cette réduction d'amplitude une réduction de la durée T de passage de courant par rapport au temps de passage du courant de court-circuit d'un disjoncteur non limiteur.

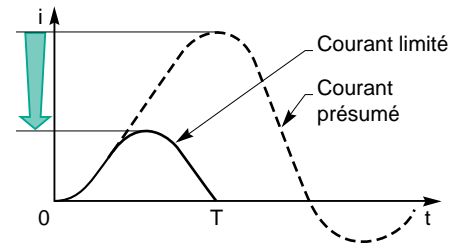


Fig. 1 : représentation des courants de court-circuit, présumé et limité.

1.2 Pourquoi limiter ?

c Pour réaliser des disjoncteurs plus économiques, surtout dans les faibles intensités nominales. L'appareil limiteur n'est traversé que par le courant limité beaucoup plus réduit que le courant présumé, et il n'a à couper que ce courant limité.

c Pour minimiser les effets du courant de défaut dans une installation électrique.

Quels sont ces effets ?

Effet électromagnétique

A une distance d d'un conducteur parcouru par un courant d'intensité I , il y a dans l'air une induction magnétique B de valeur :

$$B = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{d} \text{ (avec les unités du Système MKSA).}$$

Exemple : avec $I = 50 \text{ kA}$ et $d = 10 \text{ cm}$, $B = 0,1 \text{ tesla}$.

Conséquence possible : perturbation des dispositifs électroniques situés à proximité de conducteurs électriques parcourus par un courant de court-circuit.

Effets mécaniques

c Si à la distance d d'un conducteur parcouru par un courant I se trouve un autre conducteur parallèle au premier de même longueur L , et parcouru par un courant I' , ce conducteur est soumis à un effort F (d'attraction si I et I' sont de

même sens, de répulsion dans le cas contraire) qui vaut par unité de longueur :

$$\frac{F}{L} = BI \odot$$

Si les deux conducteurs sont parcourus par le même courant I , la formule devient :

$$\frac{F}{L} = 2 \times 10^{-7} \frac{I^2}{d} \text{ (avec les unités du système MKSA).}$$

Exemple : avec $I = 50 \text{ kA}$ et $d = 10 \text{ cm}$,

$$\frac{F}{L} = 5000 \text{ N/m}$$

Conséquence possible : déformation ou rupture de pièces.

c Dans tout appareillage, les contacts séparables, maintenus en contact par des ressorts, tendent à s'ouvrir sous l'effet d'une force électrodynamique dite de répulsion. Efforts qu'il faut parfois équilibrer par des systèmes de « compensation ». Pour $I = 50 \text{ kA}$, cette force atteint 1000 N .

Conséquence possible : amorçage entre les contacts d'appareils de commande avec détérioration des contacts.

Effet thermique

Lors d'un court-circuit, il y a un échauffement adiabatique $\Delta\theta$ des conducteurs de section S s'élevant à :

$$\Delta\theta = \frac{k}{S^2} \int_T i^2 dt$$

- $\int_T i^2 dt$ est appelée la contrainte thermique (exprimée en $A^2 s$).
- K est un coefficient dépendant de la nature des conducteurs (environ $6 \times 10^{-3} \frac{Kmm^4}{A^2 s}$ pour le cuivre).

Exemple : Un fil de cuivre, de section $1,5 \text{ mm}^2$, s'échauffe de $110 \text{ }^\circ\text{K}$ environ lorsqu'il est parcouru par une alternance d'un courant de 2000 A eff à 50 Hz .
 Conséquences possibles évidentes : déformation de matériel et destruction d'isolant d'où risques d'incendie et d'électrocution.

1.3 Comment limiter ?

Soit un circuit alternatif monophasé de puissance apparente S et de tension E , débitant dans une charge Z à travers un dispositif de protection A présentant une impédance négligeable avant son entrée en action (cf **fig. 2**), avec pour l'ensemble :

- source + ligne + défaut
- R = résistance équivalente
- L = inductance équivalente.

Quand apparaît un court-circuit aux bornes de la charge Z , avant intervention de A (donc u_a négligeable) le réseau est alimenté par une force électromotrice (f.e.m.) e telle que :

$$e = Ri + L \frac{di}{dt}$$

donc le courant s'établit avec une dérivée initiale égale à :

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_0 = \frac{e}{L}$$

Cette dérivée est maximale lorsque le court-circuit se produit à l'instant du maximum de tension du réseau, ce qui correspond, pour des facteurs de puissance inférieurs à $0,25$, à un courant présumé pratiquement symétrique.

Exemple : Une source triphasée 50 Hz , 400 V entre phases, de puissance apparente $S = 3200 \text{ kVA}$ et de courant de court-circuit maximal de 100 kA eff (dont la crête peut dépasser 200 kA en asymétrique). La dérivée initiale maximale du courant est de 44 kA/ms .

Pour éviter le développement de tels courants et pour ne pas supporter leurs effets, il faut interposer dans le circuit un dispositif de protection A limiteur qui, lors d'un court-circuit, insère très rapidement une chute de tension ou force contre électromotrice u_a qui s'oppose à la croissance du courant.

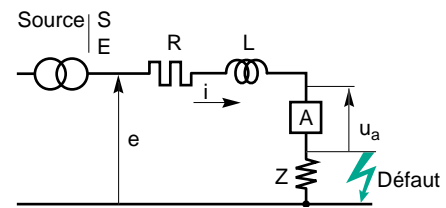


Fig. 2 : schéma de principe d'un circuit en défaut.

1.4 Conditions à respecter par u_a pour limiter le courant

Le schéma équivalent monophasé donne pour un court-circuit franc la relation suivante :

$$E = Ri + L \frac{di}{dt} + u_a$$

Une représentation vectorielle de l'impédance équivalente pour des facteurs de puissance $\cos \varphi \leq 0,25$ (donc $\varphi > 75^\circ$) montre que le terme $L \frac{di}{dt}$ est beaucoup plus grand que le terme $R i$ (cf. **fig. 3**), d'où en négligeant ce dernier :

$$e = L \frac{di}{dt} + u_a$$

Lorsque le courant limité atteint sa valeur crête, donc lorsque $\frac{di}{dt} = 0$, la f.e.m. a la valeur u_a .

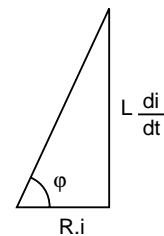


Fig. 3 : représentation vectorielle des deux composantes $R i$ et $L \frac{di}{dt}$.

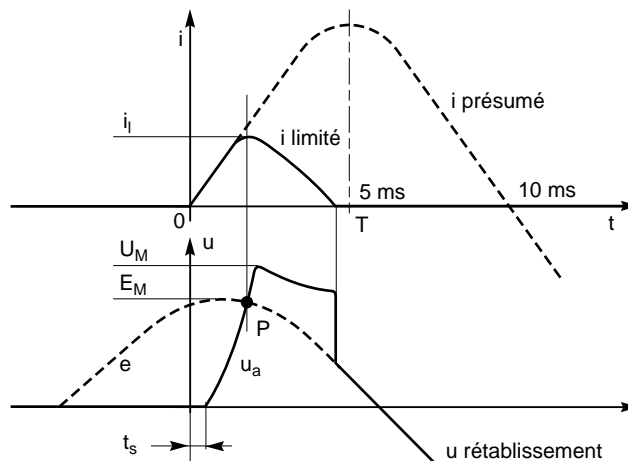
Ce qui permet de conclure :
 le maximum de courant limité est atteint lorsque la tension u_a égale la tension e de la source (cf. **fig. 4**).
 Une première conséquence est une limitation de courant d'autant plus facile à réaliser que la tension e du réseau est plus faible.
 Ensuite, sur la **figure 4** où P est le point d'intersection des courbes de développement de la tension u_a et de la tension e de la source, les courbes montrent que pour obtenir une limitation correcte, il est indispensable que l'instant de l'intersection P intervienne bien avant le maximum du courant présumé (donc < 5 ms en 50 Hz) d'où l'intérêt d'un développement de la tension u_a le plus rapide possible.
 Enfin, pour obtenir une décroissance du courant de court-circuit, il faut que la tension maximale U_M introduite par u_a soit supérieure à la tension maximale E_M de la source.
 En résumé, les trois conditions à respecter par u_a pour une limitation correcte sont :

■ **intervention tôt** \Rightarrow t_s minimum, mais il y a une limite inférieure imposée par le seuil d'intervention du dispositif (par exemple le réglage maximal des déclencheurs instantanés d'un disjoncteur ou bien la contrainte thermique de non fusion pour un fusible),

■ **aller vite** \Rightarrow développement rapide de la tension u_a obtenu par exemple dans un disjoncteur par une forte accélération des contacts,

■ **aller haut** \Rightarrow $U_M > E_M$ obtenue par exemple par allongement, fractionnement et refroidissement de l'arc dans le dispositif de coupure.

De ces trois conditions, les deux premières, la rapidité et la vitesse, sont les plus importantes. Et en ce qui concerne la troisième, aller haut, il n'est pas nécessaire que le dépassement de la tension U_M par rapport à E_M soit très élevé. Ainsi pour un réseau triphasé 420 V eff (donc de tension simple crête de $240\sqrt{2}=340$ V) une tension U_M de 400 V est suffisante.



Nota : t_s est l'instant d'apparition de la tension u_a (par ex : séparation des contacts ou bien vaporisation d'un élément fusible).

Fig. 4 : courbes $u = f(t)$ et $i = f(t)$ développement de la tension d'arc et sa conséquence : la décroissance du courant de court-circuit.

1.5 Cas particulier des disjoncteurs miniatures

Dans ce cas, les facteurs de puissance en court-circuit sont généralement supérieurs à 0,5. Le terme Ri ne peut plus être négligé. Donc, à l'instant où le courant limité passe par son maximum, il est possible d'écrire :
 $u_a = E_M - R I_l$
 ce qui montre que la tension u_a maximale peut rester inférieure à la tension maximale du réseau.

Exemple : sur un circuit sous une tension simple $V = 240$ V eff (soit $E_M = 340$ V) si le courant de

court-circuit présumé I_p est de 6 kA à $\cos \varphi = 0,6$, sachant que $R = V / I_p \cos \varphi$ et en supposant un courant limité crête I_l de 4 kA, le calcul donne :

$u_a = 243$ V, inférieur de près de 100 V à E_M .

Vis-à-vis des trois conditions à satisfaire pour une bonne limitation, les deux chapitres suivants explorent les différents principes physiques et les techniques mis en œuvre dans la conception des appareils limiteurs, fusibles et disjoncteurs.

2 Moyens d'obtention de la tension u_a

Une rapide chute de tension u_a est principalement obtenue par l'insertion, en série dans le circuit, de différents dispositifs. Mais il faut, ici, être attentif au fait qu'un dispositif limiteur n'a pas toujours une fonction de

coupure. Exploité dans le domaine des protections de circuits électriques, il doit être alors complété d'un disjoncteur.

2.1 Résistance à changement d'état

Deux principes permettent de réaliser ce dispositif :

- faire fondre dans une enveloppe étanche un élément conducteur solide par dépassement de la contrainte thermique de fusion : c'est le fusible classique présentant l'inconvénient de nécessiter un remplacement de l'élément fusible après fonctionnement ;
- remplacer dans le cas précédent l'élément fusible par un corps facilement vaporisable sur

contrainte thermique élevée (sodium ou potassium par exemple) mais dont les vapeurs soumises à une forte pression se recondensent rapidement après extinction de l'arc de coupure : c'est le fusible autorégénérable. A noter que ce type de fusible est toujours complété d'une résistance en parallèle pour éviter les surtensions. De plus, il nécessite aussi un disjoncteur placé en série (avec le fusible et sa résistance), pour couper le circuit avant la régénération de l'élément fusible.

2.2 Résistance à coefficient de température positif (mais dont l'échauffement est limité pour rester en dessous du point de fusion).

Résistance insérée en permanence

Son usage est limité en pratique à des intensités nominales inférieures à 100 A pour des raisons d'échauffement permanent.

Résistance placée en parallèle, avec des contacts à ouverture rapide sur défaut [1] [2]

Ce système permet d'atteindre des intensités nominales plus élevées, n'ayant plus la

contrainte de l'échauffement permanent sur la résistance. Par contre, les contraintes des conditions de commutation de courant, du contact en parallèle vers la résistance CTP, demeurent.

De plus, il est toujours nécessaire de placer en série d'autres contacts pour couper le courant limité.

2.3 Résistance variable que constitue l'arc de coupure lui-même

L'arc de coupure dans un disjoncteur est en effet une résistance variable dont la valeur peut être augmentée par son refroidissement. Une mise en œuvre de moyens de refroidissement suffisamment énergiques permet d'atteindre la tension voulue pour limiter le courant.

L'arc possède l'avantage supplémentaire, sur les résistances de limitation, de ne pas engendrer de surtension proportionnelle au courant. Quelles que soient les conditions de coupure, la tension d'arc maximale reste à une valeur à peu près constante et maîtrisable.

De plus, l'insertion de l'arc est automatique dès que deux contacts métalliques parcourus par un courant fort sont séparés.

En pratique, dans des réseaux de plus de 1000 V, il est difficile d'obtenir des tensions d'arc suffisantes dans de petits volumes pour limiter le courant (à l'exception des fusibles de faible intensité nominale utilisés en HT jusqu'à 36 kV). C'est pourquoi l'utilisation de l'arc comme résistance de limitation est le procédé le plus commun et le plus économique dans la protection des réseaux BT.

Tous ces moyens favorisent la création de u_a répondant au besoin d'« aller haut », mais il faut aussi « intervenir tôt » et « aller vite » (cf. chapitre précédent). D'où l'intérêt des propulseurs de contacts et des déclencheurs ultra-rapides pour les disjoncteurs limiteurs présentés dans le chapitre suivant.

3 Propulseurs de contacts et déclencheurs ultra-rapides

3.1 Propulseurs de contacts

Les principaux systèmes proposés pour séparer les contacts (donc insérer l'arc) sont classés selon l'origine de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement.

Systèmes indépendants du courant de court-circuit

Avec source d'énergie auxiliaire qui peut être :

- Mécanique
- énergie accumulée dans un ressort,
- énergie pneumatique,
- énergie hydraulique.

Une limitation correcte exige des accélérations de l'ordre de plusieurs milliers de fois l'accélération de la pesanteur, à obtenir en des temps très courts (1 ms environ). En pratique, ces trois sources d'énergie citées ne permettent pas d'atteindre cet objectif tout en restant dans des conditions économiques raisonnables.

■ Chimique

L'énergie sous forme chimique contenue dans un explosif est capable de développer les accélérations requises, mais sa mise en œuvre reste complexe. De plus, la cartouche explosive doit être changée après chaque opération. Aussi ce procédé n'a donné lieu qu'à de rares développements [5] [13].

■ Electrique

L'énergie nécessaire est accumulée dans un condensateur.

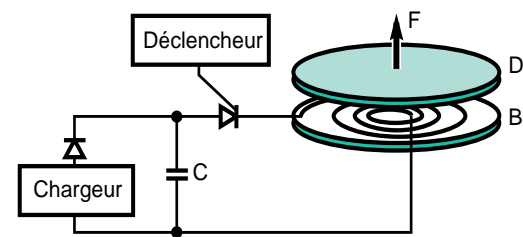


Fig. 5 : schéma d'un propulseur de contacts selon le principe de Elihu Thomson.

Ce principe découle de l'expérience effectuée à la fin du 19^e siècle par Elihu Thomson (cf. fig. 5).

Une bobine plate B enroulée en spirale est couplée magnétiquement, le mieux possible, avec le disque conducteur D. La décharge brusque du condensateur C dans la bobine B, commandée par un déclencheur électronique, crée dans le disque D des courants induits concentriques de sens opposé.

Il en résulte une force F de répulsion sur le disque qui a la propriété d'être simultanément très élevée et très rapide (moins d'une milliseconde après l'ordre venant du déclencheur) mais brève (quelques ms seulement).

Ce procédé est parfois utilisé pour déverrouiller très rapidement l'accrochage des disjoncteurs limiteurs [6] [8].

Systèmes à propre courant

L'énergie nécessaire pour propulser le contact mobile est prélevée sur le courant de défaut lui-même.

De nombreux appareils utilisent ce principe. Ces systèmes sont classés en deux grandes familles suivant l'utilisation ou non de circuits magnétiques (saturables).

■ Electrodynamique

(Sans circuit magnétique donc non saturable).

La répulsion naturelle des contacts sous l'effet des efforts électrodynamiques est amplifiée par des configurations spéciales dont voici deux exemples.

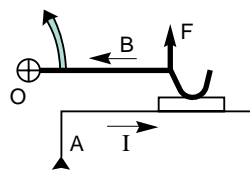
□ Répulsion entre deux conducteurs formant une boucle : un A fixe, et un B mobile et rotatif autour du point O (cf. fig. 6a).

□ Répulsion sur un contact mobile en pont B accentuée par un croisement des contacts fixes A et A' (cf. fig. 6b).

■ Electromagnétique

Avec circuit magnétique donc avec apparition du phénomène de saturation.

a) Répulsion simple



b) Répulsion renforcée

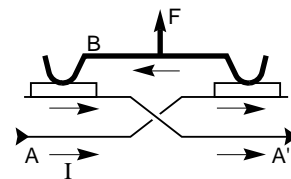


Fig. 6 : schémas de propulseurs de contacts à propre courant électrodynamique.

□ La **figure 7a** illustre un tel dispositif : le solénoïde S parcouru par un fort courant (court-circuit) avale le noyau magnétique mobile N qui en percutant le contact mobile B provoque l'ouverture du circuit.

C'est le schéma type des disjoncteurs miniatures [10].

□ La **figure 7b** présente la mise en œuvre de ce principe pour les appareils à forte intensité nominale.

Le dispositif est alors composé d'un circuit magnétique C avec entrefer, traversé par le courant I du circuit à protéger.

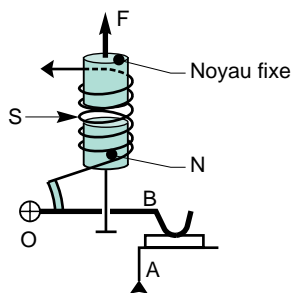
Une bobine B autour du circuit magnétique se referme sur une barre A placée dans l'entrefer du circuit. A et B constituent le secondaire d'un transformateur de courant à entrefer dont I est le courant primaire.

L'interaction du courant secondaire dans A et du champ magnétique dans l'entrefer provoque un effort F qui propulse un contact mobile. Ce dispositif a été utilisé pour des limiteurs installés sur des réseaux à courant continu de traction électrique [1].

Remarque

Alors que l'énergie disponible avec un système à source auxiliaire est indépendante du niveau de courant de défaut, l'effort développé par un système à propre courant ainsi que l'instant de son entrée en action sont automatiquement liés à la valeur de ce courant de défaut. Il en résulte que pour ce dernier type de propulseur il existe un niveau de courant en dessous duquel le système est inefficace, en deçà la séparation des contacts est alors assurée par le seul mécanisme de manœuvre de l'appareil.

a) Avec noyau magnétique, pour disjoncteur miniature



b) A circuit magnétique en C, pour disjoncteur à forte intensité nominale

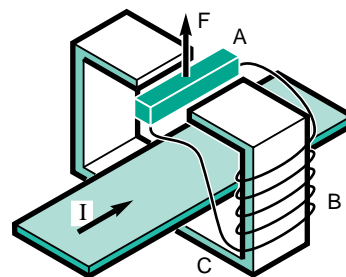


Fig. 7 : schémas de propulseurs de contacts électrodynamique à propre courant.

3.2 Déclencheurs ultra-rapides

Les déclencheurs ultra-rapides ont pour fonction de confirmer mécaniquement la séparation « réflexe » des contacts. Ils sont indispensables lorsque le propulseur de contact est à propre courant et que le contact mobile n'a pas d'accrochage en position ouvert.

En effet, compte-tenu de l'inertie mécanique du contact mobile, il faut que la séparation des contacts soit relayée en moins de 10 ms environ, par le mécanisme d'ouverture, car l'effort de répulsion disparaît après la coupure du courant de court-circuit. Sinon les ressorts de pression referment les contacts et rétablissent le court-circuit.

Ces dispositifs exploitent les mêmes principes, électrique, électrodynamique ou électromagnétique, objets du précédent paragraphe.

Ainsi à titre d'exemple, dans certains disjoncteurs miniatures de type modulaire, le noyau magnétique mobile (N sur le schéma de la **figure 7a**) sert non seulement à accélérer la

séparation des contacts, mais également à déverrouiller très rapidement le mécanisme de maintien en position fermé des contacts mobiles. De même, le principe de la **figure 5 a** déjà été utilisé pour cette fonction de déverrouillage [6] [8].

Il existe aussi des déclencheurs ultra-rapides qui utilisent la pression développée par l'arc électrique dans la chambre de coupure lors de l'interruption d'un fort courant.

En effet, lorsqu'un arc progresse dans une chambre de coupure, il y crée une pression de plusieurs bars disponible dès que le courant limité passe par son maximum (au point P sur la **figure 4**).

La technique d'exploitation de ce principe, brevetée par Merlin Gerin permet la réalisation de disjoncteurs très rapides et très limiteurs : cette pression est mise à profit, grâce à des canalisations et des clapets appropriés, pour actionner un piston qui commande en moins de 5 ms le mécanisme d'ouverture du disjoncteur.

4 Conclusion

La lecture de ce Cahier Technique vous a certainement permis d'apprécier l'importance des recherches nécessaires pour offrir des gammes de disjoncteurs performants. Merlin Gerin depuis 1930, comme d'autres constructeurs, a participé à l'amélioration de la sécurité en général et de la

fiabilité de la distribution électrique. Les derniers brevets déposés par cette société démontrent tout l'avenir des disjoncteurs limiteurs dans la distribution électrique dont ils améliorent notamment la sélectivité et par conséquent la disponibilité.

5 Bibliographie

- [1] Disjoncteurs ultra-rapides pour courant continu.
P. BRANCHU.
Brevets n° 596.483 (1925) - 629.040 (1927) - 721.451 (1931).
- [2] Nouvelle disposition de branchement pour limiteurs de courant.
K. KESL.
RGE, février 1942, p. 85-96.
- [3] Coupure des courants de l'ordre de 100 kA en BT.
G. BOUVIER.
RGE, novembre 1955, p. 554.
- [4] Disjoncteurs limiteurs à basse tension pour courants alternatifs.
A. MOLAS.
RGE, mai 1958, p. 259-276.
- [5] Problèmes de coupure et utilisation des limiteurs Is.
P. BRUCKNER.
ETZ-B, H3, 21 mars 1959.
- [6] Disjoncteurs rapides avec limitation du courant.
A. ERK.
ETZ-B, H7, 2 avril 1962, p. 169.
- [7] L'accroissement des courants de court-circuit et leur maîtrise dans les installations BT.
P. BRUCKNER.
ETZ-B, H19, 17 septembre 1962, p. 511.
- [8] Limitation et coupure du courant avec un disjoncteur Gearapid dans un réseau alternatif.
H. FEHLING.
ETZ-B, H19, 17 septembre 1962, p. 537.
- [9] Disjoncteur à limiteurs de courant.
E.B. HEFT.
Power, juillet 1968, p. 55.
- [10] Exploitation de la limitation des courants de court-circuit.
J.R. COCHENNEC.
Revue Klöckner-Moeller, novembre 1970.
- [11] Interrupteurs limiteurs du courant de court-circuit.
G. CANTARELLA.
L'Elettrotecnica, juillet 1970.
- [12] Développement de disjoncteurs sans fusibles à limitation de courant.
H. SUZUKI.
Revue Hitachi, vol. 19, n°12, p. 441.
- [13] Le système «Pyristor» de Ferraz.
G. GUEZ.
Moniteur de l'Electricité, oct. 1984, p. 42.

