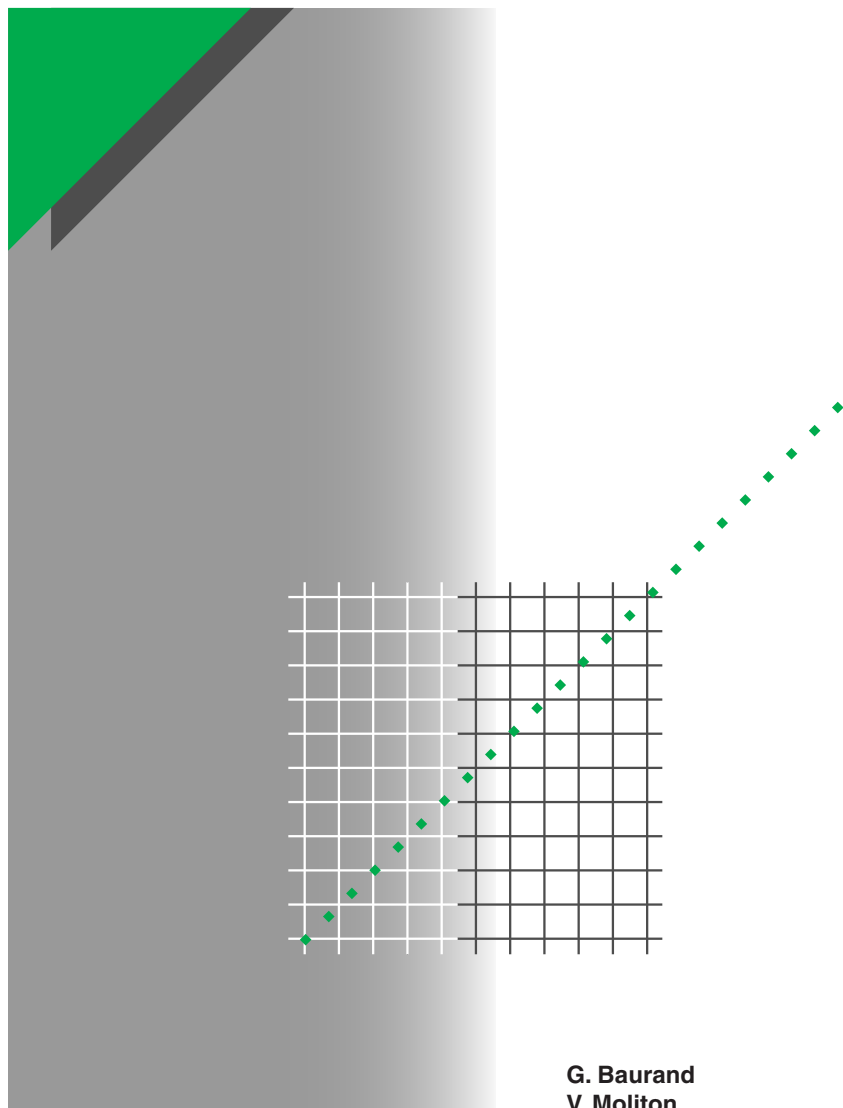


Cahier technique n° 211

La protection des moteurs BT



G. Baurand
V. Moliton

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.

Cette collection est disponible sur l'Internet avec ses nouveautés et mises à jour :

<http://www.cahiers-techniques.schneider-electric.com>

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

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

Avertissement

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

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée avec la mention obligatoire :

« Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 211

La protection des moteurs BT

Gilles BAURAND



Diplôme d'ingénieur en électromécanique de l'ENSICAEN - Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen - en 1977.
Rentre chez Télémécanique en 1978 comme responsable technique de développement des relais de contrôle et de protection électronique, poste qu'il occupe jusqu'en 1985.
Il est responsable du laboratoire du département contacteurs et relais de protection moteur de 1986 à 1991, puis de l'anticipation de ce même département de 1992 à 2004.
Au sein de Schneider Electric depuis début 2005, il est responsable de l'anticipation du domaine PPC « Power Protection & Control ».

Vivien MOLITON



Diplômé en 2002 de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL) avec une spécialisation « Mécatronique ». Il intègre cette même année le laboratoire mécatronique en recherche et développement de Schneider Electric. Au sein du service Mesure et Protection, il participe au développement d'une nouvelle gamme de disjoncteur-moteur ainsi qu'à celui du démarreur contrôleur TesysU de la marque Télémécanique.

La protection des moteurs BT

Tout moteur électrique doit être dimensionné pour répondre aux exigences d'une exploitation donnée et ne peut fonctionner au-delà, sans un risque de détérioration, instantanée ou dans le temps, du moteur lui-même et/ou de son environnement.

Pour supprimer ce risque ou au moins le réduire fortement, les concepteurs et installateurs de machines prévoient des dispositifs de protection qu'ils sélectionnent dans les catalogues des constructeurs.

Mais parmi tous ces dispositifs existants qui devront « collaborer » (fonctionner) avec des appareils de sectionnement et de commande, que prévoir ? Comment choisir ? Et surtout comment s'assurer que les matériels retenus feront « bon ménage » ?

Voilà les questions auxquelles ce Cahier Technique apporte des réponses après avoir présenté l'ensemble des facteurs à prendre en compte puis détaillé les différentes solutions offertes par les constructeurs, y compris les appareils complets que sont les « démarreurs-moteurs ».

Sommaire

1 Introduction		p. 4
2 Rappels sur les moteurs électriques	2.1 Les différents types de moteurs	p. 5
	2.2 Domaine d'utilisation des moteurs basse tension	p. 6
3 Les différentes causes de défauts et leur conséquences	3.1 Les défauts internes au moteur : avaries concernant l'enroulement statorique ou rotorique	p. 7
	3.2 Les défauts externes au moteur : phénomènes liés à l'alimentation électrique du moteur	p. 8
	3.3 Les défauts externes au moteur : phénomènes liés à l'exploitation du moteur	p. 11
	3.4 Synthèse	p. 12
4 Les fonctions de protection	4.1 Protection contre les courts-circuits	p. 13
	4.2 Protection contre les surcharges	p. 14
	4.3 Tableau de choix des relais de protection	p. 20
	4.4 Les « disjoncteurs moteurs » (disjoncteurs magnétothermiques)	p. 20
5 Les départs-moteurs	5.1 Généralités	p. 22
	5.2 Les fonctions de base des départs-moteurs	p. 22
	5.3 Cas particuliers des démarreurs et variateurs de vitesse électroniques	p. 24
	5.4 Une fonction complémentaire : la communication	p. 24
	5.5 Départs-moteurs et coordination	p. 25
	5.6 Les Appareils de connexion de Commande et de Protection (ACP)	p. 27
	5.7 La sélectivité	p. 28
	5.8 Exemple	p. 28
6 Conclusion		p. 30
Annexe 1 : système modulaire du démarreur-contrôleur TesysU		p. 31
Annexe 2 : les principaux modes de démarrage		p. 32
Annexe 3 : bibliographie		p. 36

1 Introduction

Tout moteur électrique a des limites de fonctionnement. Dépasser ces limites conduit, à plus ou moins long terme, à sa destruction mais aussi à celle des mécanismes qu'il anime, avec pour conséquence immédiate des arrêts et des pertes d'exploitation.

Ce type de récepteur, qui transforme une énergie électrique en énergie mécanique, peut être le siège d'incidents d'origine électrique ou mécanique.

■ Electrique

□ surtension, chute de tension, déséquilibre, perte de phases qui provoquent des variations sur le courant absorbé,

□ courts-circuits dont le courant peut atteindre des niveaux destructeurs pour le récepteur.

■ Mécanique

□ calage du rotor, surcharge momentanée ou prolongée qui entraînent une augmentation du courant absorbé par le moteur, d'où un échauffement dangereux pour ses bobinages.

Le coût de ces incidents peut-être élevé. Il doit prendre en compte le manque à produire, les pertes de matières premières, la remise en état de l'outil de production, la non-qualité de la production, les retards de livraison. La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises implique la réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité.

Ces incidents peuvent avoir également des conséquences dramatiques sur la sécurité des

personnes en contact direct ou indirect avec le moteur.

Pour s'affranchir de ces incidents ou du moins limiter leurs conséquences et éviter qu'ils n'entraînent la détérioration du matériel ainsi que des perturbations sur le réseau d'alimentation, l'utilisation de protections est nécessaire. Elles permettent d'isoler du réseau le matériel à protéger, en actionnant un organe de coupure par détection et mesure des variations de grandeurs électriques (tension, courant, etc.)

Chaque départ-moteur doit donc comporter :

■ une protection contre les courts-circuits, pour détecter et couper le plus rapidement possible des courants anormaux généralement supérieurs à 10 fois le courant nominal (I_n)

■ une protection contre les surcharges, pour détecter des augmentations du courant jusqu'à environ $10 I_n$ et couper le départ avant que l'échauffement du moteur et des conducteurs n'entraîne la détérioration des isolants.

Ces protections sont assurées par des appareils spécifiques tels que des fusibles, disjoncteurs, relais de surcharge ou par des appareils plus intégrés offrant plusieurs types de protections.

Nota : La protection contre les défauts « terre » qui englobe la protection des personnes et contre les risques d'incendie, n'est pas traitée dans ce document car elle est habituellement prévue au sein de la distribution électrique pour un équipement, un atelier ou pour tout un bâtiment.

2 Rappels sur les moteurs électriques

2.1 Les différents types de moteurs

Il existe trois principales catégories de moteurs électriques :

- les moteurs asynchrones
- les moteurs synchrones
- les moteurs à courant continu

Chacun d'entre eux est composé d'une partie fixe – le stator ou inducteur – et d'une partie mobile – le rotor ou induit.

Les moteurs asynchrones

Leurs stators possèdent des enroulements alimentés en courant alternatif et disposés de manière à créer un champ magnétique tournant (flux tournant) à la vitesse synchrone Ω . Dans le cas d'une alimentation en triphasé, la configuration la plus fréquente comporte trois enroulements (pouvant regrouper plusieurs bobines) connectés en triangle ou en étoile. Leurs rotors sont le plus fréquemment constitués de barres conductrices mises en court-circuit à leurs extrémités, cas des moteurs « à cage d'écureuil » (faible puissance), ou de manière moins répandue sous forme d'enroulements, cas des moteurs asynchrones à rotor bobiné (grande puissance). Le flux tournant, généré par le stator, induit dans le rotor un courant qui provoque sa rotation (cf loi de Laplace). Sa vitesse Ω' est inférieure à la vitesse synchrone Ω du flux tournant, on parle alors de glissement (g) correspondant à la perte de vitesse relative :

$$g = \frac{\Omega - \Omega'}{\Omega}, \text{ c'est la notion d'asynchronisme.}$$

Les moteurs asynchrones sont adaptés aux applications de petite et moyenne puissance, nécessitant notamment des couples de démarrage augmentant avec la vitesse. Ce sont les moteurs les plus utilisés en raison de leur faible coût, de leur robustesse et de leur facilité de mise en œuvre et d'entretien. En commande directe ils ont l'inconvénient d'avoir des courants de démarrage élevés, pouvant aller jusqu'à 8 fois le courant nominal (cf. **fig. 1**).

Les moteurs synchrones

Comme pour les moteurs asynchrones, ils possèdent un stator composé d'enroulements alimentés en courant alternatif. La caractéristique de ces moteurs est le synchronisme entre la vitesse de rotation du rotor et celle du champ

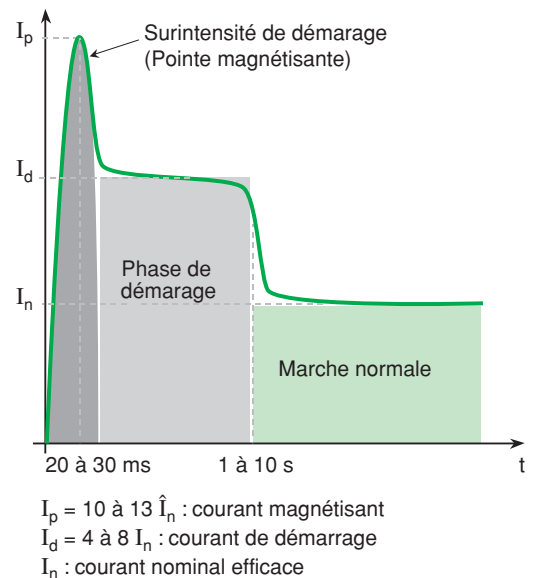


Fig. 1 : courbe $I = f(t)$ d'un moteur asynchrone.

tournant créé par le stator. Ce phénomène existe car le rotor des moteurs synchrones est constitué d'aimants permanents ou d'un enroulement alimenté en courant continu établissant un champ magnétique fixe. Cette particularité rend plus complexe leur construction et justifie leur coût plus élevé.

Les moteurs synchrones sont principalement utilisés pour des applications de très forte puissance (> 5 MW), nécessitant une vitesse constante quelle que soit leur charge, mais présentent des difficultés de démarrage, ce qui explique qu'ils sont souvent associés à des variateurs de vitesse.

Les moteurs à courant continu

Dans ces moteurs, le stator et le rotor sont tous deux constitués d'enroulements parcourus par du courant continu. Le courant est acheminé vers l'induit par l'intermédiaire d'un collecteur à balais. Le stator crée un champ magnétique fixe provoquant, suivant la loi de Laplace, le déplacement des conducteurs placés dans le rotor.

Les moteurs à courant continu sont principalement utilisés pour des applications nécessitant une régulation de vitesse précise et rapide, et peuvent supporter de fortes surcharges. Leur inconvénient est la présence du collecteur dont les balais et bagues nécessitent un entretien régulier. De plus lors du démarrage et de l'arrêt de ces moteurs des précautions sont à prendre,

notamment l'obligation de ne jamais couper l'excitation si l'induit est sous tension : un tel arrêt provoque l'emballement du moteur.

Pour plus d'informations sur les différents types de moteurs et leur fonctionnement, vous pouvez consulter le Cahier Technique Schneider-Electric n° 207.

2.2 Domaine d'utilisation des moteurs basse tension

Les moteurs basse tension (BT) sont de deux types :

- monophasés,
- triphasés.

Ils sont alimentés sous des tensions qui s'échelonnent de 220 à 690 V. Les moteurs électriques basse tension ont en majorité une puissance inférieure à 100 kW. Plus la puissance est élevée, plus le courant est important ($P = UI \cdot \cos\varphi$) et impose un dimensionnement en conséquence des éléments concernés (moteurs, appareillages, câbles et protections).

Pour des raisons économiques, au-dessus de 1500 kW, on emploie des moteurs alimentés en moyenne tension (MT) (cf. **fig. 2**).

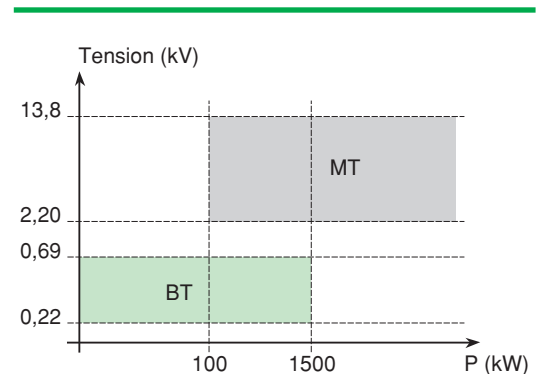


Fig. 2 : domaines d'utilisation des moteurs électriques en fonction de leur puissance et tension d'alimentation.

3 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences

Au niveau d'une installation comportant des moteurs électriques, nous pouvons distinguer deux types de défauts : les défauts d'origine interne au moteur, et les défauts d'origine externe.

■ Les défauts d'origine interne :

- court-circuit phase - terre,
- court-circuit entre phases,
- court-circuit entre spires,
- sur-échauffement des bobinages,
- rupture d'une barre dans les moteurs à cage,
- problèmes liés aux roulements,
- etc.

■ Les défauts d'origine externe

Leurs sources sont localisées en dehors du moteur électrique, mais leurs conséquences peuvent entraîner des dégradations dans celui-ci.

Ces dysfonctionnements peuvent provenir :

- de la source d'alimentation :
 - coupure d'alimentation,
 - inversion ou déséquilibre de phases,
 - baisse de tension,
 - surtension,
 - etc.
- du mode d'exploitation du moteur :
 - régimes de surcharge,
 - nombre de démarrages et régime de démarrage,
 - inertie de la charge,
 - etc.
- de l'installation du moteur :
 - désalignement,
 - balourd,
 - efforts excessifs sur l'arbre,
 - etc.

3.1 Les défauts internes au moteur : avaries concernant l'enroulement statorique ou rotorique

L'**enroulement statorique** d'un moteur électrique est constitué de conducteurs en cuivre isolés par du vernis. La rupture de cette isolation peut provoquer un **court-circuit** permanent, entre une phase et la masse, entre deux voire trois phases, ou entre spires d'une même phase (cf. **fig. 3**). Elle peut-être provoquée par des phénomènes électriques (décharges superficielles, surtensions), thermiques (sur-échauffement) ou même mécaniques (vibrations, efforts électrodynamiques sur les conducteurs).

Des défauts d'isolement peuvent également se produire au sein de l'enroulement rotorique avec la même conséquence : la mise hors service du moteur.

La cause la plus fréquente d'avarie au niveau des enroulements d'un moteur est une élévation trop importante de leur température. Cette élévation est souvent provoquée par une surcharge impliquant une augmentation du courant circulant dans ces enroulements.

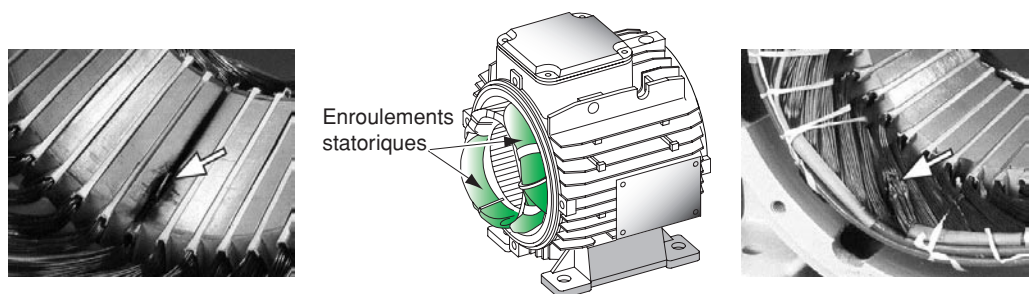


Fig. 3 : les enroulements sont, pour les moteurs, les parties les plus vulnérables aux défauts électriques et aux incidents d'exploitation.

La courbe de la **figure 4**, fournie par la plupart des constructeurs de moteurs électriques, montre l'évolution de la résistance d'isolement en fonction de la température : plus la température augmente et plus la résistance d'isolement diminue. La durée de vie des enroulements, et par conséquent du moteur, se réduit donc fortement.

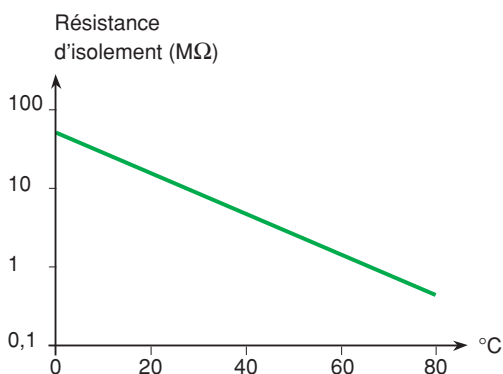


Fig. 4 : évolution de la résistance d'isolement des bobinages des moteurs en fonction de leur température.

La **figure 5** montre qu'une augmentation de 5 % du courant, équivalente à une élévation de température d'environ + 10 °C, diminue de moitié la durée de vie des enroulements. Une protection contre les surcharges est donc nécessaire pour éviter les sur-échauffements et réduire les risques d'avaries internes au moteur par rupture d'isolement des bobinages.

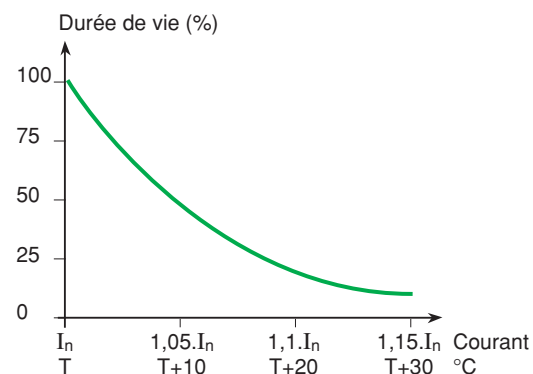


Fig. 5 : durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant consommé.

3.2 Les défauts externes au moteur : phénomènes liés à l'alimentation électrique du moteur

Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension (cf. Cahiers Techniques Schneider Electric n° 151 et 179).

Les surtensions (cf. **fig. 6**) temporaires ou permanentes peuvent avoir différentes origines :

- atmosphérique (coup de foudre),
- décharge électrostatique,
- manœuvre d'appareils connectés au même réseau,
- etc.

Leurs principales caractéristiques sont décrites, ci-contre, dans le tableau de la **figure 7**.

Ces perturbations, qui se superposent à la tension du réseau, peuvent s'appliquer selon deux modes :

- mode commun, entre les conducteurs actifs et la terre,
- mode différentiel, entre les différents conducteurs actifs.

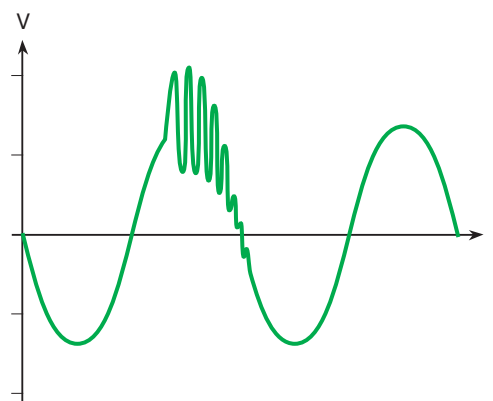


Fig. 6 : exemple de surtension.

Dans la majeure partie des cas, les surtensions se traduisent par un claquage diélectrique au niveau des enroulements du moteur, entraînant sa destruction.

Type de surtension	Durée	Raideur du front - fréquence	Amortissement
Atmosphérique	Très courte (1 à 10 µs)	Très élevée (1000 kV/µs)	Fort
Décharge électrostatique	Très courte (ns)	Elevée (10 MHz)	Très fort
Manœuvre	Courte (1 ms)	Moyenne (1 à 200 kHz)	Moyen
A fréquence industrielle	Longue (> 1 s)	Fréquence du réseau	Nul

Fig. 7 : caractéristiques de différents types de surtension.

Phases déséquilibrées

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Le déséquilibre (cf. fig. 8) peut-être provoqué par l'ouverture d'une phase (défaut de dissymétrie), par la présence de charges monophasées dans l'environnement proche du moteur, ou par la source elle-même.

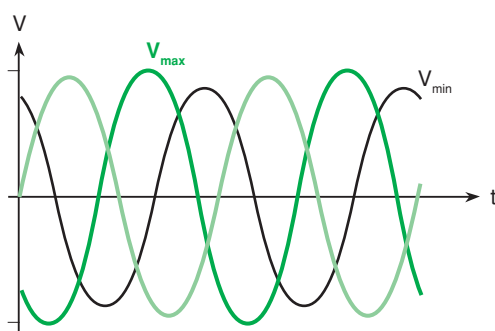


Fig. 8 : relevé de tensions d'un système triphasé déséquilibré.

Le calcul du déséquilibre peut-être approché par l'équation suivante :

$$D = 100 \text{ MAX} \left(\frac{V_{\max} - V_{\text{moy}}}{V_{\text{moy}}}, \frac{V_{\text{moy}} - V_{\min}}{V_{\text{moy}}} \right)$$

avec :

- D : déséquilibre (%)
- V_{\max} : tension la plus élevée,
- V_{\min} : tension la plus faible,

$$V_{\text{moy}} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3}$$

Les conséquences d'un déséquilibre des tensions appliquées à un moteur sont la diminution du couple utile et l'augmentation des pertes ; les déséquilibres se traduisent par une composante

inverse qui génère de forts courants rotoriques provoquant un échauffement très important du rotor et impliquant un sur-échauffement du moteur (cf. fig. 9).

Valeur du déséquilibre (%)	0	2	3,5	5
Courant statorique (A)	I_n	$1,01 \cdot I_n$	$1,04 \cdot I_n$	$1,075 \cdot I_n$
Augmentation des pertes (%)	0	4	12,5	25
Echauffement (%)	100	105	114	128

Fig. 9 : influence d'un déséquilibre de tensions sur les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur.

La norme CEI 60034-26 fournit une règle de déclassement en fonction du déséquilibre des tensions (cf. fig. 10) qu'il est conseillé d'appliquer lorsque ce phénomène est connu ou prévisible sur le réseau alimentant le moteur. Ce coefficient de déclassement permet, soit de surdimensionner un moteur pour tenir compte du déséquilibre, soit de diminuer le courant de fonctionnement d'un moteur au regard de son courant nominal.

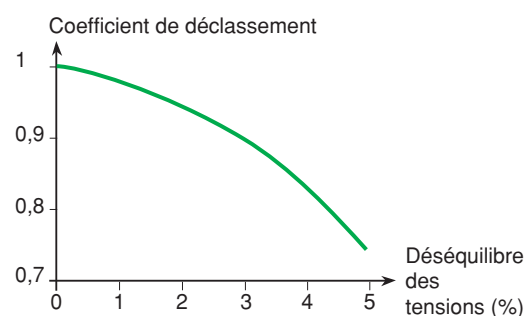


Fig. 10 : déclassement d'un moteur en fonction d'un déséquilibre de tensions de son alimentation.

Baisses de tension et coupures

Un creux de tension (cf. **fig. 11**) est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1 % de la tension nominale du réseau BT (CEI 61000-2-1). Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur supérieure à 99 % (CEI). Elles sont caractérisées par un seul paramètre : la durée. Les coupures brèves sont de durée inférieure à 1 minute (CEI) les coupures longues étant de durée supérieure. On parle de microcoupure pour des durées de l'ordre de la milliseconde.

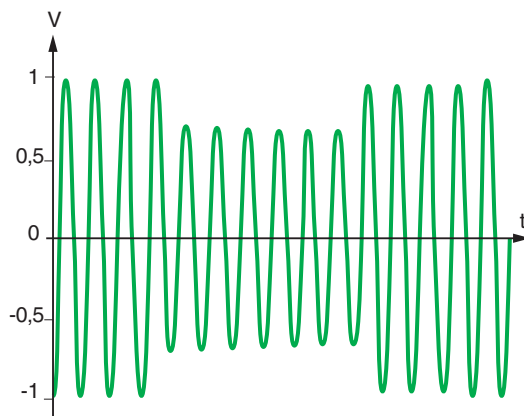


Fig. 11 : exemple d'un creux de tension.

L'origine de ces variations de tension peut être soit un phénomène aléatoire extérieur à l'exploitation (défaut sur la distribution publique ou court-circuit accidentel), soit un phénomène lié à l'installation elle-même (branchement de fortes charges telles que des moteurs, des transformateurs). L'influence des variations peut être dramatique pour le moteur lui-même.

■ Conséquences sur un moteur asynchrone

Lors d'un creux de tension, le couple d'un moteur asynchrone (proportionnel au carré de la tension) diminue brutalement et provoque un ralentissement. Ce ralentissement est fonction de l'amplitude et de la durée du creux, de l'inertie des masses tournantes et de la caractéristique couple-vitesse de la charge entraînée. Si le couple que le moteur développe devient inférieur au couple résistant, le moteur s'arrête (décrochage). Après une coupure, le retour de la tension engendre un appel de courant de réaccélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure.

Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs réaccélérations simultanées

peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau. La durée du creux est alors allongée et peut rendre la réaccélération difficile (redémarrages longs avec surchauffe) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).

La réalimentation rapide (~ 150 ms) sans précaution d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement expose au risque d'un réenclenchement en opposition de phase entre la source et la tension résiduelle entretenue par le moteur asynchrone. Dans ce cas, la première crête du courant peut atteindre trois fois le courant de démarrage (15 à 20 I_n) (cf. Cahier Technique Schneider-Electric n°161).

Ces surintensités, et chutes de tension qui en découlent, ont plusieurs conséquences sur le moteur :

- échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation,
- à-coups avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements d'où une usure prématurée voire une casse.

Elles peuvent également affecter d'autres équipements tels les contacteurs (usure voire soudure des contacts), provoquer le déclenchement des protections générales de l'installation et ainsi l'arrêt d'une chaîne de fabrication ou d'un atelier.

■ Conséquences sur un moteur synchrone

Les conséquences sont à peu près identiques au cas des moteurs asynchrones. Cependant les moteurs synchrones supportent sans décrocher des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %), du fait de leur inertie généralement plus importante et d'une plus faible influence de la tension sur le couple.

En cas de décrochage, le moteur s'arrête et il faut alors reprendre tout le processus de démarrage qui peut-être complexe.

■ Conséquences sur les machines à vitesse variable

Les problèmes posés par les creux de tension appliqués aux variateurs de vitesse sont :

- impossibilité de fournir la tension suffisante au moteur (perte de couple, ralentissement),
- dysfonctionnement des circuits de contrôle alimentés directement par le réseau,
- surintensité au retour de la tension (recharge du condensateur de filtrage des variateurs),
- surintensité et déséquilibre de courant sur le réseau en cas de creux de tension sur une seule phase.

Les variateurs de vitesse se mettent généralement en défaut pour une chute de tension supérieure à 15 %.

Présence d'harmoniques

Toute fonction périodique (de fréquence f) peut se décomposer en une somme de sinusoïdes de fréquence $h.f$ (h : entier)

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sin(h\omega t + \varphi_h)$$

avec

Y_0 : la composante continue

h : rang de l'harmonique

ω : pulsation ($2\pi f$)

Y_h : amplitude de l'harmonique de rang h

Y_1 : la composante fondamentale

Le taux de distorsion harmonique (DHT pour Distorsion Harmonique Totale) donne une mesure de la déformation du signal :

$$\text{DHT}(\%) = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2}$$

Les courants et tensions harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées

au réseau de distribution. La distorsion harmonique (cf. **fig. 12**) est une forme de pollution du réseau électrique susceptible de poser des problèmes pour un taux supérieur à 5 %.

Les équipements d'électroniques de puissance (variateur de vitesse, onduleur, ...) sont les principales sources injectant des harmoniques dans le réseau. Le moteur, n'étant pas parfait, peut lui même être à l'origine d'harmonique de rang 3 ; dans le cas d'un couplage en triangle un rééquilibrage du flux peut alors apparaître générant un courant dans ses enroulements.

La présence d'harmoniques provoque, dans les moteurs, une augmentation des pertes par courants de Foucault d'où des échauffements supplémentaires. Ils peuvent également engendrer des couples pulsatoires (vibrations, fatigue mécanique), des nuisances sonores et limiter l'emploi des moteurs à pleine charge (cf. Cahiers Techniques Schneider Electric n° 199).

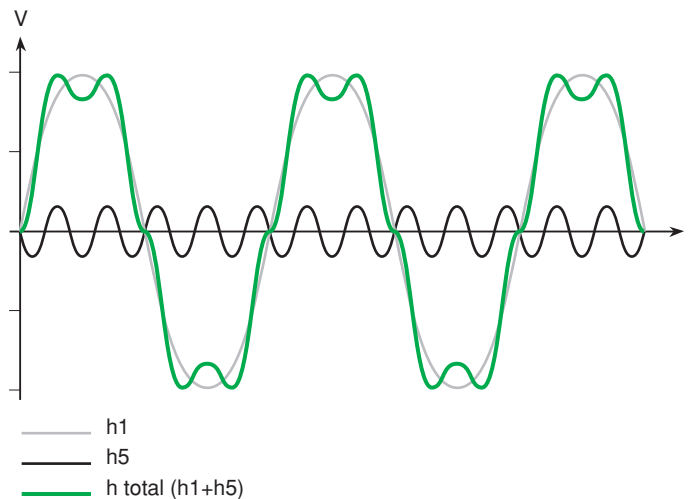


Fig. 12 : relevé d'une tension sinusoïdale comportant des harmoniques de rang 5.

3.3 Les défauts externes au moteur : phénomènes liés à l'exploitation du moteur

Démarrage du moteur : démarrage trop long et/ou trop fréquent

La phase de démarrage d'un moteur correspond à la durée qui lui est nécessaire pour atteindre sa vitesse de rotation nominale.

Le temps de démarrage (t_D) dépend du couple résistant (C_r) et du couple moteur (C_m). L'augmentation du couple résistant, lié à la charge à entraîner, ainsi que la diminution du couple

moteur, due à une baisse de la tension réseau (20 à 30 % de U_n), provoque l'augmentation du temps de démarrage du moteur :

$$t_D(s) = \frac{\pi}{30} J \frac{N}{C_m - C_r}$$

avec

J : moment d'inertie global des masses en mouvement,

$N(\text{tr.s}^{-1})$: vitesse de rotation du rotor.

Compte tenu de ses caractéristiques intrinsèques, chaque moteur ne peut supporter qu'un nombre limité de démarrages, généralement précisé par son fabricant (nombre de démarrages par heure).

De même, chaque moteur a un temps de démarrage maximal fonction de son courant de démarrage (cf. **fig. 13**).

Blocage du rotor

Le blocage d'un moteur, pour une cause mécanique, provoque une surintensité sensiblement égale au courant de démarrage. Mais l'échauffement qui en résulte est beaucoup plus important car les pertes dans le rotor sont maintenues à leur valeur maximale durant tout le blocage et la ventilation est supprimée si celle-ci est liée à la rotation du rotor. Les températures rotoriques peuvent devenir très importantes (350 °C).

Surcharge (ralentissement ou survitesse)

La surcharge d'un moteur est provoquée par une augmentation du couple résistant ou par une baisse de la tension réseau (> 10 % de U_n). L'augmentation du courant consommé par le moteur engendre un échauffement qui réduit sa durée de vie et peut lui être fatal à plus ou moins long terme.

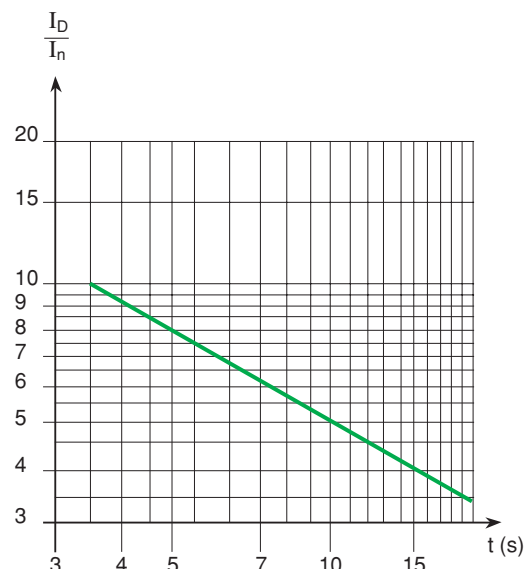


Fig. 13 : temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant de démarrage sur courant nominal.

3.4 Synthèse

La **figure 14** présente pour chaque type de défaut ses origines possibles, ses effets probables et les conséquences avérées. Dans tous les cas, deux protections sont

toujours nécessaires pour les moteurs :

- Protection contre les courts-circuits,
- Protection contre les surcharges (sur-échauffement).

Défauts	Origines	Effets	Conséquences sur le moteur
Court-circuit	■ Mise en contact de plusieurs phases, d'une phase et du neutre ou de plusieurs spires d'une même phase	■ Pointe de courant ■ Efforts électrodynamiques sur les conducteurs	Destruction des enroulements
Surtension	■ Foudre ■ Décharge électrostatique ■ Manœuvre	■ Claquage diélectrique au niveau des enroulements	Destruction des enroulements par perte d'isolation
Déséquilibre de tension	■ Ouverture d'une phase ■ Charge monophasé en amont du moteur	■ Diminution du couple utile ■ Augmentation des pertes	Sur-échauffement ⁽¹⁾
Baisse et creux de tension	■ Instabilité de la tension du réseau ■ Branchement de fortes charges	■ Diminution du couple utile ■ Augmentation des pertes	Sur-échauffement ⁽¹⁾
Harmoniques	■ Pollution du réseau par variateurs de vitesse, onduleurs, etc.	■ Diminution du couple utile ■ Augmentation des pertes	Sur-échauffement ⁽¹⁾
Démarrage trop long	■ Couple résistant trop important ■ Baisse de tension	Augmentation du temps de démarrage	Sur-échauffement ⁽¹⁾
Blocage	■ Problème mécanique	Surintensité	Sur-échauffement ⁽¹⁾
Surcharge	■ Augmentation du couple résistant ■ Baisse de tension	Augmentation du courant consommé	Sur-échauffement ⁽¹⁾

(1) Puis, à plus ou moins long terme, selon l'importance du défaut et/ou sa fréquence, court-circuit et destruction des enroulements.

Fig. 14 : synthèse des défauts possibles pour un moteur avec leurs origines, effets et conséquences.

4 Les fonctions de protection

4.1 Protection contre les courts-circuits

Généralités

Un court-circuit est une mise en relation directe de deux points qui sont à des potentiels électriques différents :

- en courant alternatif : liaison entre phases, entre phase et neutre, entre phase et masse conductrice ou entre spires d'une même phase,
- en courant continu : liaison entre les deux polarités ou entre une masse conductrice et la polarité qui en est isolée.

Diverses causes sont possibles : détérioration du vernis isolant des conducteurs, desserrage, rupture ou dénudage de fils ou de câbles, présence de corps métalliques étrangers, dépôts conducteurs (poussières, humidité, etc.), pénétration d'eau ou d'autres liquides conducteurs, détérioration du récepteur, erreur de câblage à la mise en route ou lors d'une intervention.

Un court-circuit se traduit par une augmentation brutale du courant qui peut atteindre en quelques millisecondes une valeur égale à plusieurs centaines de fois le courant d'emploi. Un court-circuit peut avoir des effets dévastateurs et provoquer des détériorations importantes sur le matériel. Il se caractérise par deux phénomènes :

- Un phénomène thermique qui correspond à la quantité d'énergie libérée dans le circuit électrique parcouru par le courant de court-circuit I durant un temps t selon la formule I^2t et exprimée en A^2s . Cet effet thermique peut provoquer :
 - fusion des contacts du contacteur,
 - destruction des éléments thermiques d'un relais à bilame si la coordination est de type I (cf. § La coordination),
 - génération d'arcs électriques,
 - calcination des matériaux isolants,
 - incendie dans l'équipement.
- Un phénomène électrodynamique qui se traduit entre les conducteurs par des efforts mécaniques intenses, provoqués par le passage du courant avec les manifestations suivantes :
 - déformation des conducteurs formant les enroulements du moteur,
 - casse des supports isolants des conducteurs,
 - répulsion des contacts (à l'intérieur des contacteurs) pouvant entraîner leur fusion et leur soudure.

De telles manifestations sont dangereuses à la fois pour les biens et pour les personnes. Il est donc impératif d'utiliser contre les courts-circuits des dispositifs de protection chargés de détecter le défaut, et d'interrompre le circuit très rapidement, si possible avant que le courant n'atteigne sa valeur maximale.

Pour cela deux dispositifs de protection sont communément employés :

- les fusibles (coupe-circuits) qui interrompent le circuit par leur fusion, laquelle nécessite ensuite leur remplacement,
- les disjoncteurs à déclencheur magnétique, souvent dénommés plus simplement « disjoncteurs magnétiques », qui interrompent automatiquement le circuit par ouverture de leurs pôles et dont la remise en service ne nécessite qu'une manœuvre de réenclenchement.

La protection contre les courts-circuits peut aussi être intégrée à des appareils à fonctions multiples tels que les disjoncteurs-moteurs et les contacteurs-disjoncteurs.

Définitions et caractéristiques

Les principales caractéristiques des protections contre les courts-circuits sont :

- Leur pouvoir de coupure : c'est la plus grande valeur du courant présumé de court-circuit qu'un appareil de protection peut interrompre sous une tension donnée.
- Leur pouvoir de fermeture : c'est la plus grande valeur du courant que l'appareil de protection peut établir sous sa tension nominale dans des conditions spécifiées. Le pouvoir de fermeture est égal à k fois le pouvoir de coupure selon le tableau de la **figure 15**.

Pouvoir de coupure (PC)	Cos φ	Pouvoir de fermeture (PF)
4,5 kA < PC < 6 kA	0,7	1,5 PC
6 kA < PC < 10 kA	0,5	1,7 PC
10 kA < PC < 20 kA	0,3	2 PC
20 kA < PC < 50 kA	0,25	2,1 PC
50 kA < PC	0,2	2,2 PC

Fig. 15 : pouvoirs de coupure et de fermeture, fixés par la norme CEI 60947-2 pour les disjoncteurs.

Les fusibles (coupe-circuits)

Les fusibles réalisent une protection phase par phase (unipolaire), avec un pouvoir de coupure important sous un faible volume. Ils assurent la limitation des I^2t et des contraintes électrodynamiques ($I_{crête}$).

Ils se montent :

- soit sur des supports spécifiques appelés porte-fusibles,
- soit dans des sectionneurs en remplacement des douilles ou des barrettes (cf. **fig. 16**).

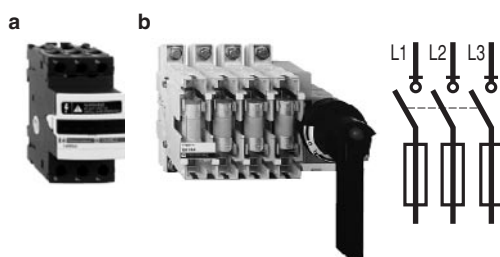


Fig. 16 : sectionneurs 32 et 125 A à fusibles [a] LS1-D32, [b] GS1-K4 - Telemecanique).

A noter que des cartouches fusibles munies d'un percuteur peuvent être associées à un dispositif de coupure omnipolaire (souvent le contacteur de commande du moteur) pour empêcher la marche en monophasé lors de leur fusion.

Pour la protection des moteurs, les fusibles utilisés sont ceux de type aM. Leur particularité est de laisser passer les surintensités du courant magnétisant à la mise sous tension des moteurs. De fait ils ne sont pas adaptés à la protection contre les surcharges (contrairement aux fusibles de type gG). C'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter un relais de surcharge dans le circuit d'alimentation des moteurs.

En général, leur calibre doit être immédiatement supérieur au courant de pleine charge du moteur à protéger.

Les disjoncteurs magnétiques

Ces disjoncteurs assurent, dans la limite de leur pouvoir de coupure et par l'intermédiaire de leurs déclencheurs magnétiques (un par phase), la protection des installations contre les courts-circuits (cf. **fig. 17**).

Les disjoncteurs magnétiques réalisent d'origine une coupure omnipolaire : le fonctionnement d'un seul déclencheur magnétique suffit à commander l'ouverture simultanée de tous les pôles. Pour des courants de court-circuit peu élevés, le fonctionnement des disjoncteurs est plus rapide que celui des fusibles.

Cette protection est conforme à la norme CEI 60947-2.

Pour interrompre efficacement un courant de court-circuit, trois impératifs doivent être respectés :

- détecter très tôt le courant de défaut,
- séparer très vite les contacts,
- interrompre le courant de court-circuit.

La plupart des disjoncteurs magnétiques pour protéger les moteurs sont limiteurs et contribuent ainsi à la coordination (cf. **fig. 18**). Leur durée de coupure particulièrement brève leur permet d'interrompre le courant de court-circuit avant qu'il n'atteigne son amplitude maximale. De fait les effets thermiques et électrodynamiques sont aussi limités, d'où une meilleure protection des câbles et de l'appareillage.

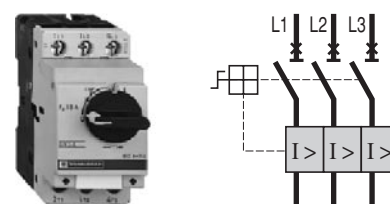


Fig. 17 : disjoncteur magnétique GV2-L (marque Telemecanique) et son symbole graphique.

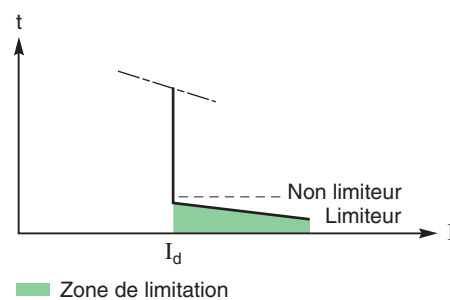


Fig. 18 : courbes de déclenchement des disjoncteurs magnétiques.

4.2 Protection contre les surcharges

Généralités

La surcharge est le défaut le plus fréquent sur les moteurs. Elle se manifeste par une augmentation du courant absorbé par le moteur et par des effets thermiques. La classe d'isolation détermine l'échauffement normal d'un moteur à une température ambiante de 40 °C.

Tout dépassement de la température limite de fonctionnement conduit à une réduction de la durée de vie par vieillissement prématuré des isolants.

Notons toutefois qu'une surcharge conduisant à un échauffement supérieur à la normale n'aura pas d'effets néfastes immédiats si elle est limitée

dans le temps et peu fréquente. Elle n'implique donc pas nécessairement un arrêt du moteur, mais il est important de revenir rapidement à des conditions de fonctionnement normales.

L'importance d'une bonne protection contre les surcharges est donc évidente :

- Elle préserve la durée de vie des moteurs en interdisant leur fonctionnement dans des conditions anormales d'échauffement,
- Elle assure la continuité d'exploitation en :
 - évitant des arrêts intempestifs des moteurs,
 - permettant, après déclenchement, un redémarrage dans les meilleures conditions de sécurité pour les hommes et les équipements.

Les conditions réelles d'emploi (température ambiante, altitude d'utilisation et service normalisé) sont essentielles pour déterminer les valeurs d'emploi du moteur (puissance, courant) et pour pouvoir choisir une protection efficace contre les surcharges (cf. **fig. 19**). Ces valeurs d'emploi sont fournies par le constructeur du moteur.

Selon le niveau de protection souhaité, la protection contre les surcharges peut-être réalisée par des relais :

- de surcharge, thermiques (bilames) ou électroniques, qui au minimum protègent les moteurs dans les deux cas suivants :
 - surcharge, par le contrôle du courant absorbé sur chacune des phases,
 - déséquilibre ou absence de phases, par leur dispositif différentiel.
- à sondes à thermistances CTP (à Coefficient de Température Positif),

- de sur-couple,
- multifonctions.

Rappel : Un relais de protection n'a pas de fonction de coupure. Il est destiné à commander l'ouverture d'un appareil de coupure, appareil qui doit avoir le pouvoir de coupure requis pour le courant de défaut à interrompre, en général un contacteur.

A cet effet, les relais de protection disposent d'un contact de défaut (NC) qui est à placer en série avec l'alimentation de la bobine du contacteur.

Les relais de surcharge (thermiques ou électroniques)

■ Généralités

Ces relais protègent les moteurs contre les surcharges, mais ils doivent admettre la surcharge temporaire due au démarrage, et ne déclencher que si le démarrage est anormalement long.

Selon les applications, la durée de démarrage des moteurs varie de quelques secondes (démarrage à vide, couple résistant peu élevé,...) à quelques dizaines de secondes (couple résistant important, forte inertie de la charge entraînée,...). Il est donc nécessaire de disposer de relais adaptés à la durée de démarrage. Pour répondre à ce besoin, la norme CEI 60947-4-1 définit plusieurs classes de relais de surcharge caractérisées chacune par leur temps de déclenchement (cf. **fig. 20** page suivante).

Altitude m	Température ambiante						
	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C
1000	1,07	1,04	1,00	0,96	0,92	0,87	0,82
1500	1,04	1,01	0,97	0,93	0,89	0,84	0,79
2000	1,01	0,98	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77
2500	0,97	0,95	0,91	0,87	0,84	0,79	0,75
3000	0,93	0,91	0,87	0,84	0,80	0,76	0,71
3500	0,89	0,86	0,83	0,80	0,76	0,72	0,68
4000	0,83	0,81	0,78	0,75	0,72	0,68	0,64

Les valeurs du tableau ci-dessus sont données à titre indicatif. En effet, le déclassement d'un moteur est fonction de sa taille, de sa classe d'isolation, du mode de construction (moteur auto ventilé ou moto ventilé, degré de protection IP 23, IP 44, etc.), et varie suivant les fabricants.

Nota : La valeur de puissance nominale qui apparaît généralement sur la plaque d'un moteur est définie par le constructeur pour un service continu S1 (fonctionnement à régime constant et d'une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique).

Il existe d'autres services normalisés, tel que le service temporaire S2, ou les services intermittents périodiques S3, S4, et S5 pour lesquels le constructeur d'un moteur définit, dans chaque cas, une puissance d'emploi différente de la puissance nominale.

Fig. 19 : coefficients de déclassement des moteurs selon leurs conditions d'emploi.

Classe	Temps de déclenchement à partir de l'état :				Tolérances plus étroites (bande E)
	Froid à $1,05 \times I_r$	Chaud à $1,2 \times I_r$	Chaud à $1,5 \times I_r$	Froid à $7,2 \times I_r$	
10 A	> 2 h	< 2 h	< 2 min	$2 \text{ s} < t_p < 10 \text{ s}$	-
10	> 2 h	< 2 h	< 4 min	$4 \text{ s} < t_p < 10 \text{ s}$	$5 \text{ s} < t_p < 10 \text{ s}$
20	> 2 h	< 2 h	< 8 min	$6 \text{ s} < t_p < 20 \text{ s}$	$10 \text{ s} < t_p < 20 \text{ s}$
30 ⁽¹⁾	> 2 h	< 2 h	< 12 min	$9 \text{ s} < t_p < 30 \text{ s}$	$20 \text{ s} < t_p < 30 \text{ s}$

(1) classe peu utilisée dans les pays européens mais d'un usage répandu aux Etats Unis.

Etat froid : état initial sans charge préalable

Etat chaud : équilibre thermique atteint à I_r

I_r : courant de réglage du relais de surcharge

Fig. 20 : principales classes de déclenchement des relais de surcharge selon la norme CEI 60947-4-1.

Le calibre du relais est à choisir en fonction du courant nominal du moteur et du temps de démarrage calculé.

Les limites d'utilisation sont également caractérisées par des courbes fonction du temps et de la valeur du courant de réglage (notée en multiple de I_r - cf. **fig. 21**).

Ces relais possèdent une mémoire thermique (sauf pour certains relais électroniques de surcharge, signalés par leurs constructeurs) et peuvent être connectés

- soit en série avec la charge,
- soit, pour les fortes puissances, à des transformateurs de courant placés en série avec la charge.

■ Les relais thermiques de surcharge à bilames (cf. **fig. 22**)

Ils assurent, par association avec un contacteur, la protection du moteur, de la ligne et de l'appareillage contre les surcharges faibles et prolongées. Ils sont donc conçus pour autoriser le démarrage normal des moteurs sans déclencher. Cependant, ils doivent être protégés contre les fortes surintensités par un disjoncteur, ou par des fusibles (voir protection contre les courts-circuits).

Le principe du fonctionnement d'un relais thermique de surcharge repose sur la déformation de ses bilames chauffés par le courant qui les traversent (cf. **fig. 23** ci-contre).

Au passage du courant les bilames se déforment et, suivant le réglage, provoquent l'ouverture brusque du contact du relais.

Le réarmement ne peut s'effectuer que lorsque les bilames sont suffisamment refroidis.

Les relais thermiques de surcharge sont utilisables en courant alternatif et continu, ils sont généralement :

- tripolaires,
- compensés, c'est-à-dire insensibles aux variations de la température ambiante (courbe de déclenchement identique de 0 à 40 °C selon un gabarit normatif - cf. **fig. 24** ci-contre),
- à réarmement manuel ou automatique,

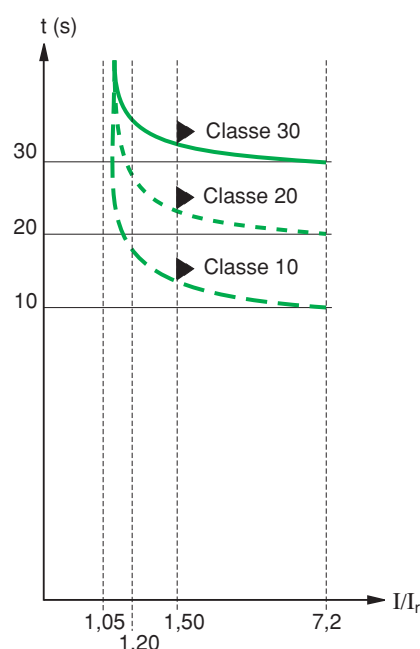


Fig. 21 : courbes de déclenchement des relais de surcharge.

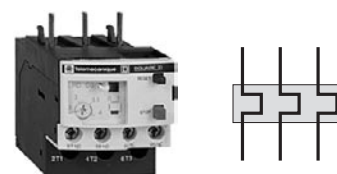


Fig. 22 : relais thermique de surcharge à bilames LRD (marque Telemecanique) et son symbole graphique.

- gradués en « ampères moteur » : affichage direct sur le relais du courant indiqué sur la plaque signalétique du moteur.

Ils peuvent également être sensibles à une perte de phase : c'est la notion de différentiel. Cette fonctionnalité évite la marche en monophasé du moteur, et répond aux conditions de la norme CEI 60947-4-1 et 60947-6-2 (cf. **fig. 25** page ci-contre).

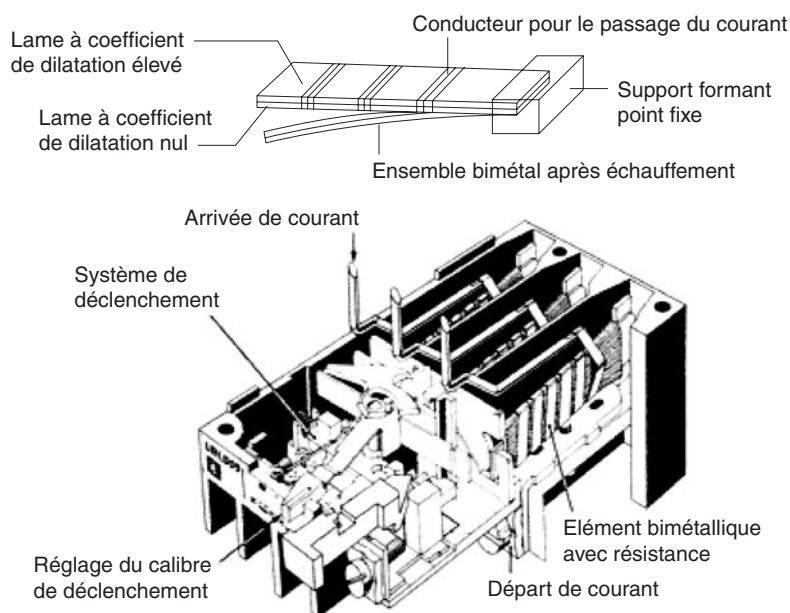


Fig. 23 : vue de l'intérieur d'un relais thermique de surcharge et détail d'un de ses bilames.

Couramment utilisé, ce relais offre une excellente fiabilité et son coût est faible. Il est particulièrement recommandé s'il existe un risque de blocage du rotor. Il présente cependant les inconvénients de ne pas tenir compte de manière très précise de l'état thermique du moteur à protéger et d'être sensible à l'environnement thermique de l'endroit où il est installé (ventilation d'armoire,...).

■ Les relais électroniques de surcharge (cf. fig. 26)

Ces relais bénéficient des avantages de l'électronique qui permet de créer une image thermique du moteur plus élaborée. A partir d'un modèle reconstituant les constantes de temps thermiques du moteur, l'électronique calcule en permanence la température du moteur en fonction du courant qui l'a traversé et des temps de fonctionnement. La protection approche donc mieux la réalité et peut éviter des déclenchements intempestifs. Les relais électroniques de surcharge sont moins sensibles à l'environnement thermique de l'endroit où ils sont installés.

Outre les fonctions classiques des relais de surcharge (protection des moteurs contre les surcharges, déséquilibres et absence de phase), les relais électroniques de surcharge peuvent être complétés par des options telles que :

- le contrôle de la température par sondes CTP,
- la protection contre les blocages, les surcouples,
- la protection contre les inversions de phases,
- la protection contre les défauts d'isolement,
- la protection contre la marche à vide,
- etc.

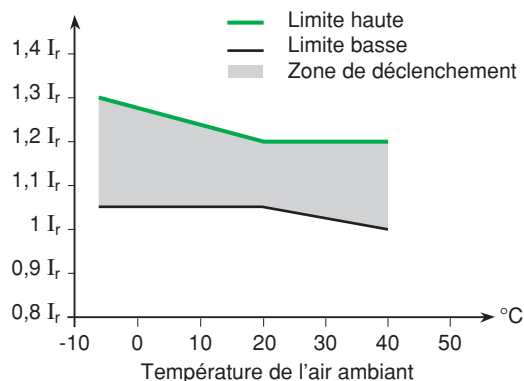


Fig. 24 : zone de déclenchement pour les relais de surcharge thermiques compensés selon la température de l'air ambiant (source IEC 60947-4-2 et 6-2).

Temps de déclenchement	Multiple de la valeur du courant de réglage
> 2 h	2 pôles : 1,0 I _r
	1 pôle : 0,9 I _r
< 2 h	2 pôles : 1,15 I _r
	1 pôle : 1,0 I _r

Fig. 25 : limite de fonctionnement d'un relais de surcharge thermique différentiel (sensible à une perte de phase).



Fig. 26 : relais électronique de surcharge (LR9F - Telemecanique).

Les relais à sondes à thermistance CTP

Ces relais de protection contrôlent la température réelle du moteur à protéger. Ils offrent une excellente précision de la mesure de la température : le volume réduit des sondes leur confère une inertie thermique très faible et donc un temps de réponse très court.

Avec le contrôle direct de la température des enroulements statoriques, ils peuvent être utilisés pour protéger les moteurs contre : surcharge, élévation de température ambiante, défaut du circuit de ventilation, fréquence de démarrages trop élevée, marche par à-coups, etc.

Ils comportent :

- Une ou plusieurs sondes à thermistance à Coefficient de Température Positif (CTP) placées au sein des bobinages des moteurs ou tout endroit susceptible de s'échauffer (paliers, roulements...).

Ce sont des composants statiques dont la résistance augmente brutalement quand la température atteint un seuil appelé Température Nominale de Fonctionnement (TNF) selon la courbe de la **figure 27**.

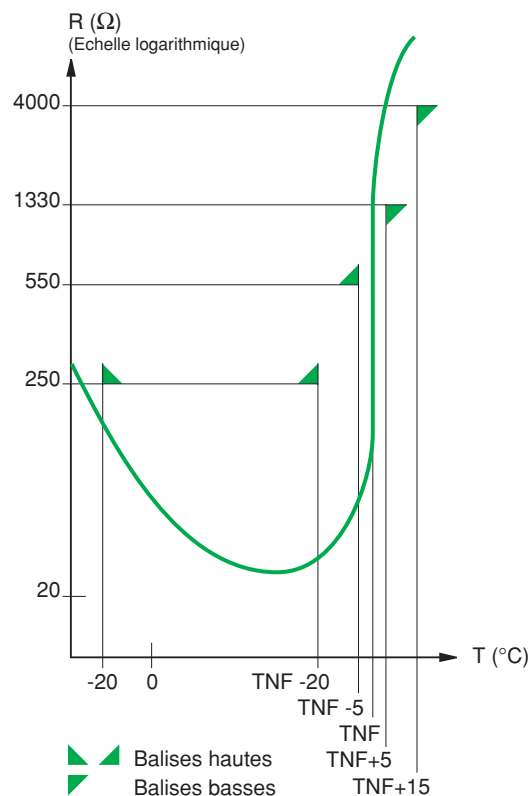


Fig. 27 : balises ou « points de fonctionnement » des sondes à thermistance CTP.

- Un dispositif électronique, alimenté en alternatif ou en courant continu, qui mesure en permanence la résistance des sondes qui lui sont associées. Lorsque la TNF est atteinte, le circuit à seuil détecte la brusque élévation de résistance de la sonde et commande alors le changement d'état des contacts de sortie. Selon les sondes choisies, ce mode de protection peut-être utilisé :
 - soit pour fournir une alarme sans arrêt de la machine (TNF inférieure à la température maximale prescrite pour l'élément à protéger),
 - soit pour commander l'arrêt (TNF correspondant à la température maximale prescrite). (cf. **fig. 28**).



Fig. 28 : dispositif électronique (LT3 - Telemecanique) à associer à trois sondes à thermistance, pour commander l'arrêt d'un moteur en dépassement de température.

L'emploi de ce mode de protection doit être prévu à l'avance car les sondes doivent être incorporées aux enroulements lors de la fabrication du moteur, ou lors d'un rebobinage éventuel après un incident. Le choix des sondes CTP à incorporer dépend de la classe d'isolation et de la structure du moteur. Ce choix est normalement fait par les constructeurs de moteurs ou les rembobineurs qui, seuls, possèdent les compétences nécessaires. Ces deux contraintes font que ce choix de protection via des sondes CTP est plutôt réservé à des équipements haut de gamme dont les moteurs sont d'un coût élevé.

Les relais de surcouple : une protection complémentaire (cf. fig. 29)

En complément d'une protection thermique par relais ou par sonde CTP, ils assurent une protection de la chaîne cinématique, en cas de blocage du rotor, de grippage ou d'à-coups mécaniques.



Fig. 29 : le relais de surcouple (LR97D - Telemecanique) est une protection complémentaire en cas de blocage du rotor, de grippage ou d'à-coups mécaniques.

Ces relais, contrairement à la majeure partie des relais de surcharge, ne possèdent pas de mémoire thermique. Ils ont une caractéristique de fonctionnement à temps défini (seuil de courant et temporisation réglables).

Le relais de surcouple peut être utilisé comme protection contre les surcharges pour les moteurs ayant des démarrages longs ou très fréquents (ex. palan).

Les relais multifonctions (cf. fig. 30)

Ces relais sont à même de protéger les moteurs des principales causes d'échauffement.



Fig. 30 : relais multifonction (LT6 - Telemecanique).

De plus la technologie électronique confère à ces relais des capacités de communication avec des automates et des superviseurs, via des bus de terrain.

Cette liaison avec un automate facilite la mise en œuvre et la maintenance :

Elle permet de paramétrer et d'activer les protections nécessaires, de configurer et de piloter la commande-moteur, de contrôler l'état du démarrage, des alarmes et des déclenchements. Elle permet d'échanger des données, des informations de mesure (courants, échauffements, etc.) avec le niveau supérieur d'automatisme (automate de gestion) et de pouvoir contrôler en permanence l'état thermique du moteur. Tout ceci facilite le diagnostic et l'application de mesures préventives.

Ces relais sont utilisés pour la protection isolée de moteurs « sensibles », c'est-à-dire ceux dont l'arrêt intempestif aurait des répercussions graves sur la protection des personnes, la sécurité, les pertes de production...

Le schéma ci dessous illustre les possibilités d'un relais multifonction connecté à un automate de supervision (cf. fig. 31)

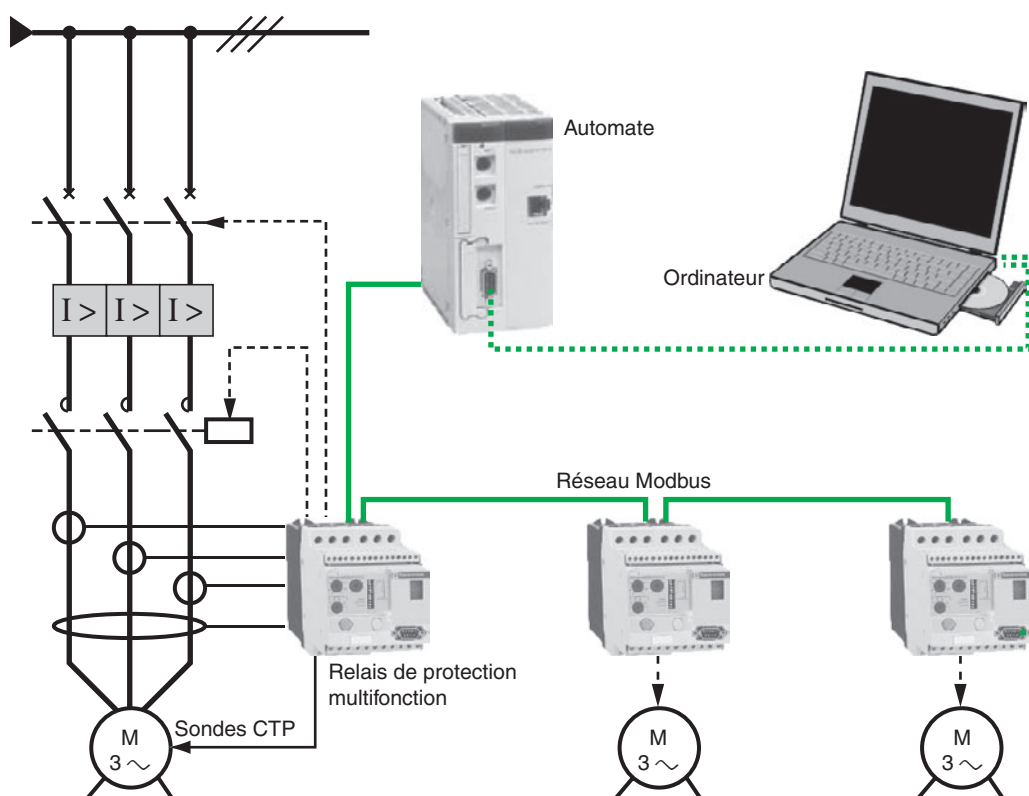


Fig. 31 : exemple d'un réseau de communication autour d'un relais multifonction (source Telemecanique).

4.3 Tableau de choix des relais de protection

Types de relais	Relais de surcharge (thermique ou électronique)	Relais à sondes CTP	Relais de surcouple	Relais multifonction
Causes d'échauffement :				
Surcharge				
Blocage rotor				
Défaut de phase				
Défaut de ventilation				Avec sondes CTP
Grippage d'un palier d'arbre				Avec sondes CTP
Démarrage trop long	Classe 20 ou 30			
Service sévère				Avec sondes CTP
A-coups de couple				Avec sondes CTP
Quelques références	LR2K, LRD, LR9D, LR9F	LT3	LR97D & LT47	LT6
Télémechanique	Tesys U : UC* Standard ou évolutive			UC* Multifonction

(*) UC : Unité de Contrôle
 Parfaitement adapté
 Solution possible
 Inadapté (pas de protection)

4.4 Les « disjoncteurs moteurs » (disjoncteurs magnétothermiques)

Généralités

Le « disjoncteur moteur » est un disjoncteur magnétothermique qui réalise à la fois la protection contre les courts-circuits et contre les surcharges par ouverture rapide du circuit en défaut. Il est la combinaison du disjoncteur magnétique (voir § protection contre les courts-circuits) et du relais de surcharge (voir § protection contre les surcharges). Il satisfait aux normes CEI 60947-2 et 60947-4-1 (cf. **fig. 32**).

Dans ces disjoncteurs, les dispositifs magnétiques (protection contre les courts-circuits) ont un seuil de déclenchement non réglable, en général d'environ 10 fois le courant de réglage maximal des déclencheurs thermiques.

Leurs éléments thermiques (protection contre les surcharges) sont compensés contre les variations de la température ambiante. Le seuil de protection thermique est quant à lui réglable en face avant du disjoncteur. Sa valeur doit correspondre au courant nominal du moteur à protéger.

Dans tous ces disjoncteurs, la coordination (type II) entre les éléments thermiques et la protection court-circuit est assurée par construction.

De plus, en position d'ouverture, la plupart de ces appareils ont une distance d'isolement suffisante (entre leurs contacts) pour réaliser la fonction de sectionnement. Ils intègrent également un dispositif de cadenassage nécessaire à la consignation

Courbes de déclenchements

Un disjoncteur moteur est caractérisé par sa courbe de déclenchement, qui représente les temps de déclenchement du disjoncteur en fonction du courant (multiple de I_n).

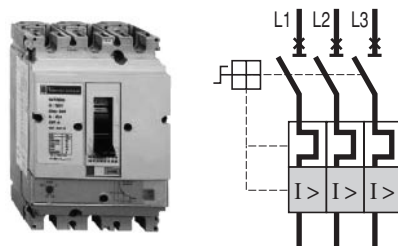


Fig. 32 : disjoncteur-moteur (GV7 - Telemecanique) et son symbole graphique.

Cette courbe comporte quatre zones (cf. fig. 33) :

- la zone de fonctionnement normal ① . Tant que $I < I_r$, il n'y a pas de déclenchement.
- la zone des surcharges thermiques ② . Le déclenchement est assuré par le « thermique » ; plus la surcharge est importante, plus le temps de déclenchement est court. Ce mode de déclenchement est ainsi appelé « à temps inverse » dans les normes.
- la zone des courants forts ③ , surveillée par le « magnétique instantané » ou « court-circuit » dont le fonctionnement est instantané (inférieur à 5 ms).
- et sur certains disjoncteurs (disjoncteurs électroniques), une zone intermédiaire ④ surveillée par un « magnétique temporisé » dont le fonctionnement est retardé (de 0 à 300 ms). Ce mode de déclenchement est appelé « à retard indépendant » dans les normes. Il permet d'éviter des déclenchements intempestifs à l'enclenchement sur les pointes de courants magnétisants des moteurs.

Leurs limites sont :

I_r : courant de réglage de la protection contre les surcharges, il doit correspondre à la valeur du courant nominal (I_n) du moteur à protéger.

I_m : courant de déclenchement de la protection magnétique temporisée.

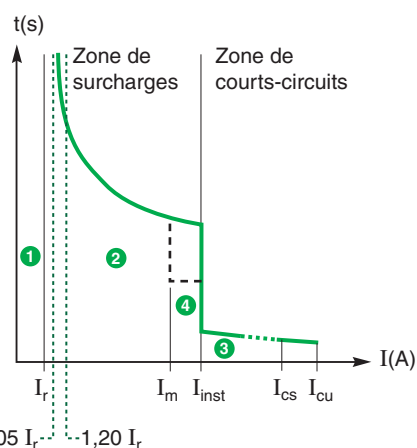


Fig. 33 : zones de fonctionnement d'un disjoncteur magnétothermique.

I_{inst} : courant de déclenchement de la protection magnétique instantanée. Il peut varier de 3 à 17 fois I_r mais est en général proche de $10 I_r$.

I_{cs} : pouvoir assigné de coupure de service en court-circuit

I_{cu} : pouvoir de coupure ultime (maximum) en court-circuit

5 Les départs-moteurs

5.1 Généralités

Un départ-moteur comprend quatre fonctions de base :

- Le sectionnement
- La protection contre les courts-circuits
- La protection contre les surcharges
- La commande (marche - arrêt).

Chaque départ-moteur peut être enrichi de fonctionnalités supplémentaires selon les

besoins de l'application. Elles concernent :

- La puissance : variation de la vitesse, démarrage progressif, inversion de phase...
- Le contrôle : contacts auxiliaires, temporisation, communication...

Selon la constitution d'un départ-moteur, les fonctions sont réparties de différentes manières dont la **figure 34** donne des schémas.

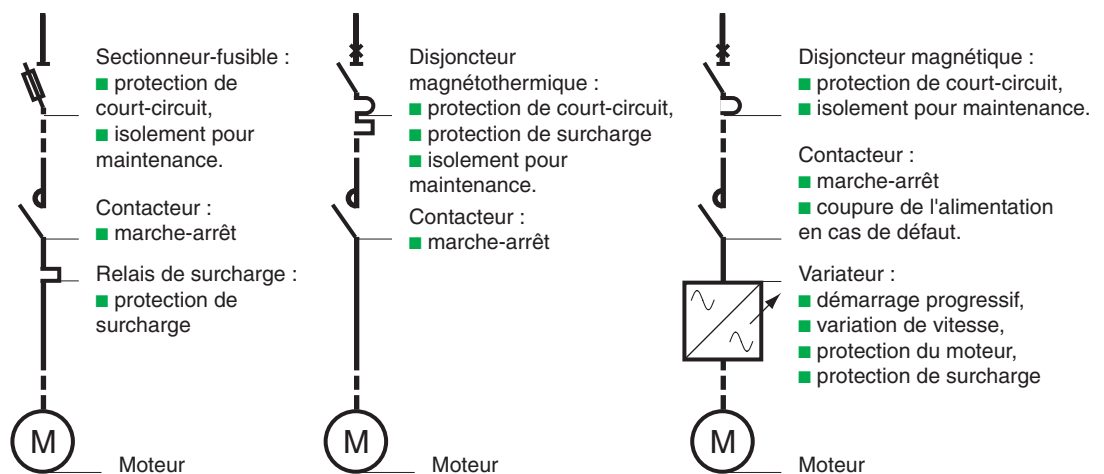


Fig. 34 : les différentes fonctions et leur association pour constituer un départ-moteur.

5.2 Les fonctions de base des départs-moteurs

Le sectionnement

La fonction de sectionnement est une obligation et doit se trouver à l'origine de tout circuit (Cf. normes d'installation NF C15-100, CEI 60364-5-53), non imposée mais préconisée au niveau de chaque départ moteur. Elle a pour rôle d'isoler les circuits de leur source d'énergie (réseau d'alimentation puissance) de manière sûre afin d'assurer la protection des biens et des personnes en cas d'opérations de maintenance, de dépannage ou de modification sur les circuits électriques qui se trouvent en aval.

Ce sectionnement doit être conçu conformément aux spécifications qui exigent :

- la coupure omnipolaire et simultanée,
- le respect des distances d'isolement en fonction des tensions d'alimentation,
- la condamnation,
- la coupure visible ou pleinement apparente :

□ la « coupure visible » signifie que l'ouverture des pôles est directement visible par un opérateur.

□ la coupure apparente est identifiée soit par la position de l'organe de manœuvre, soit par un indicateur de position qui, selon la norme, ne peut indiquer la position « hors tension » que si les contacts sont effectivement séparés par une distance suffisante spécifiée dans les normes. Les constructeurs proposent de nombreux appareils pouvant remplir cette fonction. Souvent, un même appareil combine les fonctions de sectionnement et de protection contre les courts-circuits (ex. : sectionneur à fusibles). Pour cela certains appareils de base doivent être complétés d'un dispositif complémentaire, par exemple, d'un support d'embrochage.

Rappel : Un sectionneur est destiné à isoler un circuit, il n'a ni pouvoir de coupure ni de fermeture. Il se manipule donc toujours à vide.

La protection contre les courts-circuits

Cette fonction nécessite la détection des surintensités consécutives aux courts-circuits (généralement supérieures à 10 fois le courant nominal) et l'ouverture du circuit en défaut. Elle est remplie par des fusibles ou des disjoncteurs magnétiques.

La protection contre les surcharges

Cette fonction nécessite la détection des surintensités consécutives aux surcharges ($I_r < I_{\text{surcharges}} < I_m$) et l'ouverture du circuit en défaut. Elle est remplie par des dispositifs électromécaniques ou électroniques (relais de surcharge) associés à un organe de coupure (disjoncteur ou contacteur) ou intégrée aux démarreurs ou variateurs de vitesse électroniques. Elle protège aussi la ligne du moteur contre les surcharges thermiques.

La commande

Par « commander » il faut comprendre fermer (établir) et ouvrir (interrompre) un circuit électrique en charge. La fonction commande est réalisée par les interrupteurs ou même par les disjoncteurs-moteurs, démarreurs et variateurs de vitesse. Mais le contacteur est le produit le plus utilisé pour réaliser cette fonction car il permet la commande à distance (télécommande). Pour les moteurs, cet organe de commande doit permettre un grand nombre de manœuvres (durabilité électrique) et être conforme aux normes CEI 60947-4-1. Selon ces normes, sur ce matériel, les constructeurs doivent préciser les caractéristiques suivantes :

■ Circuit de commande

- Nature du courant de commande ainsi que sa fréquence dans le cas du courant alternatif,
- Tension assignée des circuits de commande (U_c) ou tension d'alimentation de commande (U_s).

■ Circuit de puissance

- Tension assignée d'emploi (U_e) : elle s'exprime généralement par la tension entre phases. Elle détermine l'emploi des circuits auquel se rapportent les pouvoirs de fermeture et de coupure, le type de service et les caractéristiques de démarrage.
- Courant assigné d'emploi (I_e) ou puissance assignée d'emploi : Cette caractéristique est définie par le constructeur selon des conditions d'emploi spécifiées et tient compte notamment de la tension assignée d'emploi et du courant thermique conventionnel (I_{th} correspond à la valeur maximale du courant d'essai : $I_{th} \geq I_e$). Dans le cas de matériels pour la commande directe d'un seul moteur, l'indication d'un courant assigné d'emploi peut être remplacée ou complétée par celle de la puissance maximale disponible assignée.

Ces informations sont parfois complétées par :

- le service assigné, avec indication de la classe de service intermittent, s'il y a lieu. Les classes définissent différents cycles de manœuvres.
- les pouvoirs assignés de fermeture et/ou de coupure. Ce sont des valeurs maximales de courant, fixées par le constructeur, qu'un matériel peut établir (fermeture) ou interrompre (coupure) de manière satisfaisante dans des conditions spécifiées. Les pouvoirs assignés de fermeture et de coupure ne sont pas forcément spécifiés par le constructeur mais la norme exige des valeurs minimales pour chaque catégorie d'emploi.

■ Les normes de la série CEI 60947 définissent des catégories d'emploi selon les applications auxquelles les appareils de commande sont destinés (cf. **fig. 35**). Chaque catégorie est caractérisée par une ou plusieurs conditions de service telles que :

- des courants,
- des tensions,
- le facteur de puissance ou constante de temps,
- et si nécessaire, d'autres conditions de service.

Nature du courant	Catégories d'emploi	Applications caractéristiques
Courant alternatif	AC-1	Charges non inductives ou faiblement inductives, fours à résistances. Distribution d'énergie (éclairage, groupe électrogène...)
	AC-2	Moteurs à bagues : démarrage, coupure. Equipement à service intensif (levage, manutention, broyeurs, train de laminoir...)
	AC-3	Moteurs à cage : démarrage, coupure des moteurs lancés ⁽¹⁾ . Commande moteur (pompes, compresseurs, ventilateurs, machine outils, transporteurs, presses...)
	AC-4	Moteurs à cage : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups. Equipement à service intensif (levage, manutention, broyeurs, train de laminoir...)
Courant continu	DC-1	Charges non inductives ou faiblement inductives, fours à résistances.
	DC-3	Moteurs shunt : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups Coupure dynamique de moteurs pour courant continu.
	DC-5	Moteurs série : démarrage, inversion de marche, marche par à-coups Coupure dynamique de moteurs pour courant continu.

(1) La catégorie AC-3 peut être utilisée pour des marches par à-coups ou des inversions de marche de manœuvres occasionnelles de durée limitée, telles que le montage d'une machine; le nombre de ces manœuvres pendant ces durées limitées ne dépasse pas normalement cinq manœuvres par minute ni plus de dix pour une durée de 10 min.

Fig. 35 : les différentes catégories d'emploi des contacteurs, selon leurs applications - CEI 60947-1.

Sont ainsi prises en compte, par exemple :

- les conditions d'établissement et de coupure de courant,
 - la nature du récepteur contrôlé (moteur à cage, moteur à bagues, résistance),
 - des conditions dans lesquelles s'effectuent les fermetures et les ouvertures (moteur lancé, moteur calé, en cours de démarrage, freinage en contre-courant,...).
- Choisir un contacteur :

Les catégories d'emploi définies dans la norme permettent une première sélection d'un matériel à même de répondre aux exigences de l'application à laquelle est destiné le moteur.

Cependant d'autres contraintes sont à prendre en compte, contraintes qui ne sont pas toutes caractérisées par la norme. Il en est ainsi des facteurs extérieurs à l'application : conditions climatiques (température, humidité), situation géographique (altitude, bord de mer), etc.

Dans certaines situations, la fiabilité de l'équipement peut aussi être un facteur critique, notamment lorsque la maintenance est difficile. L'endurance électrique (durabilité des contacts) des appareils (contacteur) est alors une caractéristique importante.

Il est alors nécessaire de disposer de catalogues complets et précis pour vérifier que tous ces impératifs sont respectés par le matériel retenu.

5.3 Cas particulier des démarreurs et variateurs de vitesse électroniques

Le démarrage en direct sur le réseau de distribution des moteurs asynchrones est la solution la plus répandue, la plus économique et convient le plus souvent pour une grande variété de machines. Cependant, elle s'accompagne parfois de contraintes qui peuvent s'avérer gênantes pour certaines applications, voire incompatibles avec le fonctionnement souhaité au niveau de la machine (appel de courant au démarrage, à-coups mécaniques lors des démarrages, impossibilité de contrôler l'accélération et la décélération ou de faire varier la vitesse...). Les démarreurs et les variateurs de vitesse électroniques (cf. **fig. 36**) permettent de supprimer ces inconvénients, mais les protections conventionnelles décrites auparavant sont inefficaces avec ces appareils qui modulent l'énergie électrique fournie au moteur.



Fig. 36 : variateur de vitesse (ATV58H - Telemecanique).

Les variateurs de vitesse et les démarreurs électroniques ont donc des protections intégrées. Les variateurs modernes assurent en général la protection de surcharge des moteurs et leur propre protection. A partir de la mesure du courant et d'une information sur la vitesse, un microprocesseur calcule l'élévation de température du moteur et fournit un signal d'alarme ou de déclenchement en cas d'échauffement excessif. Les variateurs, et notamment les convertisseurs de fréquence, sont d'autre part fréquemment équipés de protections contre :

- les courts-circuits entre phases et entre phase et terre,
- les surtensions et les chutes de tension,
- les déséquilibres de phases,
- la marche en monophasé

De plus, les informations élaborées par la protection thermique incorporée au variateur peuvent être échangées avec un automate ou un superviseur par la liaison de communication dont sont munis les variateurs et démarreurs les plus évolués.

Pour plus d'informations sur les « Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques » veuillez vous reporter au Cahier Technique Schneider Electric n° 208.

5.4 Une fonction complémentaire : la communication

La communication est une fonction devenue quasiment incontournable dans les processus et systèmes de production industriels. Elle permet à distance de contrôler, interroger différents organes, et piloter les machines d'un système de production.

La communication industrielle par réseau se décompose en cinq niveaux représentés par un triangle suivant le concept CIM -Computer integrated Manufacturing- (cf. **fig. 37** ci-contre).

Pour une telle communication, aussi globale,

entre tous les éléments d'un système de production, des composants ou modules communicants (cf. **fig. 38** ci-contre) sont intégrés dans bon nombre d'appareils y compris des appareils de protection tels que des relais multifonctions ou encore des départs-moteurs.

Avec des modules de communication tels que AS-i, Modbus, Profibus..., outre le pilotage d'un moteur (télécommande marche-arrêt du démarreur-moteur), il est par exemple possible

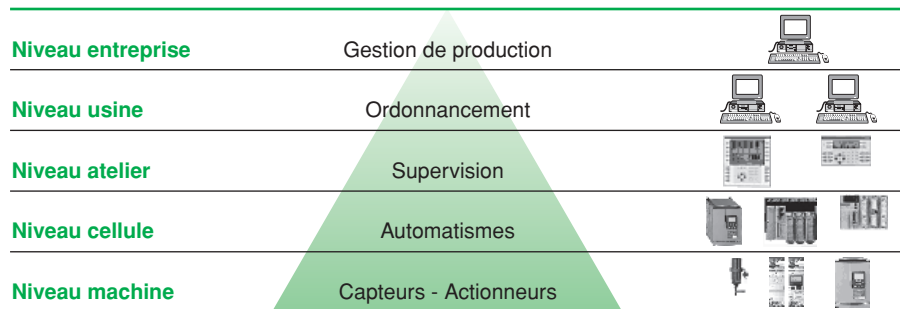


Fig. 37 : les cinq niveaux de la communication industrielle.

de connaître, à distance, la charge du moteur (mesure du courant), et/ou les défauts existants (surintensités, surcharges...) ou passés (historique). L'utilisation de la communication, en plus d'être utile pour l'intégration des protections dans les processus d'automatismes industriels, permet d'anticiper d'éventuelles pannes (pré-alarme,...) réduisant ainsi les temps de non productivité et assurant la continuité de service. Elle concourt donc à l'amélioration de la gestion des équipements avec une conséquence positive sur les résultats économiques.

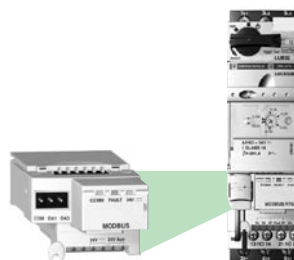


Fig. 38 : le démarreur contrôleur avec son module de communication Modbus (Tesy U - Telemecanique).

5.5 Départs-moteurs et coordination

Les solutions départs-moteurs

Comme expliqué en début de chapitre, les principales fonctions que doit assurer un départ-moteur (sectionnement, commande et protection contre les courts-circuits et les surcharges), peuvent être réalisées par différents équipements. Trois associations d'appareils sont possibles (cf. fig. 39) pour qu'un départ moteur remplisse bien toutes ces fonctions, mais elles nécessitent la compatibilité entre les caractéristiques de chacun des appareils associés.

■ La solution « tout en Un »

Un seul et même appareil réunit les trois fonctions, ses performances globales sont garanties par son constructeur. Pour l'utilisateur, du bureau d'étude à l'installation, c'est la solution la plus simple : facile à mettre en œuvre (peu de câblage) et choix immédiat (pas d'étude particulière).

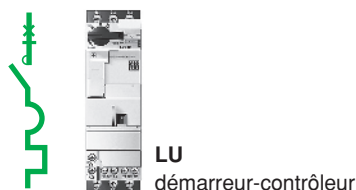
■ La solution « 2 appareils »

Disjoncteur magnétothermique + contacteur. La compatibilité entre les caractéristiques des deux appareils est à vérifier par l'utilisateur.

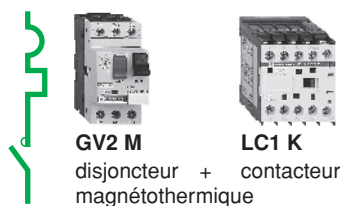
■ La solution « 3 appareils »

Disjoncteur magnétique + contacteur + relais de surcharge
Elle permet de couvrir un large domaine de puissance. Cette association nécessite une étude de compatibilité pour le choix des appareils et d'implantation pour leur montage sur châssis ou dans une enveloppe.

Solution "1 produit"



Solution "2 produits"



Solution "3 produits"

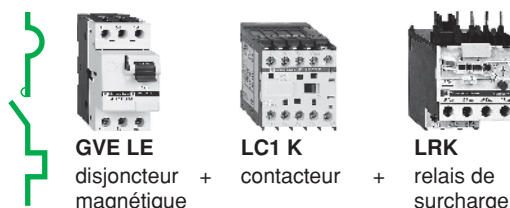


Fig. 39 : les trois associations possibles d'appareils pour réaliser un départ-moteur.

Ce travail (compatibilité, choix et implantation) n'est pas toujours évident pour les utilisateurs car il faut réunir les caractéristiques des différents appareils et savoir les comparer. C'est pourquoi les constructeurs étudient puis proposent dans leurs catalogues des associations d'appareils. Dans la même démarche ils s'efforcent de trouver des combinaisons optimales entre les protections : c'est la notion de coordination.

La coordination entre les protections et la commande

Cette coordination, est la combinaison optimale des différentes protections (contre les courts-circuits et les surcharges) et de l'organe de commande (contacteur) qui composent un départ-moteur.

Étudiée pour une puissance donnée, elle permet de protéger au mieux les équipements commandés par ce départ-moteur (cf. fig. 40).

Elle présente le double avantage de réduire les coûts d'équipement et de maintenance puisque les différentes protections se complètent le plus exactement possible, sans redondance inutile.

■ Différents types de coordination existent

Deux types de coordination (type 1 et type 2) sont définis par la CEI 60947-4-1.

□ **Coordination type 1** : c'est la solution standard, la plus utilisée. Elle exige qu'en condition de court-circuit, le contacteur ou le démarreur n'occasionne pas de danger aux personnes ou aux installations. Elle accepte que des réparations ou remplacements de pièces soient nécessaires avant la remise en service.

□ **Coordination type 2** : c'est la solution haute performance ; elle exige qu'en condition de

court-circuit, le contacteur ou le démarreur n'occasionne pas de danger aux personnes ou aux installations et qu'il soit en mesure de fonctionner ensuite. Le risque de soudure des contacts est admis ; dans ce cas, le constructeur doit indiquer les mesures à prendre en ce qui concerne la maintenance du matériel.

□ Il existe une solution très haute performance, réalisée par les ACP et proposée par quelques constructeurs, c'est la « **Coordination totale** ».

Cette coordination exige qu'en condition de court-circuit, le contacteur ou le démarreur n'occasionne pas de danger aux personnes ou aux installations et qu'il soit en mesure de fonctionner ensuite. Le risque de soudure des contacts n'est pas admis ; le redémarrage du départ-moteur doit pouvoir être immédiat.

■ Quelle coordination choisir ?

Le choix du type de coordination dépend des paramètres d'exploitation.

Il doit être fait de façon à obtenir l'adéquation besoin de l'utilisateur / coût de l'installation optimisée :

□ Type 1

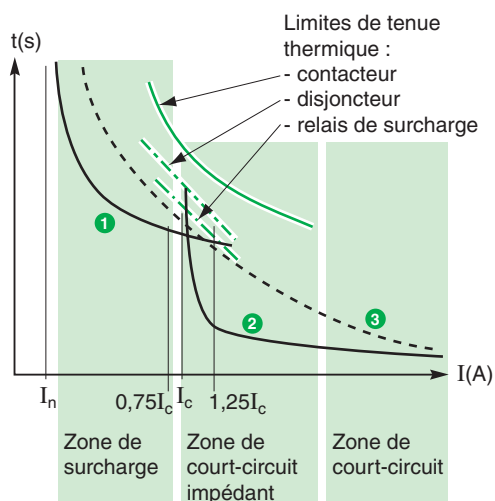
Acceptable lorsque la continuité de service n'est pas exigée et que la remise en service peut se faire après remplacement des éléments défectueux.

Dans ce cas, le service entretien doit être efficace (disponible et compétent).

L'avantage est un coût d'appareillage réduit.

□ Type 2

A retenir lorsque la continuité de service est exigée. Il nécessite un service d'entretien réduit.



Courbes de déclenchement :

- ① relais de surcharge
- ② déclencheur magnétique
- ③ fusible

Pour le bon fonctionnement d'un départ-moteur, la coordination entre tous les appareils doit valider simultanément les points suivants :

- le relais de surcharge doit protéger le disjoncteur magnétique dans la zone de surcharge : sa courbe "1" doit passer en dessous de celle de la tenue thermique du disjoncteur ;
- et inversement dans les zones de court-circuit, pour protéger le relais thermique, la courbe de déclenchement aux courts-circuits doit passer en dessous de celle de la tenue thermique du relais ;
- enfin, pour que le contacteur soit protégé, sa limite de tenue thermique doit être au-dessus des courbes des deux déclencheurs thermique "1" et magnétique "2" (ou fusible "3").

A noter que la norme fixe des courants limites d'essai :

- jusqu'à $0,75 I_c$ seule la protection thermique doit intervenir ;
- à partir de $1,25 I_c$ seule la protection contre les courts-circuits doit intervenir.

Fig. 40 : les principes de la coordination.

□ Lorsque le redémarrage immédiat du moteur est nécessaire, la « **Coordination totale** » doit être retenue.
Aucun service d'entretien n'est nécessaire.

Les coordinations proposées dans les catalogues des constructeurs simplifient le choix de l'utilisateur et lui assure la conformité de son départ-moteur vis-à-vis de la norme.

5.6 Les Appareils de connexion de Commande et de Protection (ACP)

Les ACP ou « démarreurs-contrôleurs » sont conçus pour remplir simultanément les fonctions de commande et de protection (surcharge et court-circuit), de plus ils sont prévus pour pouvoir réaliser des commandes en condition de court-circuit.

Ils peuvent aussi assurer des fonctions complémentaires telles que le sectionnement permettant ainsi de remplir complètement la fonction de « départ-moteur ». Ils répondent à la norme CEI 60947-6-2, qui définit notamment les valeurs assignées et les catégories d'emploi des ACP, à l'image des normes CEI 60947-1 et 60947-4-1.

Les différentes fonctions réalisées par un ACP sont associées et coordonnées de manière à permettre la continuité de service à tous les courants jusqu'au pouvoir assigné de coupure de service en court-circuit Ics de l'ACP. Ce dernier peut ou non comporter un seul appareil, mais ses caractéristiques sont toujours assignées comme pour un seul appareil. De plus, la garantie d'une coordination « totale » entre toutes les fonctions assure à l'utilisateur le choix simple d'une protection optimale facile à mettre en œuvre.

Bien que présenté sous la forme d'un seul appareil, un ACP peut offrir une modularité identique voire supérieure à une solution départ-moteur « trois produits ». C'est le cas du démarreur-contrôleur « Tesys U » de la marque Télémécanique (cf. **fig. 41**). Ce dernier permet d'introduire ou de changer à tout moment une

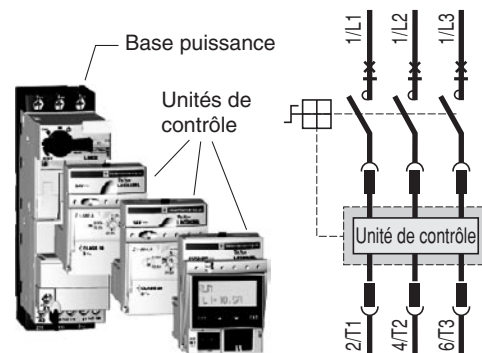


Fig. 41 : exemple de modularité d'un ACP (démarreur contrôleur Tesys U - Telemecanique).

unité de contrôle intégrant les fonctions de protection et de commande pour des moteurs de 0,15 A jusqu'à 32 A, dans une « base puissance » ou « embase » générique de calibre 32 A (cf. **fig. 42**).

Des fonctionnalités supplémentaires peuvent également être implantées au niveau :

- de la puissance : bloc inverseur, limiteur ;
- du contrôle :
 - modules fonctions : alarmes, charge moteur, réarmement automatique, ...
 - modules de communication : AS-i, Modbus, Profibus, CAN-Open, ...
 - modules de contacts auxiliaires, contacts additifs.

Fonctions possibles	Unités de contrôle :		
	Standard	Evolutives	Multifonctions
Etats du démarreur (prêt, en marche, en défaut)			
Alarmes (surtensions...)			
Alarme thermique			
Réarmement à distance par le bus			
Indication de la charge moteur			
Différenciation des défauts			
Paramétrage et consultation des fonctions de protection			
Fonction « historique »			
Fonction « surveillance »			
Commandes de Marche et d'Arrêt			

■ Informations véhiculées par le bus (Modbus) et fonctions réalisées

Fig. 42 : exemple de fonctions dont le choix est possible avec un système modulaire (démarreur contrôleur Tesys U - Telemecanique).

5.7 La sélectivité

Dans une installation électrique, les récepteurs sont reliés aux générateurs à travers une succession de dispositifs de sectionnement, protection et commande.

Sans une étude de sélectivité bien mise en œuvre, un défaut électrique risque de solliciter plusieurs dispositifs de protection. Ainsi un seul défaut provoque la mise hors tension d'une partie plus ou moins grande de l'installation. Il en résulte une perte supplémentaire de disponibilité de l'énergie électrique sur des départs sains.

Pour éviter cette perte, dans le cadre d'une distribution radiale (cf. **fig. 43**), le but de la sélectivité est de déconnecter du réseau le départ ou moteur en défaut et seulement celui-ci, en maintenant sous tension la plus grande partie possible de l'installation. La sélectivité permet ainsi d'allier sécurité et continuité de service. De plus elle facilite la localisation du défaut.

Pour garantir une continuité de service maximale, il est nécessaire d'employer des dispositifs de protection coordonnés entre eux. Pour cela différentes techniques sont utilisées qui permettent d'obtenir soit une sélectivité dite

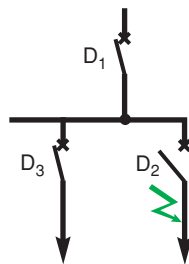


Fig. 43 : la sélectivité entre deux disjoncteurs D_1 et D_2 placés en série et parcourus par le même courant de défaut, exige que seul le disjoncteur D_2 placé en aval de D_1 s'ouvre.

5.8 Exemple

L'objectif est de sélectionner un départ-moteur pour la protection et la commande d'une pompe de relevage, avec un impératif de continuité de service.

Caractéristiques techniques du moteur à protéger

- Moteur asynchrone triphasé,
- Puissance : 4 kW sous 400 V, 50 Hz, et un courant nominal : $I_n \approx 8,1$ A,
- Catégorie d'emploi AC-3,
- Démarrage normal (pas de temps de démarrage spécifique),
- Courant de court-circuit de l'installation calculé au niveau de l'équipement : $I_{cc} = 35$ kA,

totale si elle est garantie pour toutes valeurs du courant de défaut jusqu'à la valeur maximale disponible dans l'installation, soit dite partielle dans le cas contraire.

Les différentes techniques de sélectivité

Il existe plusieurs types de sélectivité :

- ampèremétrique, en utilisant un écart entre les seuils de déclenchement des disjoncteurs placés en série,

- chronométrique, en retardant de quelques dizaines ou centaines de millisecondes le déclenchement du disjoncteur amont, ou encore en exploitant les caractéristiques normales de fonctionnement liées aux calibres des appareils. Ainsi la sélectivité peut-être assurée entre deux relais de surcharge en respectant la condition $I_{r1} > 1,6 \cdot I_{r2}$ (avec $r1$ en amont de $r2$).

- « Sellim » ou « énergétique », dans le domaine de la distribution électrique, en plaçant en amont un disjoncteur limiteur qui s'ouvre pendant le temps nécessaire au fonctionnement du disjoncteur aval, puis se referme.

- logique, en communiquant d'un disjoncteur à l'autre l'information de dépassement de seuil et laissant la possibilité d'ouverture au disjoncteur le plus en aval.

Pour plus d'information sur la sélectivité, voir le Cahier Technique Schneider-Electric n° 167.

La sélectivité dans les process

Pour les équipements de commande de process (chaînes de fabrication, unités de production chimiques...), les techniques de sélectivité les plus employées entre les départs-moteurs et la distribution électrique alimentant ces process sont généralement du type ampèremétrique et chronométrique. Dans la plupart des cas, la sélectivité est assurée grâce au pouvoir limiteur ou ultra-limiteur des départs-moteurs.

- Tension de commande : 230 V.

Caractéristiques limites nécessaires

Les conditions d'utilisations conduisent au choix suivant :

- pour la protection contre les courts-circuits, et afin de satisfaire la continuité de service demandée, un disjoncteur magnétique doit être prévu, avec un pouvoir de coupure supérieur au I_{cc} calculé ici à 35 kA. Le courant d'emploi du disjoncteur magnétique, pour admettre en continu le passage du courant nominal, doit être supérieur à $I_n = 8,1$ A.

- pour la protection contre les surcharges, le démarrage étant normal, le relais sera de classe

10 ou 10 A. avec un courant de réglage I_r de 8,1 A ou légèrement plus.

■ un contacteur ayant un courant d'emploi supérieur à 8,1 A. Sa bobine de commande doit être alimentée en 230 V CA.

La continuité de service étant impérative, la coordination de type II ou totale des appareils de protection est nécessaire.

Les solutions matérielles

La sélection des matériels réunissant toutes ces caractéristiques peut être délicate, surtout lorsqu'il faut associer des appareils de différents fabricants. Mais la plupart des constructeurs présentent dans leurs catalogues des gammes de départs-moteurs accompagnés de tableaux d'associations testées facilitant ainsi le choix. (cf. **fig. 44**).

Démarrers directs avec disjoncteur et relais thermique - Solution « 3 produits » en coordination type 2

	Puissances normalisées des moteurs triphasés 50/60 Hz en catégorie AC-3									Disjoncteur		Contacteur	Relais de protection thermique		
	400/415 V			440 V			500 V			Ref.	Calibre I _{rm} (1)	Ref.(2)	Ref.	Domaine de réglage	
	P	I _e	I _q	P	I _e	I _q	P	I _e	I _q		A	A		A	
GV2 L	0,08	0,22	130	0,06	0,19	130	-	-	-	GV2 L03 ou LE03	0,4	5	LC1 D09	LRD 02	0,16...0,25
	0,09	0,36	130	0,09	0,28	130	-	-	-		0,4	5			
LC1 D	0,12	0,42	130	-	-	-	-	-	-	GV2 L04 ou LE04	0,63	8	LC1 D09	LRD 04	0,4...0,63
	0,18	0,6	130	0,18	0,55	130	-	-	-						
LR D	3	6,5	130	-	-	-	-	-	-	GV2 L14 ou LE14	10	10	LC1 D09	LRD 12	5,5...8
	-	-	-	-	-	-	4	6,5	10	GV2 LE14	10	138	LC1 D12	LRD 12	5,5...8
	-	-	-	-	-	-	4	6,5	50	GV2 L14	10	138	LC1 D12	LRD 12	5,5...8
	4	8,4	130	-	-	-	-	-	-	GV2 L14 ou LE14	10	138	LC1 D09	LRD 14	7...10

Solution : **GV2 L14 + LC1 D09 + LRD 14**

Démarrers contrôleur Tesys U - Solution « 1 produit » en coordination Totale

- Basse Puissance

Pouvoir assigné de coupure de service en court-circuit (I_{cs})

Volts	230	440	500	690
kA	50	50	10	4

Nota : Pour des valeurs supérieures, utiliser les limiteurs. En 690 V, utiliser le séparateur de phases LU9 SP0.

Raccordement	Calibre			Ref
Puissance	≤ 440 V	500 V	690 V	
Contrôle	A	A	A	
Vis-étriers	12	12	9	LUB 12
	32	23	21	LUB 32

- Unités de contrôle

Puissances maximales normalisées des moteurs monophasés/triphasés 50/60 Hz			Plage de réglage	Encliquetage sur base puissance calibre	Ref à compléter par le repère de la tension
400/415 V	500 V	690 V	A	A	
kW	kW	kW			

Contrôle évolutif - Une action sur le bouton Test en face avant simule un déclenchement sur surcharge thermique

Classe 10 pour moteurs triphasés

0,09	-	-	0,15...0,6	12 et 32	LUCB X6●●
0,25	-	-	0,35...1,4	12 et 32	LUCB 1X●●
1,5	2,2	3	1,25...5	12 et 32	LUCB 05●●
5,5	5,5	9	3...12	12 et 32	LUCB 12●●
7,5	9	15	4,5...18	32	LUCB 18●●
15	15	18,5	8...32	32	LUCB 32●●

Tensions du circuit de commande existantes

Volts	24	48...72	110...240
---	BL		
~	B		
---	ou ~	ES	FU

Solution : **LUB12 + LUCB 12 FU**

Fig. 44 : deux solutions offrant la garantie d'une bonne coordination entre les différentes fonctions d'un départ-moteur, (source Telemecanique).

6 Conclusion

Au sein de toute installation comportant des moteurs électriques, différents types de défauts peuvent se produire. Mais qu'ils soient d'origine interne aux moteurs (court-circuit entre phases, ...), liés à l'exploitation du moteur (blocage rotor, démarrage long, ...) ou liés à l'alimentation électrique (surtension, déséquilibre, ...), leurs conséquences sur les moteurs sont des courts-circuits et/ou des sur-échauffements au niveau des enroulements, pouvant provoquer leur destruction.

Aussi afin de s'affranchir de ces incidents ou de limiter leurs conséquences, tout moteur doit être protégé contre :

- les courts-circuits : fusibles, disjoncteur magnétique, ...
- et les surcharges: relais thermique ou électronique de surcharge, relais multifonction, ...

Ces éléments de protection sont, dans un départ-moteur, associés à un organe de sectionnement et un dispositif de commande. Pour qu'ensemble ils remplissent correctement leur fonction, il est indispensable de veiller à leur coordination. C'est un travail souvent délicat pour le concepteur de l'installation ou de la machine, car il faut prendre en compte outre le type du moteur, son mode d'exploitation et les caractéristiques de l'installation !

Pour faciliter les choix, tous les grands constructeurs de départs-moteurs présentent dans leurs catalogues des tableaux d'association de leurs appareils. Seuls certains, tel Schneider Electric, ont créé des appareils intégrant tous les éléments à même de garantir le bon fonctionnement de tout un équipement. Ainsi la définition puis l'installation rapide des organes de protection moteur nécessaires sont maintenant possibles sans risque d'aléas.

Annexe 1 : Système modulaire du démarreur-contrôleur TesysU

L'ACP, ou démarreur-contrôleur, Tesys modèle U (marque Telemecanique) est un départ-moteur direct assurant les fonctions de protection et de commande des moteurs monophasés ou triphasés. Ses fonctions s'intègrent par simple encliquetage au sein d'une base puissance sous la forme d'unités de contrôle et de modules (cf. **fig. 45**).

Cette technologie autorise jusqu'au dernier moment une adaptation de l'ACP et d'autres éléments encliquetables sont destinés à simplifier voire supprimer ses câblages.

Base puissance [1]

- Indépendante de la tension de commande et de la puissance du moteur.
- Intègre la fonction disjoncteur avec un pouvoir de coupure de 50 kA sous 400 V, coordination totale (continuité de service) et la fonction commutation.

Unités de contrôle [2]

- Unité de contrôle standard
 - Protection contre les surcharges et les courts-circuits.
 - Protection contre les absences et les déséquilibres de phases.
 - Protection contre les défauts d'isolement (protection matériel seulement).
 - Réarmement manuel.
- Unité de contrôle évolutif
 - Fonctionnalités de l'unité de contrôle standard (voir ci-dessus).
 - En association avec un module de fonction ou de communication :
 - différenciation de défaut avec réarmement manuel
 - différenciation de défaut avec réarmement à distance ou automatique
 - pré-alarme thermique
 - indication de la charge moteur.
- Unité de contrôle multifonction
 - Fonctionnalités de l'unité de contrôle standard (voir ci-dessus).
 - Réarmement paramétrable en manuel ou en automatique.
 - Alerte des protections.
 - Visualisation en face avant ou sur terminal déporté par port Modbus RS 485.
 - Fonction « historique ».
 - Fonction « surveillance », visualisation sur face avant de l'unité de contrôle ou par terminal déporté des principaux paramètres du moteur.
 - Différenciation des défauts (court-circuit, surcharge...)

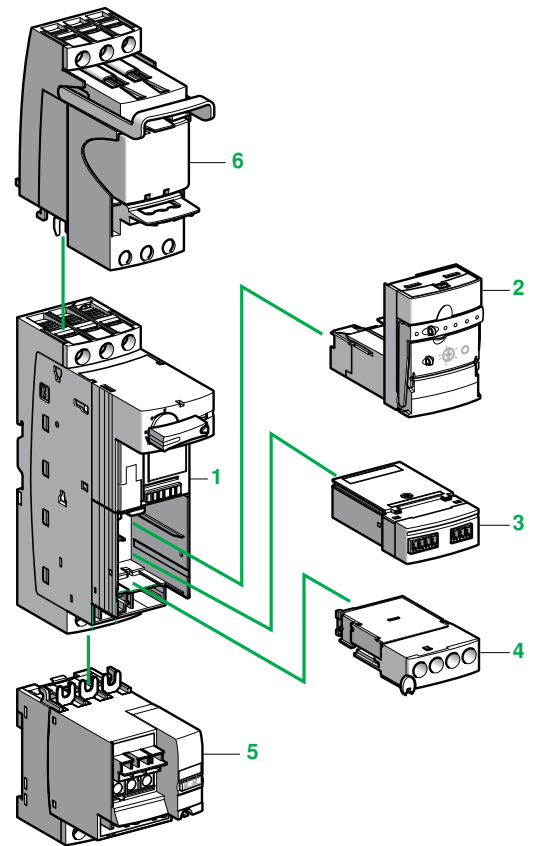


Fig. 45 : démarreur-contrôleur modulaire TesysU)

- Protection contre les surcoups et la marche à vide.

Modules [3-4]

- Contacts auxiliaires
- Fonction
 - Différenciation des défauts (avec réarmement manuel ou avec réarmement à distance ou automatique)
 - Pré-alarme thermique
 - Indication de la charge moteur
- Communication
 - Bus parallèle
 - Bus série : AS-interface, Modbus, Profibus, ...

Bloc Inverseur [5]

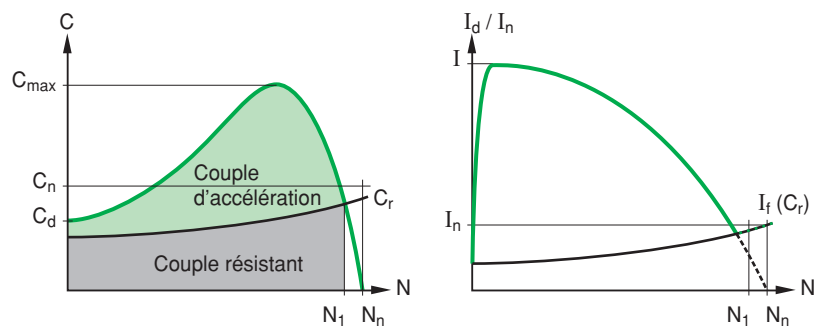
Bloc limiteur-sectionneur [6]

Annexe 2 : les principaux modes de démarrage

Démarrage direct (cf. fig. 46)

C'est le mode de démarrage le plus simple et le plus économique, mais qui, du fait de ses caractéristiques électromécaniques, ne peut être retenu que :

- si la charge admet un couple de démarrage important,
- et si le réseau permet un courant de démarrage pouvant aller jusqu'à 10 fois le courant nominal.



Sur le réseau électrique

Courant de démarrage	Forte surintensité (5 à 10 I_n)
Creux de tension	Important
Perturbation harmonique	Importante pendant le démarrage
Facteur de puissance	Faible pendant le démarrage

Sur le moteur

Nombre de démarrages successifs	Limité (tenue thermique)
Couple disponible	Faible au démarrage (Voir courbe)
Sollicitation thermique	Très importante (rotor)

Sur la mécanique

Sollicitation des accouplements	Très importante
Types de charges adaptées	Charge à faible inertie

Fig. 46 : courbes et synthèse des effets induits du mode de démarrage direct.

Démarrage étoile-triangle

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau (cf. fig. 47), ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$. La pointe de courant de démarrage est alors divisée par 3, soit $I_d = 1,5$ à $3 I_n$. C'est un mode de démarrage simple et économique qui réduit la pointe de courant au démarrage (cf. fig. 48 ci-contre).

Il ne peut être retenu que :

- si la charge au démarrage est nulle ou présente un faible couple n'excédant pas $1/3$ du couple nominal,
- et si le réseau supporte la surintensité au changement de couplage.

Démarrage statorique à résistance

Le principe consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements (cf. fig. 49 ci-contre). Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont court-circuitées et le moteur est couplé

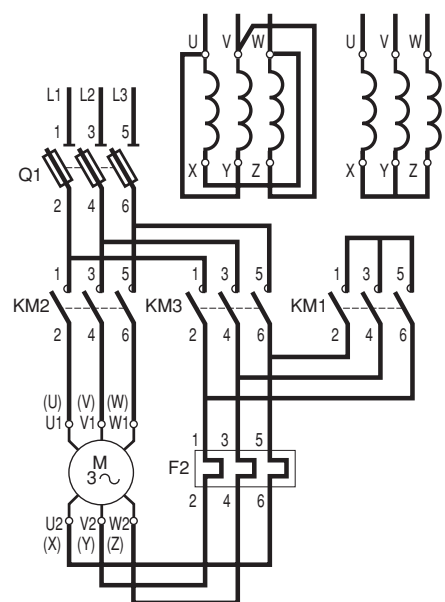
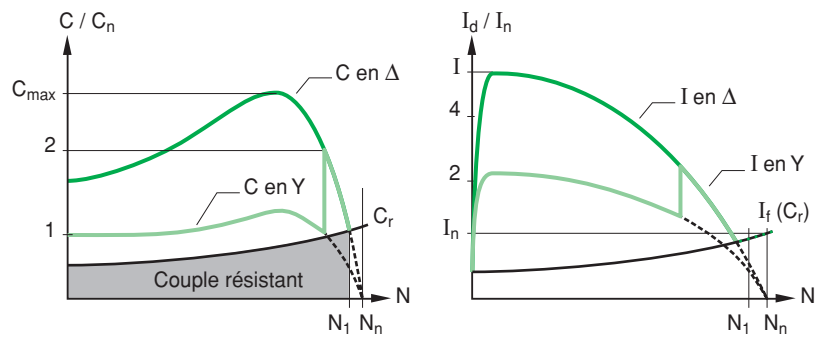


Fig. 47 : schéma électrique d'un démarreur étoile-triangle.



Sur le réseau électrique	
Courant de démarrage	Faible surintensité (1,5 à 3 I_n)
Creux de tension	Important au changement de couplage
Perturbation harmonique	Important pendant le démarrage
Facteur de puissance	Dégradé pendant le démarrage
Sur le moteur	
Nombre de démarrages successifs	2 à 3 fois plus important qu'en direct
Couple disponible	Réduit pendant le démarrage ($1/3 C_n$)
Sollicitation thermique	Moins importante qu'en direct
Sur la mécanique	
Sollicitation des accouplements	Moins importante qu'en direct
Types de charges adaptées	Charge à faible inertie

Fig. 48 : courbes et synthèse des effets induits du mode de démarrage étoile-triangle.

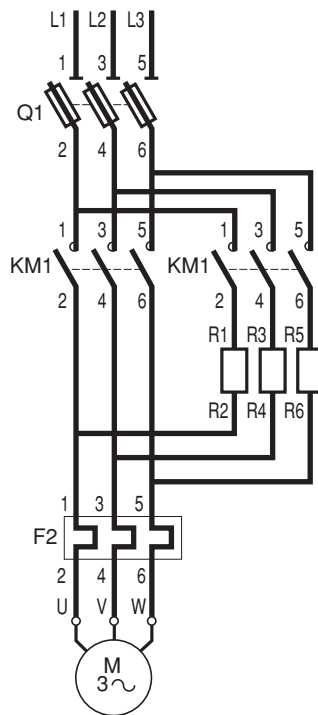


Fig. 49 : schéma électrique et séquence d'un démarreur statorique à résistance.

directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur. Ce mode de démarrage évite la coupure d'alimentation pendant la phase de démarrage ; il permet de réduire fortement les pointes de courants magnétisants (transitoires).

Cependant le courant de démarrage reste élevé, de l'ordre de $4,5 I_n$. Ce mode de démarrage provoque une perte de couple et de puissance importante (cf. fig. 50).

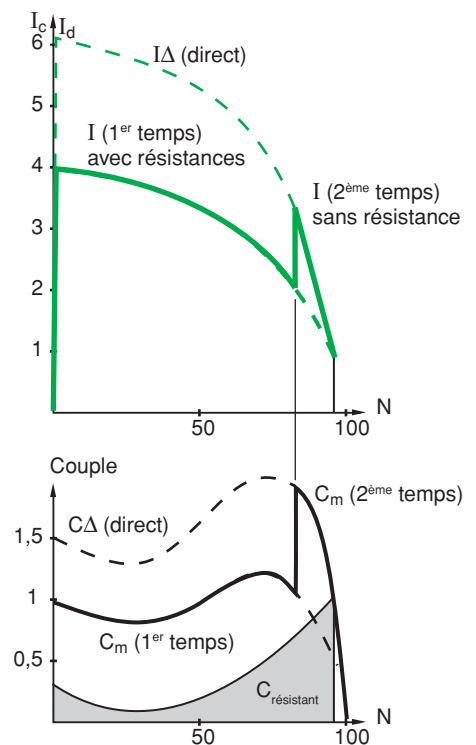


Fig. 50 : courbes courant et couple d'un démarrage statorique à résistance.

Démarrage par auto-transformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé. Le démarrage s'effectue en trois temps (cf. **fig. 51**). Ce mode de démarrage est plus particulièrement

utilisé en BT pour des puissances supérieures à 150 kW et pour les mécaniques présentant de faibles inerties dont les caractéristiques de couple supportent la dégradation du couple moteur dans un rapport allant de 0,4 à 0,85 fois le couple de démarrage du moteur (cf. **fig. 52**).

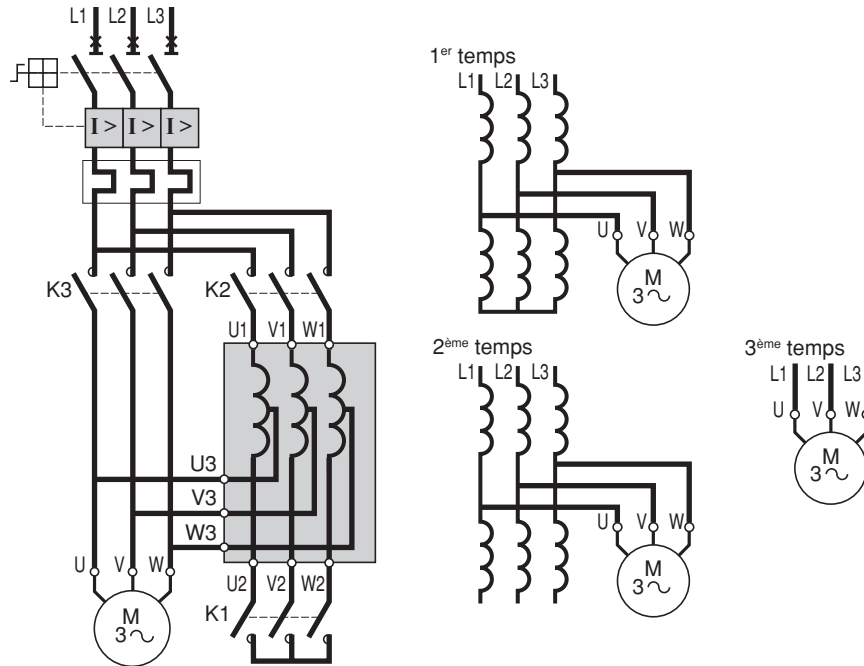


Fig. 51 : schéma électrique et séquence de démarrage par auto-transformateur.

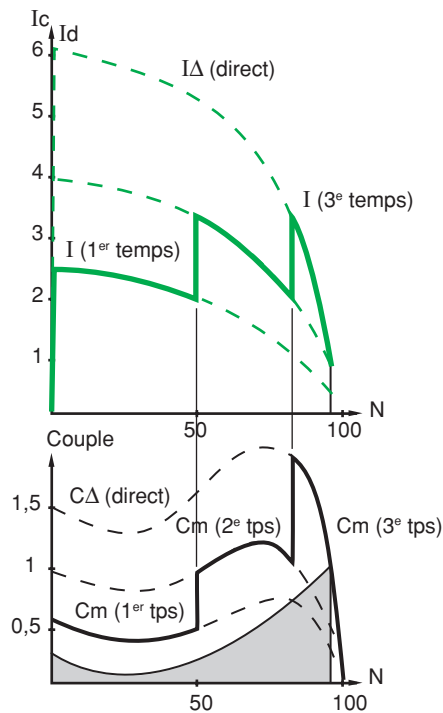


Fig. 52 : courbes courant et couple d'un démarrage par auto-transformateur.

Démarrage électronique (soft starter)

L'alimentation du moteur à la mise sous tension se fait par la montée progressive de la tension. Ce résultat est obtenu par l'intermédiaire d'un gradateur dont la tension de sortie peut être contrôlée par une rampe d'accélération asservie à la valeur du courant de limitation, ou au couple, ou liée à ces deux paramètres (cf. **fig. 53**).

C'est un mode de démarrage performant qui permet un démarrage et un arrêt en douceur.

Le contrôle par limitation de courant permet de fixer un courant maximum (3 à 4 I_n) pendant la phase de démarrage au détriment des performances en couple. C'est un type de démarrage particulièrement adapté aux « turbomachines » (pompes centrifuges, ventilateurs).



Fig. 53 : démarreur – ralentisseur progressif (Altistart 01- Telemecanique).

Le contrôle par régulation de couple permet d'optimiser les performances en couple au démarrage au détriment de l'appel de courant sur le réseau.

Démarrage par convertisseur de fréquence

Il fonctionne suivant un principe proche du MLI (Modulation des Largeurs d'Impulsions) suivant une loi sinus PWM "sinus" (en anglais : Pulse Width Modulation "sinus"). Cette technique assure une rotation régulière et sans à-coups des machines, y compris à basse vitesse, grâce à une forme du courant de sortie très proche de la sinusoïde.

C'est un mode de démarrage performant utilisé dès qu'il est nécessaire de contrôler la vitesse.

Utilisable sur tous les types de machines, il permet entre autres :

- de démarrer des charges de forte inertie,
- de démarrer des charges importantes sur un réseau de faible pouvoir de court-circuit,
- d'optimiser la consommation d'énergie électrique en fonction de la vitesse sur les turbo-machines.

Annexe 3 : Bibliographie

Normes

- CEI 60034-26 : Machines électriques tournantes.
Partie 26 : Effets d'un système de tensions déséquilibrées sur les caractéristiques de fonctionnement des moteurs asynchrones triphasés.
- CEI 60364, NF C 15-100 : Installations électriques à basse tension.
- CEI 60947-1 : Appareillage à basse tension, Partie 1 : Règles générales.
- CEI 60947-2 : Appareillage à basse tension, Partie 2 : Disjoncteurs.
- CEI 60947-4-1 : Appareillage à basse tension, Partie 4-1 : Contacteurs et démarreurs de moteurs - Contacteurs et démarreurs électromécaniques.
- CEI 60947-6-2 : Appareillage à basse tension, Partie 6-2 : Matériels à fonctions multiples - Appareils (ou matériel) de connexion de commande de protection (ACP).
- CEI 60947-8 : Appareillage à basse tension, Partie 8 : Unités de commande pour la protection thermique incorporés (CTP)aux machines électriques tournantes.
- CEI 61000-2-1 : Compatibilité électromagnétique (CEM),
Partie 2 : environnement - Section 1 : Description de l'environnement - Environnement électromagnétique pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation.

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Surtensions et coordination de l'isolement
Cahier Technique n°151 - Didier FULCHIRON.
- La sélectivité énergétique en BT
Cahier Technique n°167 - Marc SERPINET et Robert MOREL.
- Surtensions et parafoudres en BT-Coordination de l'isolement en BT
Cahier Technique n°179 - Christophe SÉRAUDIE.
- Sélectivité avec disjoncteurs de puissance BT
Cahier Technique n°201 - Jean-Pierre NEREAU.
- Protections BT et variateurs de vitesse
Cahier Technique n°204 - Jacques SCHONEK et Yves NEBON.
- Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger
Cahier Technique n°207 - Etienne GAUCHERON.
- Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques
Cahier Technique n°208 - Daniel CLENET.

Ouvrages divers

- Schémathèque «Technologies du contrôle industriel » Edition CITEF - Collection Technique Télémécanique 1994.
- «Utilisation industrielle des moteurs à courant alternatif » TEC & DOC, Schneider-Electric 2001 - Jean BONAL.
- « Protections électriques des alternateurs et moteurs » Techniques de l'Ingénieur n° D 3775 - Bernard GUIGUES.
- « Protections des installations industrielles et tertiaires » Techniques de l'Ingénieur n° D 4820 - Jacques VERSCHOOORE.
- Guide d'installation et de maintenance des « Moteurs asynchrones triphasés fermés à cage ou à bagues » Document Leroy Somer.

Schneider Electric

Schneider Electric Industries SAS
Siège social
89, bd Franklin Roosevelt
92506 Rueil-Malmaison Cedex
FRANCE

Réalisation : AXESS Valence
Edition : Schneider Electric

* *Construire le nouveau monde de l'électricité*

01-07