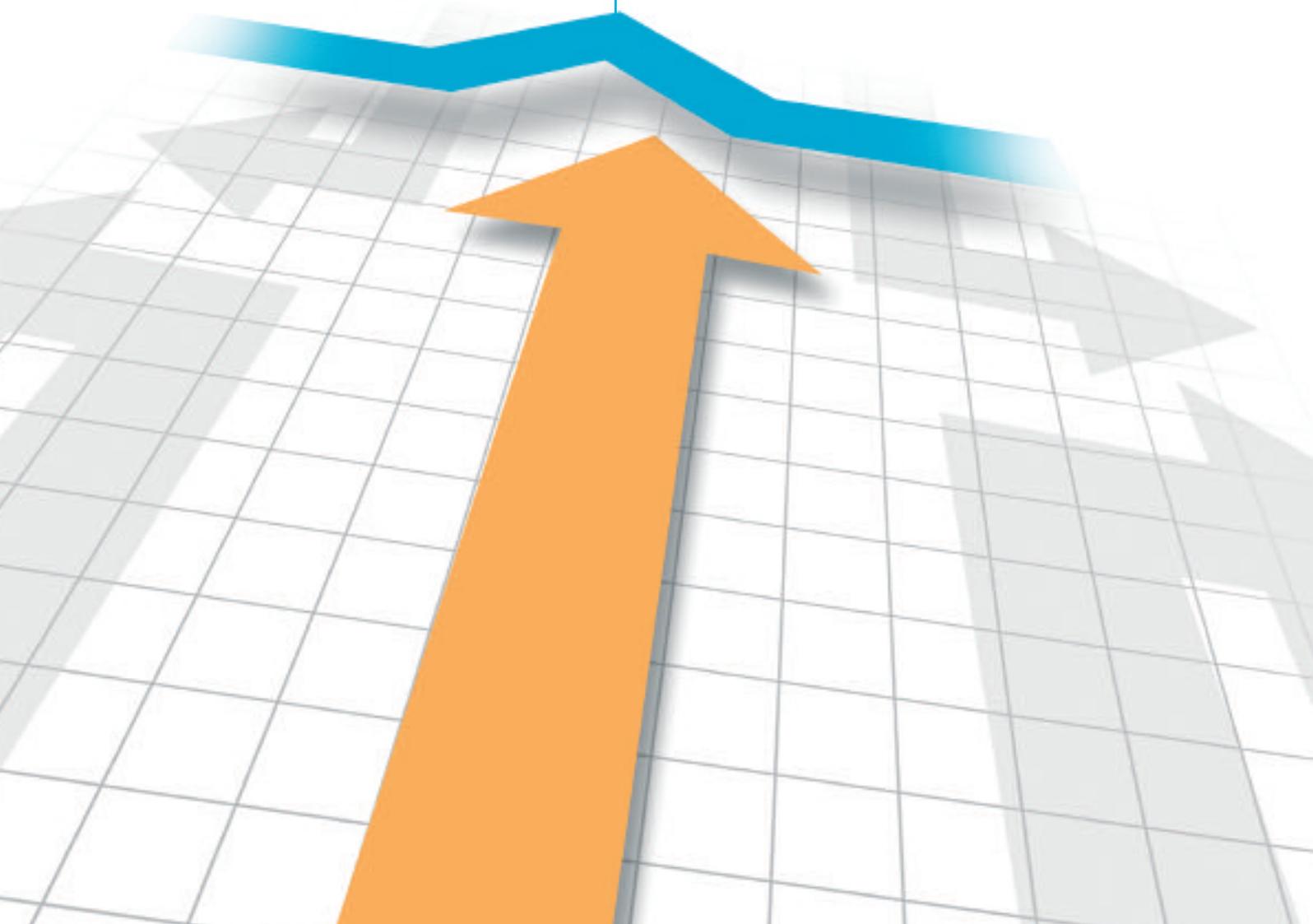


4 chapitre

Démarrage et protection des moteurs

Présentation :

- *Type de démarrage et de freinage des moteurs*
- *Protection des moteurs et analyse des défaillances*
- *Tableau de choix des fonctions de protection et des produits concernés*



4.1	Démarrage des moteurs à induction	<i>Page</i>
4.2	Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés	<i>Page</i>
4.3	Les démarreurs multifonctions	<i>Page</i>
4.4	La protection des moteurs	<i>Page</i>
4.5	Pertes et échauffement dans les moteurs	<i>Page</i>
4.6	Les différentes causes de défauts et leurs conséquences	<i>Page</i>
4.7	Les fonctions et les produits de protection	<i>Page</i>

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

M

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction

Ce chapitre est exclusivement consacré au démarrage, au freinage et à la protection des moteurs asynchrones de tous types.

Pour un descriptif physique et électrique des moteurs, veuillez consulter le chapitre moteur. Ce chapitre n'aborde pas le fonctionnement à vitesse variable des moteurs. La variation de vitesse, qui peut être considérée comme un départ moteur sophistiqué est traité dans le chapitre consacré à cette fonction.

la protection des personnes est traitée en partie dans le chapitre sur la sécurité des personnes et des biens et dans le Guide de l'Installation Electrique édité par l'Institut Schneider Formation.

4.1 Démarrage des moteurs à induction

■ Introduction

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important et peut, surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante, provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. Parfois, cette chute de tension est telle qu'elle est perceptible sur les appareils d'éclairage. Pour remédier à ces inconvénients, les règlements de quelques secteurs interdisent, au-dessus d'une certaine puissance, l'emploi de moteurs démarrant en direct. Se reporter aux pages K34 à K39 du catalogue Distribution BT 1999/2000 et aux tableaux des chutes de tension admissibles selon la norme NFC 15-100.

En fonction des caractéristiques du moteur et de la charge, plusieurs méthodes de démarrages sont utilisées.

Le choix sera dicté par des impératifs électriques, mécaniques et économiques.

La nature de la charge entraînée aura également une grande incidence sur le mode de démarrage à retenir.

■ Les principaux modes de démarrage Introduction

□ Démarrage direct

C'est le mode de démarrage le plus simple dans lequel le stator est directement couplé sur le réseau (⇒ Fig.1). Le moteur démarre sur ses caractéristiques naturelles.

Au moment de la mise sous tension, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire, constitué par la cage du rotor très peu résistante, est en court-circuit. Le courant induit dans le rotor est important. Il en résulte une pointe de courant sur le réseau :

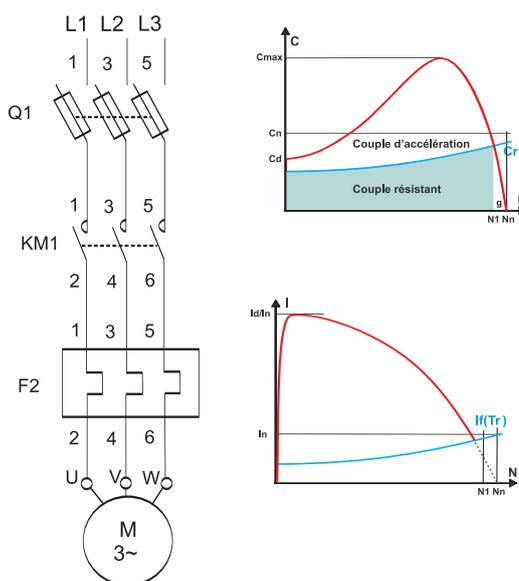
$I_{\text{démarrage}} = 5 \text{ à } 8 I_{\text{nominal}}$

Le couple de démarrage est en moyenne :

$C_{\text{démarrage}} = 0.5 \text{ à } 1.5 C_{\text{nominal}}$

Malgré les avantages qu'il présente (simplicité de l'appareillage, couple de démarrage élevé, démarrage rapide, prix faible), le démarrage direct ne peut convenir que dans les cas où :

- la puissance du moteur est faible par rapport à la puissance du réseau, de manière à limiter les perturbations dues à l'appel de courant,
- la machine entraînée ne nécessite pas une mise en vitesse progressive où comporte un dispositif amortisseur qui réduit le choc du démarrage,
- le couple de démarrage peut être élevé sans incidence sur le fonctionnement de la machine ou de la charge entraînée.



↑ Fig. 1 Démarrage direct

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction

□ Démarrage étoile-triangle

Ce mode de démarrage (⇒ Fig.2) ne peut être utilisé qu'avec un moteur sur lequel les deux extrémités de chacun des trois enroulements statoriques sont ramenées sur la plaque à bornes. Par ailleurs, le bobinage doit être réalisé de telle sorte que le couplage triangle corresponde à la tension du réseau : par exemple, pour un réseau triphasé 380 V, il faut un moteur bobiné en 380 V triangle et 660 V étoile.

Le principe consiste à démarrer le moteur en couplant les enroulements en étoile sous la tension réseau, ce qui revient à diviser la tension nominale du moteur en étoile par $\sqrt{3}$ (dans l'exemple ci-dessus, la tension réseau 380 V = 660 V/ $\sqrt{3}$).

La pointe de courant de démarrage est divisée par 3 :

$$- I_d = 1.5 \text{ à } 2.6 I_n$$

En effet, un moteur 380 V/660 V couplé en étoile sous sa tension nominale 660 V absorbe un courant $\sqrt{3}$ fois plus faible qu'en couplage triangle sous 380 V. Le couplage étoile étant effectué sous 380 V, le courant est divisé une nouvelle fois par $\sqrt{3}$ donc au total par 3.

Le couple de démarrage étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation, il est lui aussi divisé par 3 :

$$- C_d = 0.2 \text{ à } 0.5 C_n$$

La vitesse du moteur se stabilise quand les couples moteur et résistant s'équilibrent, généralement entre 75 et 85 % de la vitesse nominale. Les enroulements sont alors couplés en triangle et le moteur rejoint ses caractéristiques naturelles. Le passage du couplage étoile au couplage triangle est commandé par un temporisateur. La fermeture du contacteur triangle s'effectue avec un retard de 30 à 50 millisecondes après l'ouverture du contacteur étoile, ce qui évite un court-circuit entre phases, les deux contacteurs ne pouvant être fermés simultanément.

Le courant qui traverse les enroulements est interrompu à l'ouverture du contacteur étoile. Il se rétablit à la fermeture du contacteur triangle. Ce passage en triangle s'accompagne d'une pointe de courant transitoire très brève mais très importante, due à la force contre-électromotrice du moteur.

Le démarrage étoile-triangle convient aux machines qui ont un faible couple résistant ou qui démarrent à vide (ex : machine à bois). Pour limiter ces phénomènes transitoires, des variantes peuvent être nécessaires, au-delà d'une certaine puissance. L'une consiste en une temporisation de 1 à 2 secondes au passage étoile-triangle.

Cette temporisation permet une diminution de la force contre-électromotrice, donc de la pointe de courant transitoire.

Ceci ne peut être utilisé que si la machine a une inertie suffisante pour éviter un ralentissement trop important pendant la durée de la temporisation.

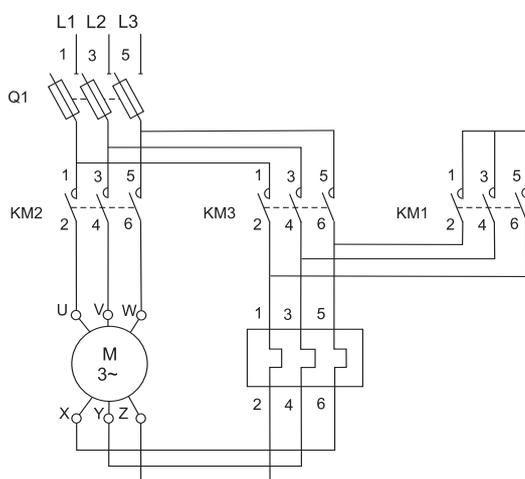
Une autre est le démarrage en 3 temps : étoile-triangle + résistance-triangle.

La coupure subsiste, mais la résistance mise en série, pendant trois secondes environ, avec les enroulements couplés en triangle, réduit la pointe de courant transitoire.

Une variante est le démarrage étoile-triangle + résistance-triangle sans coupure.

La résistance est mise en série avec les enroulements immédiatement avant l'ouverture du contacteur étoile. Ceci évite toute interruption de courant, donc l'apparition de phénomènes transitoires.

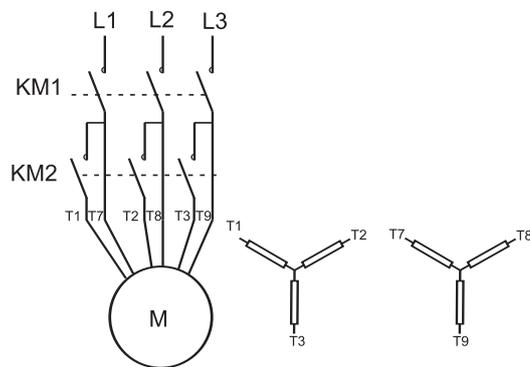
L'utilisation de ces variantes se traduit par la mise en œuvre de matériel supplémentaire, ce qui peut avoir pour conséquence une augmentation non négligeable du coût de l'installation.



↑ Fig. 2 Démarrage étoile triangle

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction



↑ Fig. 3 Démarrage à enroulements partagés

□ Démarrage de moteurs à enroulements partagés "part winding"

Ce système (⇒ Fig.3), peu utilisé en Europe, l'est surtout sur le marché nord-américain (tension 230/460 V, rapport égal à 2). Ce type de moteur comporte un enroulement statorique dédoublé en deux enroulements parallèles avec six ou douze bornes sorties. Il est équivalent à deux "demi moteurs" d'égale puissance.

Au démarrage, un seul "demi moteur" est couplé en direct sous la pleine tension du réseau, ce qui divise le courant de démarrage et le couple approximativement par deux. Ce dernier est néanmoins supérieur au couple que fournirait un moteur à cage de même puissance démarrant en étoile-triangle.

En fin de démarrage, le second enroulement est couplé sur le réseau. A ce moment, la pointe de courant est faible et de courte durée, car le moteur n'a pas été séparé du réseau d'alimentation et n'a plus qu'un faible glissement.

□ Démarrage statorique à résistance

Le principe (⇒ Fig.4) consiste à démarrer le moteur sous tension réduite en insérant des résistances en série avec les enroulements. Lorsque la vitesse se stabilise, les résistances sont éliminées et le moteur est couplé directement sur le réseau. Cette opération est généralement commandée par un temporisateur.

Dans ce mode de démarrage, le couplage des enroulements du moteur n'est pas modifié. Il n'est donc pas nécessaire que les deux extrémités de chaque enroulement soient sorties sur la plaque à bornes.

La valeur de la résistance est calculée en fonction de la pointe de courant au démarrage à ne pas dépasser, ou de la valeur minimale du couple de démarrage nécessaire compte tenu du couple résistant de la machine entraînée. En général, les valeurs de courant et de couple de démarrage sont :

- $I_d = 4.5 I_n$
- $C_d = 0.75 C_n$

Pendant la phase d'accélération avec les résistances, la tension appliquée aux bornes du moteur n'est pas constante. Cette tension est égale à la tension du réseau diminuée de la chute de tension dans la résistance de démarrage.

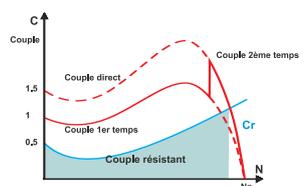
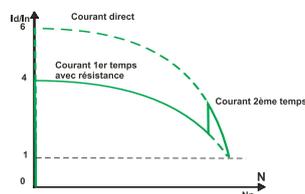
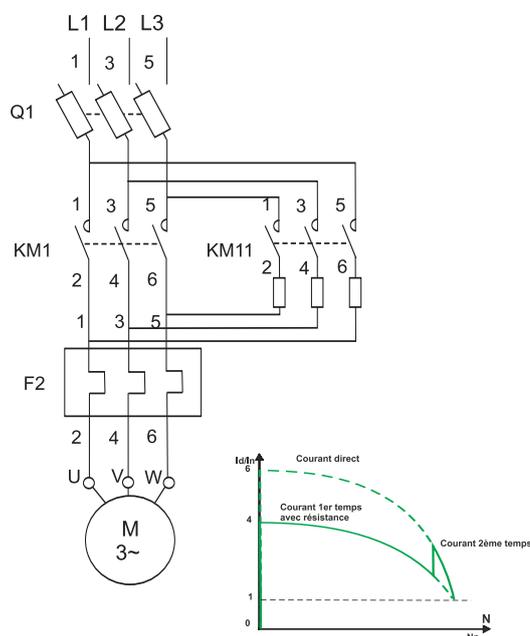
La chute de tension est proportionnelle au courant absorbé par le moteur. Comme le courant diminue au fur et à mesure de l'accélération du moteur, il en est de même pour la chute de tension dans la résistance. La tension appliquée aux bornes du moteur est donc minimale au moment du démarrage, et elle augmente progressivement.

Le couple étant proportionnel au carré de la tension aux bornes du moteur, il augmente plus rapidement que dans le démarrage étoile-triangle où la tension reste fixe pendant tout le temps du couplage étoile.

Ce mode de démarrage convient donc bien aux machines ayant un couple résistant croissant avec la vitesse, comme par exemple les ventilateurs ou les pompes centrifuges.

Il présente l'inconvénient d'une pointe de courant relativement importante au démarrage. Cette pointe pourrait être réduite en augmentant la valeur de la résistance, mais cela entraînerait une chute de tension supplémentaire aux bornes du moteur, et par conséquent une diminution importante du couple de démarrage.

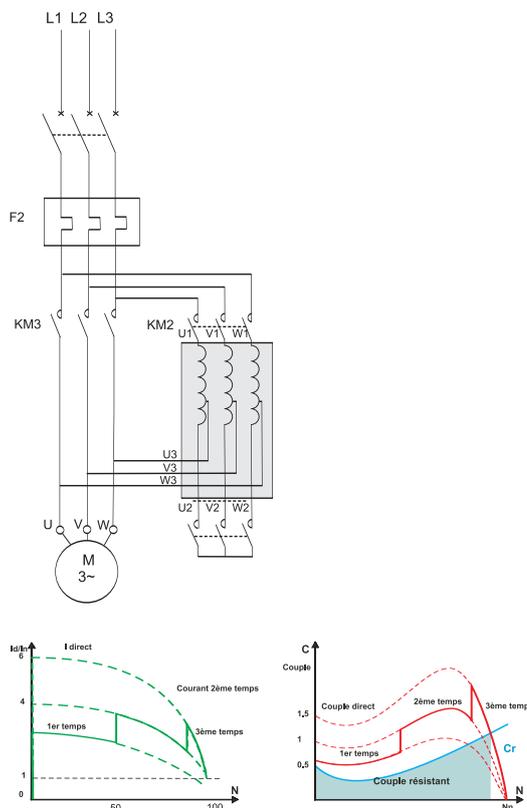
En revanche, l'élimination de la résistance en fin de démarrage se fait sans qu'il y ait interruption de l'alimentation du moteur, donc sans phénomène transitoire.



↑ Fig. 4 Démarrage statorique par résistance

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction



↑ Fig. 5 Démarrage par auto-transformateur

□ Démarrage par auto-transformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un auto-transformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé (⇒ Fig.5).

Le démarrage s'effectue en trois temps :

- au premier temps, l'auto-transformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'auto-transformateur. Le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'auto-transformateur est généralement muni de prises permettant de choisir le rapport de transformation, donc la valeur de la tension réduite la mieux adaptée,
- avant de passer au couplage pleine tension, l'étoilage est ouvert. La fraction de bobinage raccordée au réseau constitue alors une inductance en série avec le moteur. Cette opération est effectuée lorsque la vitesse d'équilibre est atteinte à la fin du premier temps,
- le couplage pleine tension intervient après le deuxième temps généralement très court (de l'ordre d'une fraction de seconde). La portion de bobinage de l'auto-transformateur en série avec le moteur est court-circuitée, puis l'auto-transformateur est mis hors circuit.

Le courant et le couple de démarrage varient dans les mêmes proportions. Ils sont divisés par ($U_{\text{réseau}}/U_{\text{réduite}}$).

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

$$I_d = 1.7 \text{ à } 4 I_n$$

$$C_d = 0.5 \text{ à } 0.85 C_n$$

Le démarrage s'effectue sans qu'il y ait interruption du courant dans le moteur.

De ce fait, les phénomènes transitoires liés à une telle interruption n'existent pas.

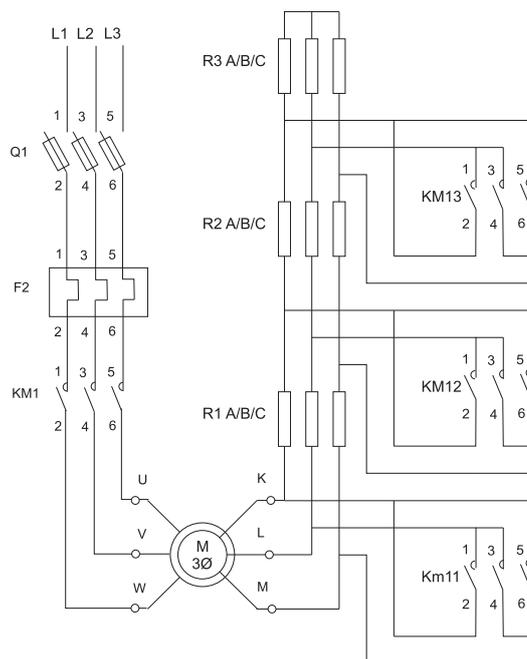
En revanche, si certaines précautions ne sont pas prises des phénomènes transitoires de même nature peuvent apparaître lors du couplage sous pleine tension. En effet, la valeur de l'inductance en série avec le moteur, après ouverture de l'étoilage, est grande par rapport à celle du moteur. Il s'ensuit une chute de tension importante qui entraîne une pointe de courant transitoire élevée au moment du couplage sous pleine tension. Pour éviter cet inconvénient, le circuit magnétique de l'auto-transformateur comporte un entrefer dont la présence conduit à une diminution de la valeur de l'inductance. Cette valeur est calculée de telle façon qu'au moment de l'ouverture de l'étoilage au deuxième temps, il n'y ait pas de variation de tension aux bornes du moteur.

La présence de l'entrefer a pour conséquence une augmentation du courant magnétisant de l'auto-transformateur. Ce courant magnétisant augmente l'appel de courant dans le réseau lors de la mise sous tension de l'auto-transformateur.

Ce mode de démarrage est généralement utilisé en BT pour des moteurs de puissance supérieure à 150 kW. Mais il conduit à des équipements relativement coûteux en raison du prix élevé de l'auto-transformateur.

□ Démarrage des moteurs à bagues

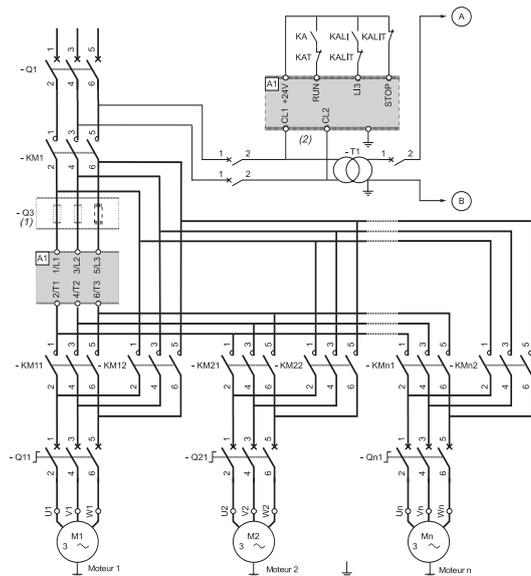
Un moteur à bagues ne peut démarrer en direct, avec ses enroulements rotoriques court-circuités, sinon il provoquerait des pointes de courant inadmissibles. Il est nécessaire, tout en alimentant le stator sous la pleine tension du réseau, d'insérer dans le circuit rotorique des résistances (⇒ Fig.6) qui sont ensuite court-circuitées progressivement.



↑ Fig. 6 Démarrage d'un moteur à bagues

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction



↑ Fig. 7 Démarrage multi-moteurs avec un démarreur électronique

Le calcul de la résistance insérée dans chaque phase permet de déterminer de façon rigoureuse la courbe couple-vitesse obtenue. Il en résulte que celle-ci doit être insérée en totalité au moment du démarrage et que la pleine vitesse est atteinte lorsqu'elle est entièrement court-circuitée.

Le courant absorbé est sensiblement proportionnel au couple fourni ou, du moins, n'est que peu supérieur à cette valeur théorique.

Par exemple, pour un couple de démarrage égal à $2 C_n$, la pointe de courant est d'environ $2 I_n$. Cette pointe est donc considérablement plus faible et le couple maximal de démarrage plus élevé qu'avec un moteur à cage, pour lequel les valeurs typiques, en couplage direct sur le réseau, sont de l'ordre de $6 I_n$ pour $1.5 C_n$. Le moteur à bagues, avec un démarrage rotorique, s'impose donc dans tous les cas où les pointes de courant doivent être faibles et pour des machines démarrant à pleine charge.

Par ailleurs, ce type de démarrage est extrêmement souple, car il est facile d'ajuster le nombre et l'allure des courbes représentant les temps successifs aux impératifs mécaniques ou électriques (couple résistant, valeur d'accélération, pointe maximale de courant, etc.).

□ Démarrage/ralentissement par démarreur électronique (soft starter)

C'est un mode de démarrage performant (⇒ Fig. 7) qui permet un démarrage et un arrêt en douceur (reportez-vous à la section consacrée aux démarreurs électroniques dans le *chapitre 5 Départs Moteurs* pour de plus amples détails).

Il peut être utilisé :

- en limitation de courant,
- en régulation de couple.

Le contrôle par limitation de courant permet de fixer un courant maximum (3 à $4 \times I_n$) pendant la phase de démarrage au détriment des performances en couple. Ce contrôle est particulièrement adapté aux "turbomachines" (pompes centrifuges, ventilateurs).

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. Celui-ci est adapté aux machines à couple constant.

Ce type de démarreur permet une multitude de schéma :

- un sens de marche,
- deux sens de marche,
- shuntage de l'appareil en fin de démarrage,
- démarrage et ralentissement de plusieurs moteurs en cascade, (⇒ Fig. 7).
- etc.

□ Démarrage par convertisseur de fréquence

C'est un mode de démarrage performant (⇒ Fig. 8) utilisé dès qu'il est nécessaire de contrôler et de faire varier la vitesse (reportez-vous à la section consacrée à la variation de vitesse électronique dans le *chapitre 5 Départs moteurs* pour de plus amples détails).

Il permet entre autre :

- 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 turbomachines.

Ce type de démarrage s'applique sur tous types de machines.

Cette solution est utilisée pour le réglage de la vitesse du moteur et accessoirement pour le démarrage.

↑ Fig. 8 Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction

□ **Tableau récapitulatif des différents modes de démarrage des moteurs triphasés** (⇒ Fig.9)

	Direct	Etoile triangle	Enroulements partagés	résistances	Autotransformateur	Moteurs à bagues	Soft starter	Convertisseur de fréquence
Moteur	Standard	Standard	6 enroulements	Standard	Standard	Spécifique	Standard	Standard
Coût	+	++	++	+++	+++	+++	+++	++++
Courant moteur de démarrage	5 à 10 I _N	2 à 3 I _N	2 I _N	Env 4.5 I _N	1.7 à 4 I _N	Env 2 I _N	4 à 5 I _N	I _N
Creux de tension	Elevé	Elevé au changement de couplage	Faible	Faible	Faible, précautions à prendre au couplage direct	Faible	Faible	Faible
Harmoniques tension et courant	Elevé	Modéré	Modéré	Modéré	Modéré	Faible	Elevé	Elevé
Facteur de puissance	Faible	Faible	Modéré	Modéré	Faible	Modéré	Faible	Elevé
Nombre de démarrages possibles	Limité	2 à 3 fois plus qu'en direct	3 à 4 fois plus qu'en direct	3 à 4 fois plus qu'en direct	3 à 4 fois plus qu'en direct	2 à 3 fois plus qu'en direct	Limité	Elevé
Couple disponible	Env 2.5 C _n	0.2 à 0.5 C _n	2 C _n	C _n	Env 0.5 C _n	Env 2c _n	Env 0.5 C _n	1.5 à 2 C _n
Sollicitation thermique	Très importante	Importante	Modérée	Importante	Modérée	Modérée	Modérée	Faible
Chocs mécanique	Très élevé	Modéré	Modéré	Modéré	Modéré	Faible	Modéré	Faible
Type de charge recommandée	Toutes	A vide	Couple croissant	Pompes et ventilateurs	Pompes et ventilateurs	Toutes	Pompes et ventilateurs	Toutes
Charges à forte inertie	Oui*	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui

* peut nécessiter un dimensionnement particulier du moteur

↑ Fig. 9 Tableau récapitulatif

□ Démarrage des moteurs monophasés

Un moteur monophasé ne pouvant démarrer seul, différents artifices sont utilisés pour le lancer.

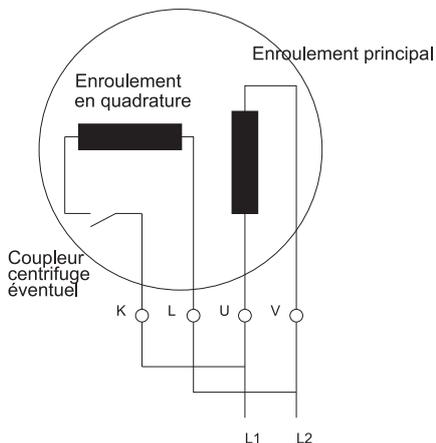
□ Démarrage par phase auxiliaire

Sur ce type de moteur (⇒ Fig.10), le stator comprend deux enroulements décalés géométriquement de 90°.

Lors de la mise sous tension, du fait de la différence de construction des bobinages, un courant I₁ traverse la phase principale et un courant plus faible I₂, sensiblement déphasé de $\pi/2$, circule dans la phase auxiliaire. Les champs engendrés étant produits par deux courants déphasés, l'un par rapport à l'autre, le champ tournant résultant est suffisant pour provoquer le démarrage à vide du moteur. Lorsque le moteur atteint environ 80 % de sa vitesse, la phase auxiliaire peut être mise hors circuit (coupleur centrifuge), ou maintenue en service. Le stator du moteur se trouve ainsi transformé, au moment du démarrage ou en permanence, en stator diphasé.

Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser les connexions d'une phase.

Le couple fourni lors du démarrage étant faible, il convient pour l'accroître d'augmenter le décalage entre les deux champs produits par les bobinages.



↑ Fig. 10 Moteur monophasé à phase auxiliaire

4. Démarrage et protection des moteurs

4.1 Démarrage des moteurs à induction

□ Démarrage par phase auxiliaire et résistance

Une résistance placée en série dans la phase auxiliaire en augmente l'impédance et accroît le décalage entre I1 et I2.

Le fonctionnement en fin de démarrage est identique à celui avec phase auxiliaire seule.

□ Démarrage par phase auxiliaire et inductance

Le principe est le même que précédemment, mais la résistance est remplacée par une inductance qui, montée en série dans la phase auxiliaire, accroît le décalage entre les deux courants.

□ Démarrage par phase auxiliaire et condensateur

C'est le dispositif le plus utilisé (⇒ Fig.11). Il consiste à placer un condensateur dans la phase auxiliaire. La valeur pratique de la capacité pour le condensateur permanent est d'environ 8 μF pour un moteur de 200 W. Pour le démarrage, un condensateur supplémentaire de 16 μF peut être nécessaire et est éliminé dès que le démarrage est terminé.

La présence du condensateur provoquant un déphasage inverse à celui d'une inductance, le fonctionnement en période de démarrage et en marche normale est voisin de celui d'un moteur diphasé à champ tournant. D'autre part, le couple et le facteur de puissance sont plus importants. Le couple de démarrage C_d est sensiblement égal à 3 fois le couple nominal C_n et le couple maximum C_{max} atteint 2 C_n .

Une fois le démarrage effectué, il est préférable de maintenir le déphasage entre les deux courants, mais la capacité du condensateur peut être réduite car l'impédance du stator a augmenté.

Le schéma (⇒ Fig.11) représente un moteur monophasé avec un condensateur connecté en permanence. D'autres dispositions sont utilisées, comme l'ouverture du circuit de déphasage par un interrupteur centrifuge à partir d'une certaine vitesse.

Un moteur triphasé (230/400 V) peut être utilisé sur un réseau monophasé 230 V, en le munissant d'un condensateur de démarrage et d'un condensateur de marche connecté en permanence au détriment de la puissance utile (déclassement de 0.7 environ), du couple de démarrage et de la réserve thermique.

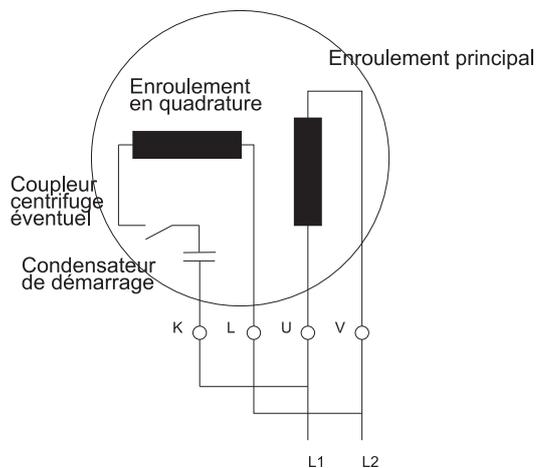
Seuls les moteurs quatre pôles de faible puissance (4 kW max) se prêtent à ce mode de fonctionnement.

Les constructeurs fournissent des tableaux permettant de sélectionner les condensateurs de valeur appropriée.

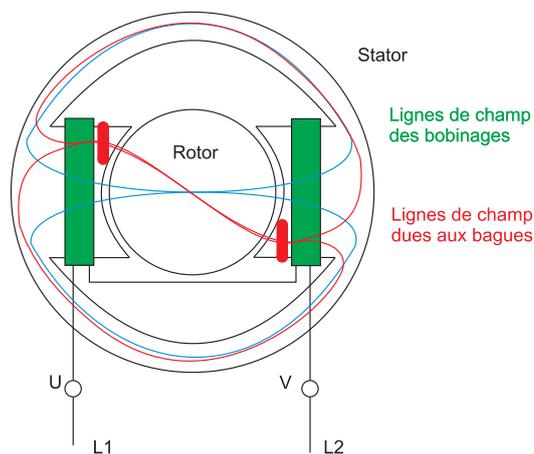
□ Démarrage par bague de déphasage

C'est le dispositif (⇒ Fig.12) utilisé dans les moteurs de très faible puissance (de l'ordre de la centaine de watts). Les pôles comportent des encoches dans lesquelles sont insérées des bagues conductrices en court circuit. Le courant induit, généré de cette manière provoque une distorsion du champ tournant qui permet le démarrage.

Le rendement est faible mais acceptable dans cette gamme de puissance.



↑ Fig. 11 Moteur monophasé à condensateur de démarrage



↑ Fig. 12 Moteur à bagues de déphasage

4.2 Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés

■ Introduction

Dans un grand nombre d'applications, l'arrêt du moteur est obtenu simplement par décélération naturelle. Le temps de décélération dépend alors uniquement de l'inertie et du couple résistant de la machine entraînée. Mais il est souvent nécessaire de réduire ce temps. Le freinage électrique apporte dans ce cas une solution efficace et simple. Par rapport aux freinages mécanique et hydraulique, il offre l'avantage de la simplicité et de ne mettre en œuvre aucune pièce d'usure.

■ Freinage par contre-courant : principe

Le principe consiste, après avoir isolé le moteur du réseau alors qu'il tourne encore, à le reconnecter sur le réseau en sens inverse. C'est un mode de freinage très efficace avec un couple, en général supérieur au couple de démarrage, qui doit être arrêté suffisamment tôt pour éviter que le moteur ne reparte en sens inverse.

Divers dispositifs automatiques sont employés pour commander l'arrêt dès que la vitesse approche de zéro :

- détecteurs d'arrêt à friction, détecteurs d'arrêt centrifuges,
- dispositifs chronométriques,
- relais de mesure de la fréquence ou de la tension au rotor (rotor bobiné), etc.

□ Moteur à cage

Avant d'adopter ce système (⇒ Fig.13), il faut absolument s'assurer que le moteur est capable de supporter des freinages en contre-courant avec le service envisagé. En effet, outre les contraintes mécaniques, ce procédé impose des contraintes thermiques importantes au rotor, l'énergie correspondant à chaque freinage (énergie de glissement prise au réseau et énergie cinétique) étant dissipée dans la cage. Les sollicitations thermiques, pendant le freinage sont trois fois plus importantes que pour une mise en vitesse.

Au moment du freinage, les pointes de courant et de couple sont nettement supérieures à celles produites lors du démarrage.

Afin d'obtenir un freinage sans brutalité, il est souvent inséré, lors du couplage en contre-courant, une résistance en série avec chaque phase du stator. Le couple et le courant sont alors réduits comme dans le cas du démarrage statorique.

Les inconvénients du freinage par contre-courant d'un moteur à cage sont tels que, ce procédé n'est utilisé que sur certaines applications avec des moteurs de faible puissance.

□ Moteur à rotor bobiné (Moteur à bagues)

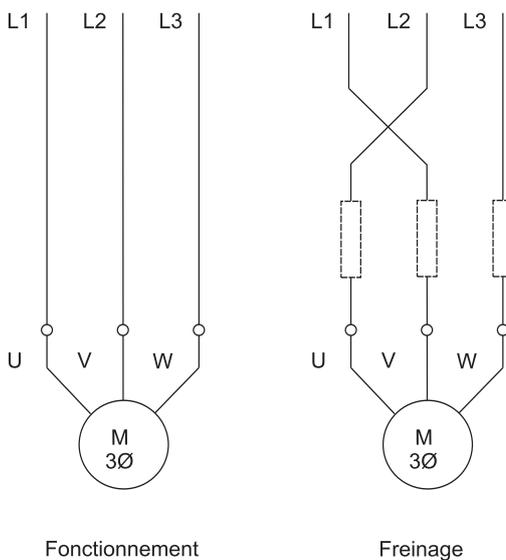
Afin de limiter la pointe de courant et de couple, il est impératif, avant de coupler le stator du moteur en contre-courant, de réinsérer les résistances rotoriques ayant servi au démarrage, et souvent même d'ajouter une section supplémentaire dite de freinage (⇒ Fig.14).

Le couple de freinage peut être facilement réglé à la valeur désirée en choisissant une résistance rotorique convenable.

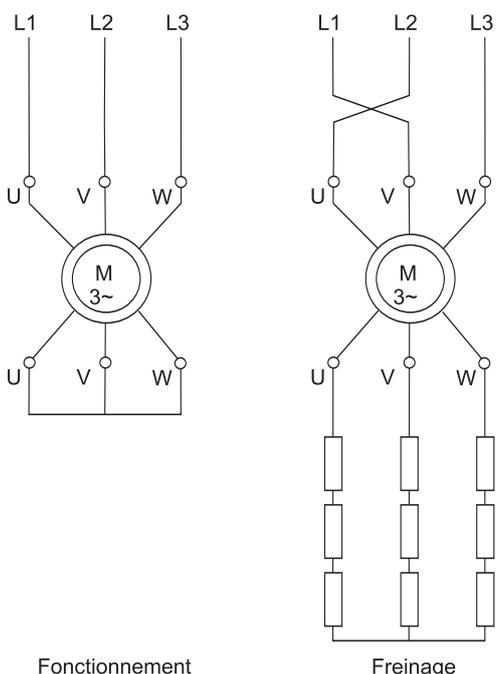
Au moment de l'inversion, la tension rotorique est presque le double de la tension rotorique à l'arrêt, ce qui impose quelquefois des précautions particulières d'isolement.

Comme pour les moteurs à cage, une énergie importante est produite dans le circuit rotorique. Elle est dissipée en totalité (aux pertes près) dans les résistances.

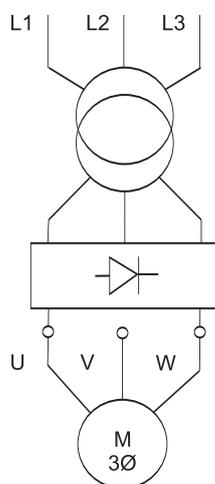
La commande automatique de l'arrêt à la vitesse nulle peut être faite par l'un des dispositifs cités plus haut, ou bien par l'action d'un relais de tension ou de fréquence inséré dans le circuit rotorique.



↑ Fig. 13 Principe du freinage à contre courant



↑ Fig. 14 Principe du freinage à contre courant pour une machine asynchrone à bagues



↑ Fig. 15 Principe du freinage à courant continu pour une machine asynchrone

Avec ce système, il est possible de retenir une charge entraînée à une vitesse modérée. La caractéristique est très instable (fortes variations de vitesse pour faibles variations de couple).

■ Freinage par injection de courant redressé

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage (⇒ Fig. 15). Par rapport au système à contre-courant, le prix de la source de courant redressé est compensé par un moindre volume des résistances. Avec les variateurs et démarreurs électroniques, cette possibilité de freinage est offerte sans supplément de coût.

Le procédé consiste à envoyer du courant redressé dans le stator préalablement séparé du réseau. Ce courant redressé crée un flux fixe dans l'entrefer du moteur. Pour que la valeur de ce flux corresponde à un freinage convenable, le courant doit être environ 1.3 fois le courant nominal. L'excédent de pertes thermiques dû à cette légère surintensité est généralement compensé par le fait que le freinage est suivi d'un temps d'arrêt.

La valeur du courant étant fixée par la seule résistance des enroulements du stator, la tension de la source de courant redressé est faible. Cette source est généralement constituée de redresseurs ou fournie par les variateurs. Ceux-ci doivent pouvoir supporter les surtensions transitoires produites par les enroulements qui viennent d'être déconnectés du réseau alternatif (à 380 volts efficaces, par exemple).

Le mouvement du rotor représente un glissement par rapport à un champ fixe dans l'espace (alors que, dans le système à contre-courant, le champ tourne en sens inverse). Le moteur se comporte comme un générateur synchrone débitant dans le rotor. Les caractéristiques obtenues avec un système de freinage par injection de courant redressé présentent, par rapport à celles résultant d'un système à contre-courant, des différences importantes :

- l'énergie dissipée dans les résistances rotoriques ou dans la cage est moins importante. Il s'agit uniquement de l'équivalent de l'énergie mécanique communiquée par les masses en mouvement. La seule énergie prise au réseau est l'excitation du stator,
- si la charge n'est pas entraînée, le moteur ne redémarre pas en sens inverse,
- si la charge est entraînée, le système fournit un freinage permanent qui retient cette charge à faible vitesse. Il s'agit donc d'un freinage de ralentissement et non d'un freinage d'arrêt. La caractéristique est beaucoup plus stable qu'en contre-courant.

Dans le cas d'un moteur à bagues, les caractéristiques couple-vitesse sont fonction du choix des résistances.

Dans le cas d'un moteur à cage, ce système permet de régler facilement le couple de freinage en agissant sur le courant continu d'excitation. Cependant, le couple de freinage sera faible quand le moteur tourne à vitesse élevée.

Afin d'éviter les échauffements inutiles, il faut prévoir un dispositif coupant le courant dans le stator une fois le freinage réalisé.

■ Freinage électronique

Le freinage électronique s'obtient aisément avec un variateur de vitesse muni d'une résistance de freinage. Le moteur asynchrone se comporte alors comme une génératrice et l'énergie mécanique est dissipée dans la résistance de freinage sans augmentation des pertes dans le moteur.

Pour obtenir des renseignements complémentaires consultez la section consacrée à la variation de vitesse électronique dans le [chapitre 5 Départs moteurs](#).

■ Freinage par fonctionnement en hyper-synchrone

C'est le cas où le moteur est entraîné par sa charge au-dessus de la vitesse de synchronisme. Il se comporte alors comme une génératrice asynchrone et développe un couple de freinage. Aux pertes près, l'énergie est récupérée par le réseau.

Sur un moteur de levage, la descente de la charge à la vitesse nominale correspond à ce type de fonctionnement. Le couple de freinage équilibre alors exactement le couple dû à la charge et amène non pas un ralentissement, mais une marche à vitesse constante.

S'il s'agit d'un moteur à bagues, il est essentiel de court-circuiter tout ou partie des résistances rotoriques, pour éviter que le moteur ne soit entraîné très au-delà de sa vitesse nominale, avec les risques mécaniques que cela comporterait.

Ce fonctionnement possède les qualités idéales d'un système de retenu de charge entraînant :

- la vitesse est stable, pratiquement indépendante du couple entraînant,
- l'énergie est récupérée et renvoyée au réseau.

Il ne correspond cependant qu'à une seule vitesse, c'est-à-dire approximativement à la vitesse nominale.

Le freinage hyper synchrone se rencontre également sur les moteurs à plusieurs vitesses lors du passage de la grande à la petite vitesse.

Le freinage en hyper synchrone est aisément réalisable avec un variateur de vitesse électronique, le seul fait de baisser la consigne de fréquence entraîne automatiquement ce type de fonctionnement.

■ Autres systèmes de freinage

On rencontre encore parfois le freinage en monophasé qui consiste à alimenter le moteur entre deux phases du réseau et à réunir la borne libre à l'une des deux autres reliées au réseau. Le couple de freinage est limité au 1/3 du couple maximum moteur. Ce système ne peut freiner la pleine charge et nécessite donc d'être complété par un freinage à contre-courant. Ce fonctionnement s'accompagne de déséquilibres et de pertes importantes.

Citons également le freinage par ralentisseur à courants de Foucault. C'est un principe analogue à celui utilisé sur les véhicules industriels en complément des freins mécaniques (ralentisseurs électriques). L'énergie mécanique est dissipée en chaleur dans le ralentisseur. Le réglage du freinage se fait facilement par un enroulement d'excitation. Mais l'augmentation importante de l'inertie est un inconvénient.

□ Inversion du sens de marche

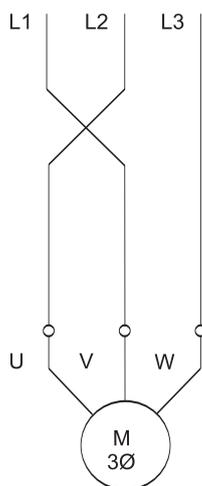
L'inversion du sens de marche des moteurs asynchrones triphasés (⇒ Fig. 16) se fait simplement par l'inversion du champ tournant dans le moteur, ce qui se réalise en croisant deux enroulements.

Cette inversion se fait en général à l'arrêt. Dans le cas contraire, l'inversion des phases conduit à un freinage à contre courant (voir le paragraphe Moteur à rotor bobiné). Les autres types de freinage comme décrit plus haut sont également possibles.

L'inversion du sens de rotation des moteurs monophasés est également possible si l'on a accès à tous les enroulements.

■ Définition des services types

Le nombre de démarrages et le nombre de freinages par unité de temps a une incidence majeure sur l'échauffement des moteurs. La norme CEI 60034-1 (caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement) définit des services types qui permettent de calculer une image thermique et de dimensionner les moteurs en fonction de l'utilisation prévue. Les paragraphes qui suivent donnent un aperçu des services types. Pour plus d'informations, consulter la norme et les catalogues des fabricants de moteurs.

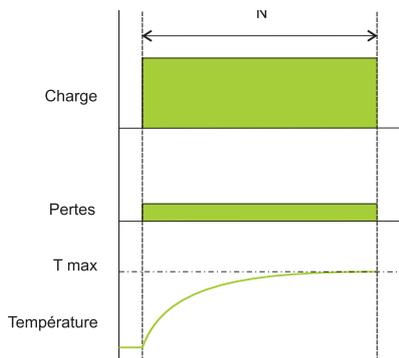


↑ Fig. 16

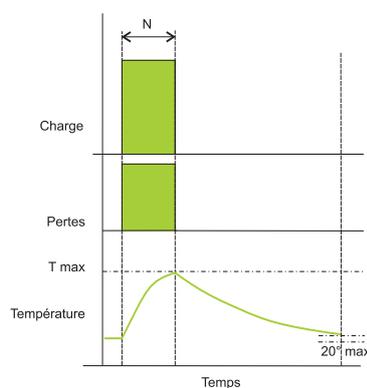
Principe d'inversion du sens de marche d'un moteur asynchrone

4. Démarrage et protection des moteurs

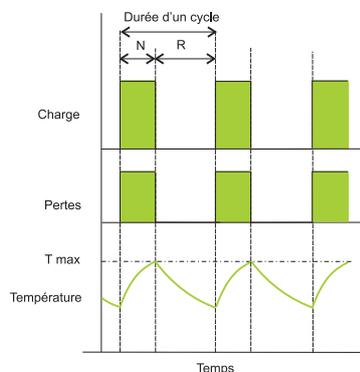
4.2 Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés



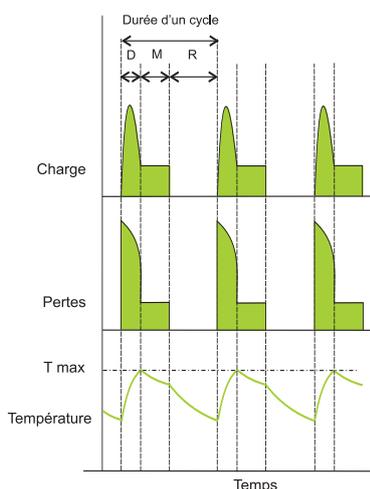
↑ Fig. 17 Service continu/Service S1



↑ Fig. 18 Service intermittent/Service S2



↑ Fig. 19 Service intermittent périodique/Service S3



↑ Fig. 20 Service intermittent périodique à démarrage/Service S4

□ Service continu - service type S1 (⇒ Fig.17)

Fonctionnement à charge constante d'une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique.

□ Service temporaire - service type S2 (⇒ Fig.18)

Fonctionnement à charge constante pendant un temps déterminé, moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un temps de repos permettant de rétablir un équilibre thermique à 20° près entre la machine et le fluide de refroidissement.

□ Service intermittent périodique - service type S3 (⇒ Fig.19)

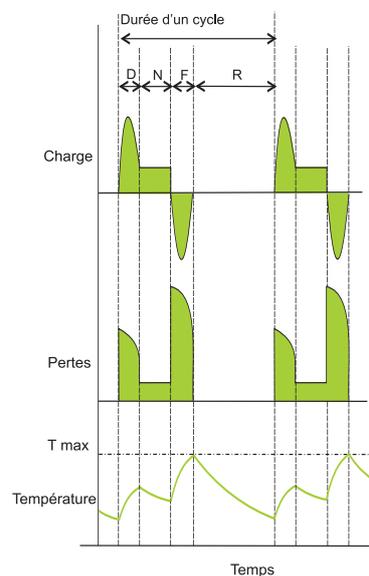
Suite de cycles identiques comportant chacun une période de fonctionnement et de repos. Dans ce type de service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de manière significative.

□ Service intermittent périodique à démarrage - service type S4 (⇒ Fig.20)

Suite de cycles identiques comportant chacun une période de fonctionnement et de repos. Dans ce type de service, le cycle est tel que le courant de démarrage n'affecte pas l'échauffement de manière significative.

□ Service intermittent périodique à freinage électrique - service type S5 (⇒ Fig.21)

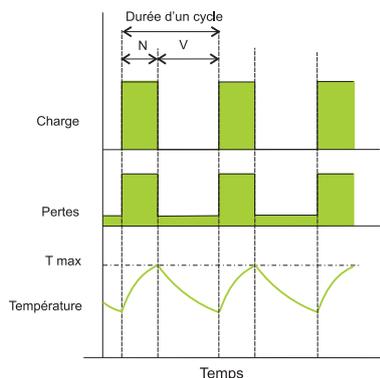
Suite de cycles de services comportant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante, une période de freinage électrique rapide et une période de repos.



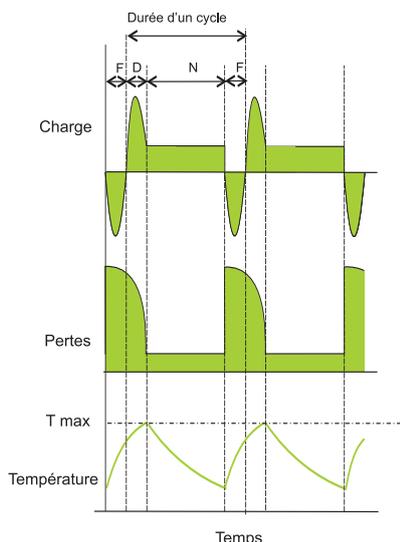
↑ Fig. 21 Service intermittent périodique à freinage électrique/Service S5

4. Démarrage et protection des moteurs

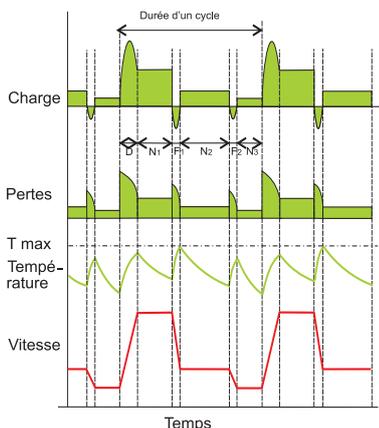
4.2 Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés



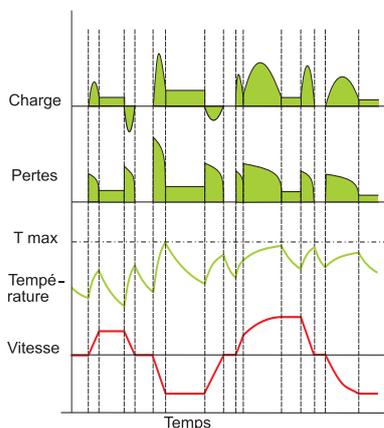
↑ Fig. 22 Service interrompu périodiques à charge intermittente/Service S6



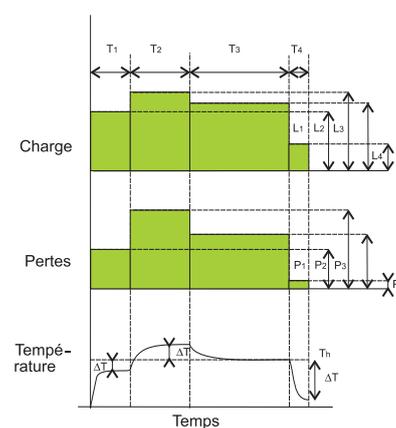
↑ Fig. 23 Service interrompu périodique à freinage électrique/Service S7



↑ Fig. 24 Service interrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse/Service S8



↑ Fig. 25 Service à variations non périodiques de charge et de vitesse/Service S9



↑ Fig. 26 Service à régimes constants distincts/Service S10

□ Service ininterrompu périodique à charge intermittente - service type S6 (⇒ Fig.22)

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de fonctionnement à charge constante et une période de fonctionnement à vide. Il n'existe pas de période de repos.

□ Service ininterrompu périodique à freinage électrique - service type S7 (⇒ Fig.23)

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de démarrage, une période de fonctionnement à charge constante et une période de freinage électrique. Il n'existe pas de période de repos.

□ Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse - service type S8 (⇒ Fig.24)

Suite de cycles de services identiques comportant chacun une période de fonctionnement à charge constante correspondant à une vitesse de rotation prédéterminée suivie d'une ou plusieurs périodes de fonctionnement à d'autres charges constantes correspondant à différentes vitesses de rotation (réalisées par le changement du nombre de pôles par exemple). Il n'existe pas de période de repos.

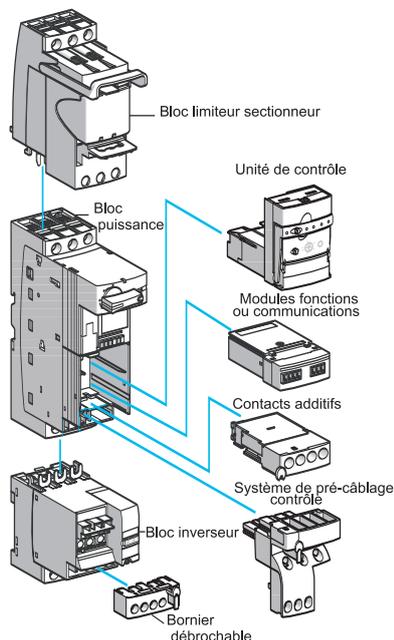
□ Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - service type S9 (⇒ Fig.25)

Service dans lequel, généralement, la charge et la vitesse ont une variation non périodique dans la plage de fonctionnement admissible. Ce service inclut fréquemment des surcharges qui peuvent être largement supérieures à la pleine charge.

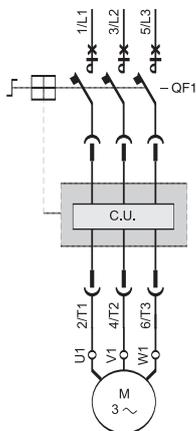
□ Service à régimes constants distincts - service type S10 (⇒ Fig.26)

Service comportant au plus quatre valeurs distinctes de charge (ou de charges équivalentes), chaque valeur étant appliquée pendant une durée suffisante pour que la machine atteigne l'équilibre thermique. La charge minimale pendant un cycle de charge peut avoir la valeur zéro (fonctionnement à vide ou temps de repos).

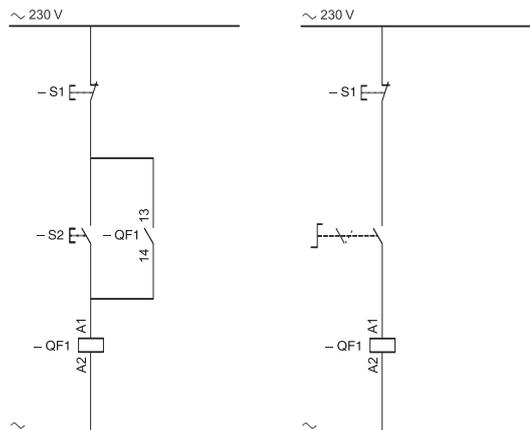
4.3 Les démarreurs multifonctions



↑ Fig. 27 Tesys U



↑ Fig. 28 Schéma de principe de Tesys U



↑ Fig. 29 Commande 3 fils

↑ Fig. 30 Commande 2 fils

Les besoins des utilisateurs évoluant, les départs-moteurs ont connu ces dernières années une évolution sensible. Parmi les besoins, citons :

- la diminution du volume des produits pour faciliter l'intégration et réduire la taille des équipements,
- la résolution aisée des problèmes de coordination,
- la diminution du nombre de références,
- la facilité et la rapidité de câblage pour une réduction des coûts de main d'œuvre,
- la réalisation de fonctions d'automatisme à des prix attractifs,
- les besoins de communication et le raccordement aux bus de terrain.

En 1983, la série Intégral de Telemecanique a été la première réponse à cette demande. Ce produit proposait pour la première fois, réunies dans un même boîtier, les fonctions suivantes :

- le sectionnement,
- la commutation,
- la protection contre les surcharges et contre les courts-circuits avec les performances des meilleurs appareils du marché, voir la section 4.4 protection des moteurs pour des renseignements complémentaires.

Près de vingt ans plus tard, l'évolution des techniques aidant, Schneider Electric propose Tesys U. Ce produit apporte une évolution sensible dans la réalisation des équipements.

Il garantit la coordination totale, c'est à dire que le dispositif est assuré de redémarrer après un déclenchement. Par rapport à une solution traditionnelle, le nombre de références est divisé par 10, le gain de câblage atteint 60 % et l'encombrement réduit de plus de 40 %.

Le dessin (⇒ Fig.27) représente Tesys U avec une partie de ses additifs possibles.

Comme l'Intégral, il incorpore les fonctions essentielles des départs-moteurs auxquelles s'ajoutent par des additifs des fonctions de dialogue et des fonctions de commutation sophistiquées permettant des schémas inédits particulièrement économique. Tesys U comporte une "base puissance" qui intègre les fonctions de sectionnement, de commutation et de protection. C'est l'élément de base permettant la fonction élémentaire suivante.

■ Un sens de marche

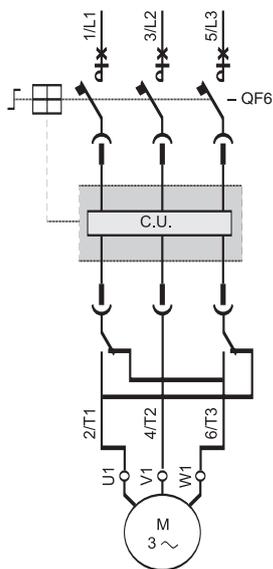
Le schéma (⇒ Fig.28) représente la composition interne du produit. La "base puissance" inclut tous les composants nécessaires aux fonctions de sectionnement, protection contre les courts-circuits et les surcharges et la commutation puissance.

Cette "base puissance" permet de réaliser sans adjonction les schémas classiques suivants :

- Commande 3 fils (⇒ Fig.29), Commande par impulsion avec auto-maintien.
- Ou la commande 2 fils (⇒ Fig.30), Commande par commutateur 2 positions.

4. Démarrage et protection des moteurs

4.3 Les démarreurs multifonctions



↑ Fig. 31 Tesys U, avec module inverseur de marche (principe)

■ Deux sens de marche

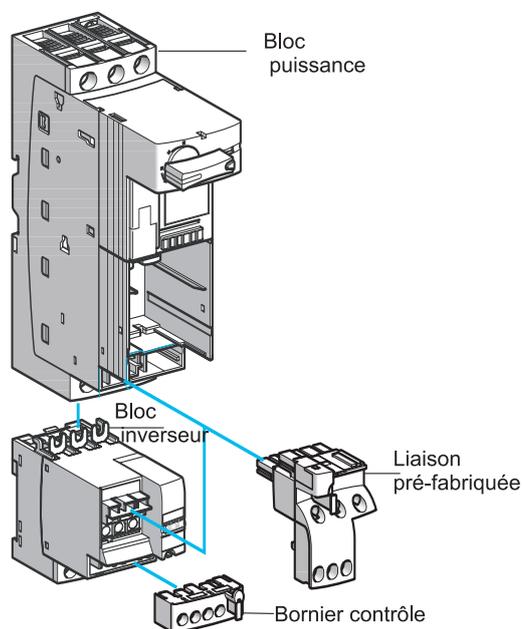
Les dessins des figures 31 et 32, sont les représentations de la base puissance et de l'additif inverseur qui peut se connecter soit sur le côté du produit, soit se raccorder directement en constituant ainsi un produit compact.

La "base puissance" réalise la fonction Marche/Arrêt assure les fonctions de coupure et la protection thermique et contre les courts circuits.

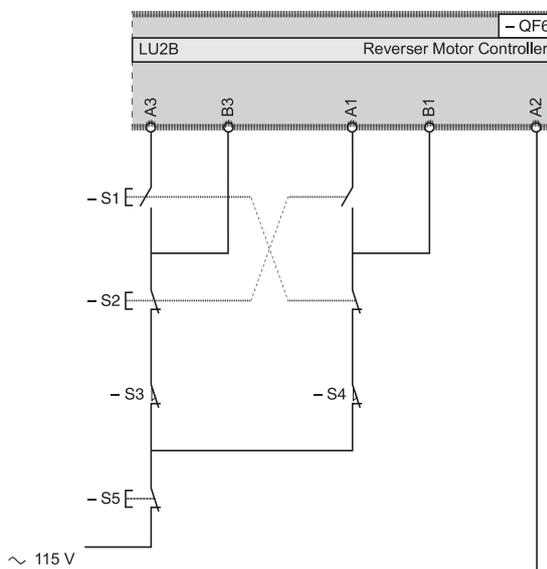
L'inverseur ne commute jamais en charge, ce qui élimine toute usure électrique.

Le verrouillage mécanique est inutile car l'électro-aimant qui commande l'inverseur est bistable et l'accès aux râteaux de l'inverseur est impossible ce qui interdit d'agir sur sa position.

Exemple de commande 3 fils (⇒ Fig.33) : commande par impulsion avec auto-maintien et fins de course niveaux haut et bas.



↑ Fig. 32 Tesys U, avec module inverseur de marche



↑ Fig. 33 Exemple d'utilisation de Tesys U avec sa fonction inverseur

4.4 La protection des moteurs

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 et 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 les pertes de production, 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.

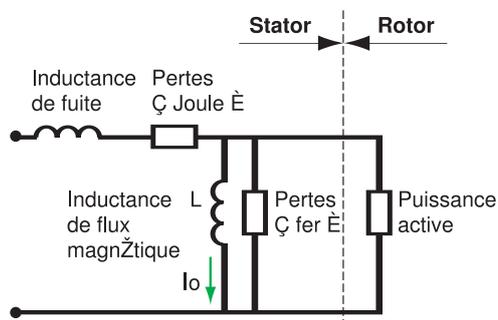
Ces protections sont assurées par des appareils spécifiques, tels que des fusibles, disjoncteurs, relais de surcharge ou par des appareils plus intégrés offrant plusieurs types de protections.

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 un bâtiment.

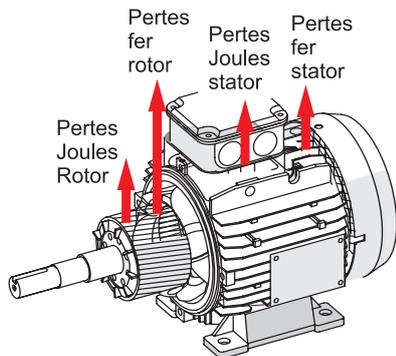
4. Démarrage et protection des moteurs

- 4.5 Pertes et échauffement dans les moteurs
- 4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences

4.5 Pertes et échauffement dans les moteurs



↑ Fig. 34 Schéma équivalent d'un moteur asynchrone



↑ Fig. 35 Les pertes d'un moteur asynchrone

■ Schéma équivalent du moteur

Le moteur asynchrone à cage peut être représenté par le schéma équivalent suivant (⇒ Fig.34).

Une partie de la puissance électrique fournie au stator est transmise à l'arbre de sortie sous forme de puissance motrice ou puissance active.

L'autre partie est transformée en chaleur dans le moteur (⇒ Fig. 35) :

- pertes "joule" dans les enrôlements statoriques,
- pertes "joule" au rotor dus aux courants induits qui y circulent (Consulter le chapitre concernant les moteurs),
- pertes "fer" dans le rotor et le stator.

Ces pertes sont fonction des conditions d'utilisation et des conditions de service (consulter la section concernant le démarrage des moteurs), ce qui se traduit par un échauffement du moteur.

Des anomalies dues soit à la charge, soit à la tension d'alimentation, soit aux deux combinées sont susceptibles d'entraîner un échauffement dangereux.

■ Classes d'isolation

La plupart des machines industrielles ont des classes d'isolation de classe F (⇒ Fig.36).

La classe F autorise des échauffements (mesurés par la méthode de variation de résistance) de 105°K et des températures maximales aux points chauds de la machine de 155°C (réf. CEI 85 et CEI 34-1). Pour des ambiances spéciales, en particulier ambiance à température élevée en présence de forte humidité, la classe H est souhaitable.

Les machines de qualité sont dimensionnées pour que l'échauffement maximal soit de 80° dans les conditions nominales d'utilisation (ambiance de 40°C, altitude inférieure à 1 000 m, tension et fréquence nominales et charge nominale).

Il en résulte, pour un moteur de classe F, une réserve d'échauffement de 25°K pour supporter les éventuelles variations autour du fonctionnement nominal.

	Δt	T max
Classe B	80°K	125°C
Classe F	105°K	155°C
Classe H	125°K	180°C

↑ Fig. 36 Classes d'isolation

4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences

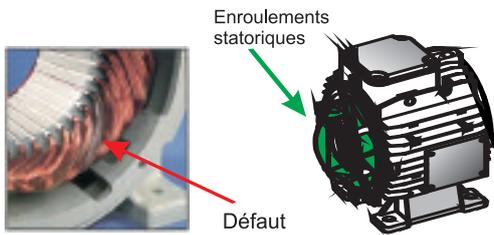
Au niveau d'une installation comportant des moteurs électriques, nous pouvons distinguer deux types de défauts : les défauts d'origine interne au moteur, et les défauts d'origine externe.

- **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.

4. Démarrage et protection des moteurs

4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences



↑ Fig. 37 Les enroulements sont, pour les moteurs, les parties les plus vulnérables aux défauts électriques et aux incidents d'exploitation

□ 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 démarrage et régime de démarrage,
 - inertie de la charge,
 - etc.
- de l'installation du moteur
 - désalignement,
 - balourd,
 - efforts excessifs sur l'arbre,
 - etc.

■ 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 (⇒ Fig. 37). Elle peut être provoquée par des phénomènes électriques (décharges superficielles, surtensions), thermiques (sur-échauffement) ou même mécaniques (vibrations, efforts électrodynamiques sur les conducteurs).

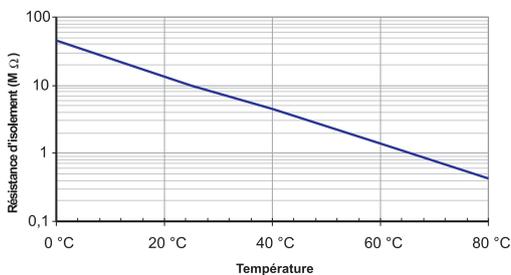
Des défauts d'isolement peuvent également se produire au sein de l'**enroulement rotorique** avec la même conséquence : la mise hors service du moteur.

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.

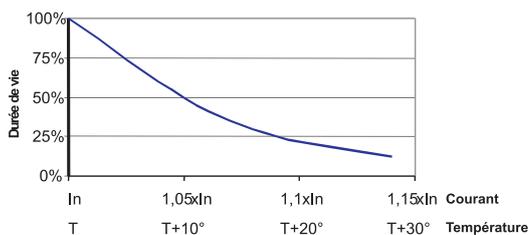
La courbe de la *figure 38* fournie par la plupart des constructeurs de moteurs électriques, montre l'évolution de la résistance d'isolement en fonction de la température : plus la température augmente et plus la résistance d'isolement diminue. La durée de vie des enroulements, et par conséquent du moteur, se réduit donc fortement.

La courbe de la *figure 39*, montre qu'une augmentation de 5 % du courant, équivalente à une élévation de température d'environ + 10°, 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. 38 Résistance d'isolement en fonction de la température



↑ Fig. 39 Durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant consommé

■ Les défauts externes au moteur

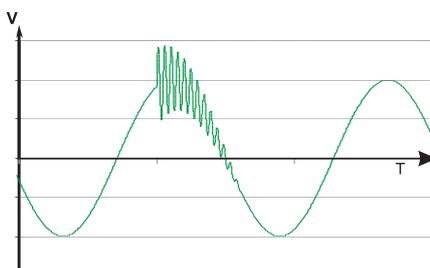
Phénomènes liés à l'alimentation électrique du moteur

□ 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 (⇒ Fig. 40) temporaires ou permanentes peuvent avoir différentes origines :

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



↑ Fig. 40 Exemple de surtension

4. Démarrage et protection des moteurs

4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences

Leurs principales caractéristiques sont décrites dans le tableau de la *figure 41*.

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

↑ Fig. 41 Caractéristiques de différents types de surtension

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.

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

□ 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 (⇒ Fig. 42) 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.

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

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

avec :

V_{max} tension la plus élevée,

V_{min} tension la plus faible,

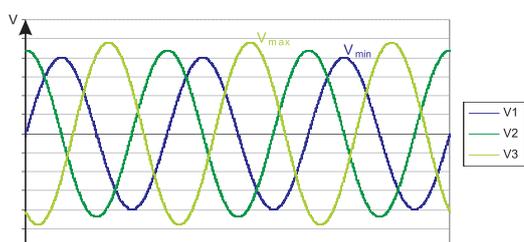
$$V_{\text{moy}} = \frac{(V1 + V2 + V3)}{3}$$

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 (⇒ Fig. 43).

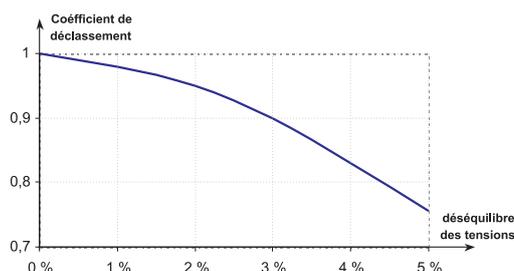
Valeur du déséquilibre (%)	0	2	3,5	5
Courant statorique (A)	I _n	1,01 x I _n	1,04 x I _n	1,075 x I _n
Augmentation des pertes (%)	0	4	12,5	25
Echauffement (%)	100	105	114	128

Fig. 43 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 (⇒ Fig. 44) 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.



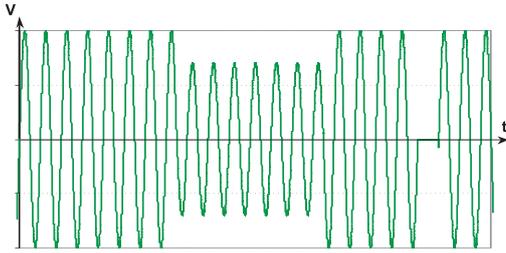
↑ Fig. 42 Relevé de tensions d'un système triphasé déséquilibré



↑ Fig. 44 Déclassement d'un moteur en fonction d'un déséquilibre de tensions de son alimentation

4. Démarrage et protection des moteurs

4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences



↑ Fig. 45 Exemple d'un creux et d'une coupure brève de tension

□ Baisses de tension et coupures

Un creux de tension (⇒ Fig. 45) est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie. La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de 1/2 période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute.

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

On parle de microcoupure pour des durées de l'ordre de la milliseconde.

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, à cet instant, 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 ré-accélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure.

Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs ré-accélérations simultanées peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau. La durée du creux est alors allongée et peut rendre la ré-accélération difficile (redémarrages longs avec sur-échauffement) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).

La ré-alimentation rapide (~ 150 ms) d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement sans précaution peut conduire à un ré-enclenchement 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 In) (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 que 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. Les moteurs synchrones peuvent cependant, du fait de leur inertie généralement plus importante et d'une plus faible influence de la tension sur le couple, supporter des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %) sans décrocher.

En cas de décrochage, le moteur s'arrête, 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),
- disfonctionnement 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 $h \times f$ (h : entier) :

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

avec :

Y_0 : la composante continue

h : rang de l'harmonique

ω : pulsation ($2\pi \cdot f$)

Y_h : amplitude de l'harmonique de rang h

Y_1 : la composante fondamentale

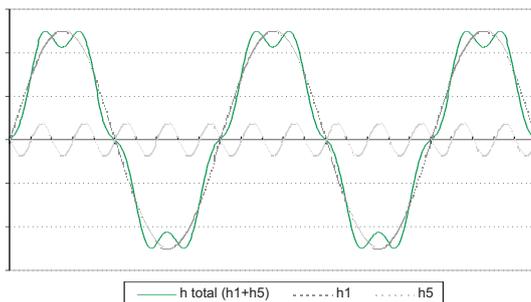
Le taux de distorsion harmonique (DHT pour Distorsion Harmonique Totale) donne une mesure de la déformation du signal :

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

Les courants et tensions harmoniques sont créés par des charges non linéaires raccordées au réseau de distribution. La distorsion harmonique (\Rightarrow Fig. 46) est une forme de pollution du réseau électrique susceptible de poser des problèmes pour un taux supérieur à 5 %.

Les équipements d'électronique de puissance (variateur de vitesse, onduleur, etc.) 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.

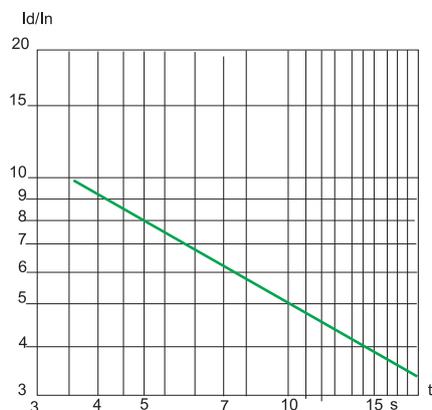
La présence d'harmonique provoque, dans les moteurs, une augmentation des pertes par courants de Foucault d'où des échauffements supplémentaires. Ils peuvent également engendrer des couples pulsatoires (vibrations, fatigue mécanique), des nuisances sonores et limiter l'emploi des moteurs à pleine charge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



↑ Fig. 46 Relevé d'une tension sinusoïdale comportant des harmoniques de rang 5

4. Démarrage et protection des moteurs

4.6 Les différentes causes de défauts et leurs conséquences



↑ Fig. 47 Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant de démarrage sur courant nominal

■ Les défauts externes au moteur : phénomènes liés à l'exploitation 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).

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

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

N($tr.s^{-1}$) : 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 fonction de son courant de démarrage (\Rightarrow Fig. 47).

□ 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.

■ Synthèse

Cette synthèse réalisée sous la forme du tableau de la figure 48 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	• 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	• Sur-échauffement(*)
Baisse et creux de tension	• Instabilité de la tension du réseau • Branchement de fortes charges	• Diminution du couple utile • Augmentation des pertes	• Sur-échauffement(*)
Harmoniques	• Pollution du réseau par variateurs de vitesse, onduleurs, etc ...	• Diminution du couple utile • Augmentation des pertes	• Sur-échauffement(*)
Démarrage trop long	• Couple résistant trop important • Baisse de tension	• Augmentation du temps de démarrage	• Sur-échauffement(*)
Blocage	• Problème mécanique	• Surintensité	• Sur-échauffement(*)
Surcharge	• Augmentation du couple résistant • Baisse de tension	• Augmentation du courant consommé	• Sur-échauffement(*)

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

↑ Fig. 48 Synthèse des défauts possibles pour un moteur avec leurs origines, effets et conséquences

4.7 Les fonctions et les produits de protection

■ 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

Il 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 :

- la fusion des contacts du contacteur,
- la destruction des éléments thermiques d'un relais à bilame si la coordination est de type I,
- la génération d'arcs électriques,
- la calcination des matériaux isolants,
- l'incendie dans l'équipement.

• Un phénomène électrodynamique

Il 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, 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 ré-enclenchement.

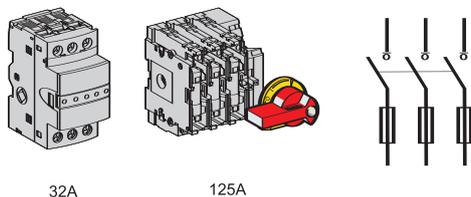
La protection contre les courts-circuits peut aussi être intégrée à des appareils à fonctions multiples tels que les disjoncteurs-moteurs et les contacteurs-disjoncteurs.

4. Démarrage et protection des moteurs

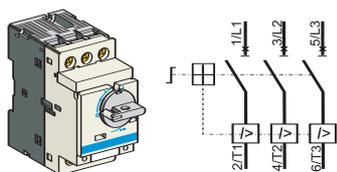
4.7 Les fonctions et les produits de protection

Pouvoir de coupure (PC)	Cos φ	Pouvoir de fermeture (PF)
4.5kA < PC < 6kA	0.7	1.5 PC
6kA < PC < 10kA	0.5	1.7 PC
10kA < PC < 20kA	0.3	2 PC
20kA < PC < 50kA	0.25	2.1 PC
50kA < PC	0.2	2.2 PC

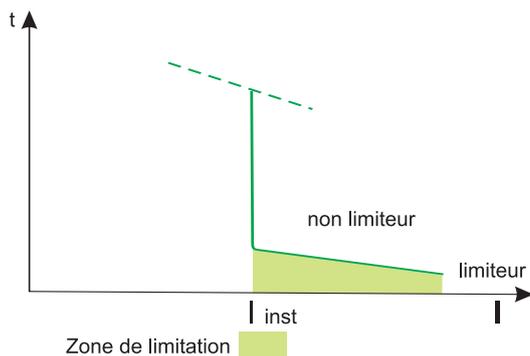
↑ Fig. 49 Pouvoirs de coupure et de fermeture, fixés par la norme CEI 60947-2 pour les disjoncteurs



↑ Fig. 50 Sectionneurs 32 et 125 A à fusibles (LS1-D32 et GS1-K4 - Telemecanique)



↑ Fig. 51 Disjoncteur magnétique GV2-L (marque Telemecanique) et son symbole graphique



↑ Fig. 52 Courbes de déclenchement des disjoncteurs magnétiques

□ 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 49*.

□ 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 (⇒ *Fig. 50*).

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 (⇒ *Fig. 51*).

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 (⇒ *Fig. 52*). 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.

■ 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 (⇒ Fig. 53). Ces valeurs d'emploi sont fournies par le constructeur du moteur.

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.

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. 53 Coefficients de déclassement des moteurs selon leurs conditions d'emploi

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

- de surcharge, thermique (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 son dispositif différentiel,
- à sondes à thermistances CTP (à Coefficient de Température Positif),
- de sur-couple,
- multifonctions.

4. Démarrage et protection des moteurs

4.7 Les fonctions et les produits de protection

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.

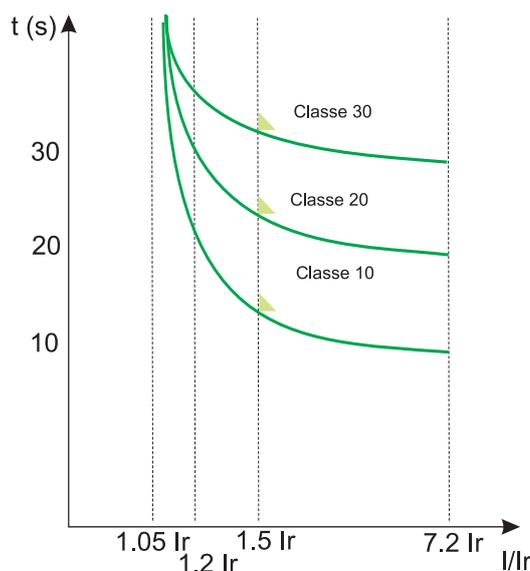
□ Les relais de surcharge (thermiques ou électroniques)

• 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 peut varier de quelques secondes (démarrage à vide, couple résistant peu élevé, etc.) à quelques dizaines de secondes (couple résistant important, forte inertie de la charge entraînée, etc.).

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 (⇒ Fig. 54).



↑ Fig. 55 Courbes de déclenchement des relais de surcharge

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 h min	2 s < tp < 10 s	-
10	> 2 h	< 2 h	< 4 h min	4 s < tp < 10 s	5 s < tp < 10 s
20	> 2 h	< 2 h	< 8 h min	6 s < tp < 20 s	10 s < tp < 20 s
30(*)	> 2 h	< 2 h	< 12 h min	9 s < tp < 30 s	20 s < tp < 30 s

(*) 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. 54 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.

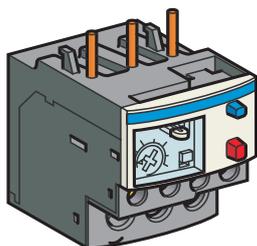
Les limites d'utilisation sont également caractérisées par des courbes (⇒ Fig. 55) fonction du temps et de la valeur du courant de réglage (notée en multiple de I_r).

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 (⇒ Fig. 56 et 57)

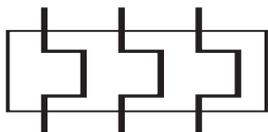
Ils assurent, par association avec un contacteur, la protection du moteur, de la ligne et de l'appareillage contre les surcharges faibles et prolongées. Ils sont donc conçus pour autoriser le démarrage normal des moteurs sans déclencher. Cependant, ils doivent être protégés contre les fortes surintensités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



↑ Fig. 56 Relais thermique de surcharge à bilames LRD (marque Telemecanique) et son symbole graphique

4. Démarrage et protection des moteurs

4.7 Les fonctions et les produits de protection



↑ Fig. 57 Vue interne d'un relais thermique de surcharge et détail d'un de ses bilames

Le principe du fonctionnement d'un relais thermique de surcharge repose sur la déformation de ses bilames chauffés par le courant qui les traversent.

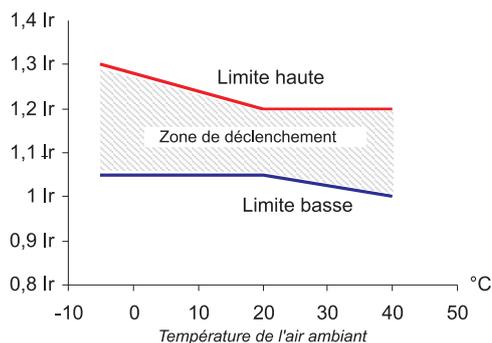
Au passage du courant les bilames se déforment et, suivant le réglage, provoquent l'ouverture brusque du contact du relais.

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 (⇒ Fig.58),
- à réarmement manuel ou automatique,
- 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 (⇒ tableau Fig. 59).



↑ Fig. 58 Zone de déclenchement pour les relais de surcharge thermique 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 Ir
	1 pôle : 0.9 Ir
> 2 h	2 pôles : 1.15 Ir
	1 pôle : 0

↑ Fig. 59 Limite de fonctionnement d'un relais de surcharge thermique différentiel (sensible à une perte de phase)

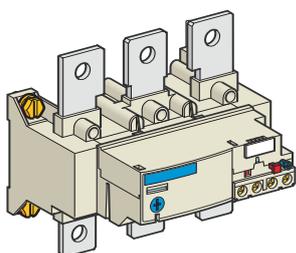
Couramment utilisé, ce relais offre une excellente fiabilité, et son coût est faible. Il est particulièrement recommandé s'il existe un risque de blocage du rotor. Il présente cependant les inconvénients de ne pas tenir compte de manière très précise de l'état thermique du moteur à protéger et d'être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

□ Les relais électroniques de surcharge (⇒ Fig. 60)

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, les déséquilibres et l'absence de phases), les relais électroniques de surcharge peuvent être complétés par des options telles que :

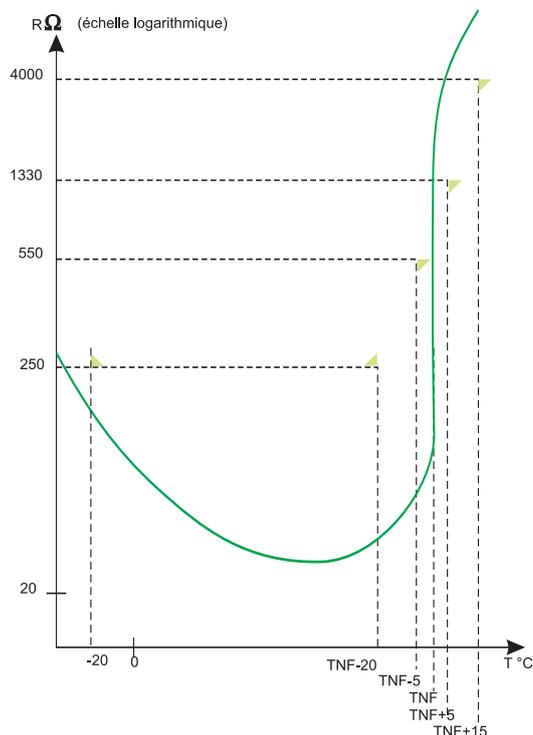
- le contrôle de la température par sondes CTP,
- la protection contre les blocages et les sur couples,
- la protection contre les inversions de phases,
- la protection contre les défauts d'isolement,
- la protection contre la marche à vide,
- etc.



↑ Fig. 60 Relais électronique de surcharge (LR9F - Telemecanique)

4. Démarrage et protection des moteurs

4.7 Les fonctions et les produits de protection



↑ Fig. 61 Balises ou « points de fonctionnement » des sondes à thermistance CTP

□ 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 : leur volume réduit 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 : ils sont composés de plusieurs éléments distincts. 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, etc.).

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 61*.

• Un dispositif électronique

Il est en alternatif ou en courant continu et 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) (⇒ Fig.62).

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 rebobineurs 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.



↑ Fig. 62 Dispositif électronique (LT3 - Telemecanique) à associer à trois sondes à thermistance, pour commander l'arrêt d'un moteur en dépassement de température

□ Les relais de surcouple : une protection complémentaire (⇒ Fig.63)

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.

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

• Les relais thermiques électromécaniques ou électroniques

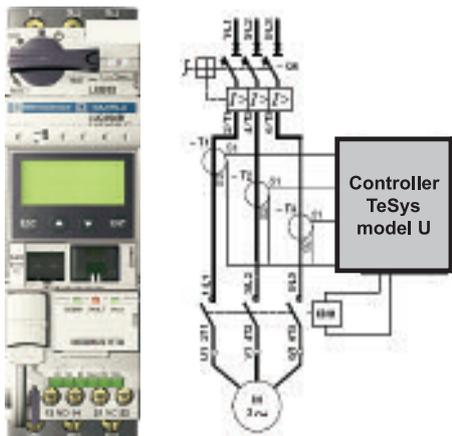
Ils protègent les moteurs à partir de la mesure du courant et s'avèrent suffisants pour les applications courantes, ils sont cependant limités lorsqu'il s'agit de prendre en compte les problèmes liés à la tension, à la température ou à des applications particulières. De plus de nouveaux besoins de gestion de production ou de maintenance sont apparus et ont incités les fabricants de matériel électrique à proposer de nouveaux produits permettant non seulement une protection adaptable mais aussi une gestion complète du moteur et de sa charge.



↑ Fig. 63 Relais de surcouple, marque Telemecanique

4. Démarrage et protection des moteurs

4.7 Les fonctions et les produits de protection



↑ Fig. 65 Relais multifonction séparé de la ligne puissance

• Le développement

Le développement de ces relais est possible grâce à l'utilisation conjointe des technologies suivantes :

- des capteurs de tension et de courant, ces derniers basés sur des concepts sans matériel magnétique (tores de Rogowsky) ont des temps de réponse très court et une excellente linéarité,
- une technologie électronique hybride analogique et numérique ayant une bonne puissance de traitement et de capacité mémoire,
- l'utilisation des bus de communications pour les échanges de données et le contrôle,
- des algorithmes performants de modélisation des moteurs,
- des programmes d'applications intégrées et paramétrables.

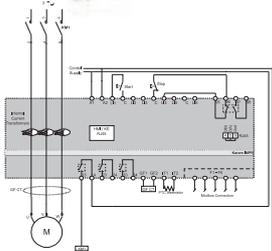
Ces nouvelles générations de produits permettent de réduire les coûts depuis la conception en simplifiant la programmation des automates jusqu'à l'exploitation en réduisant les coûts de maintenance et les temps d'arrêt.

Nous donnons ci-dessous une présentation rapide des solutions possibles ainsi qu'un guide de choix simplifié. Nous conseillons aux lecteurs de se reporter aux documents techniques de Schneider Electric qui présentent l'offre de manière exhaustive.

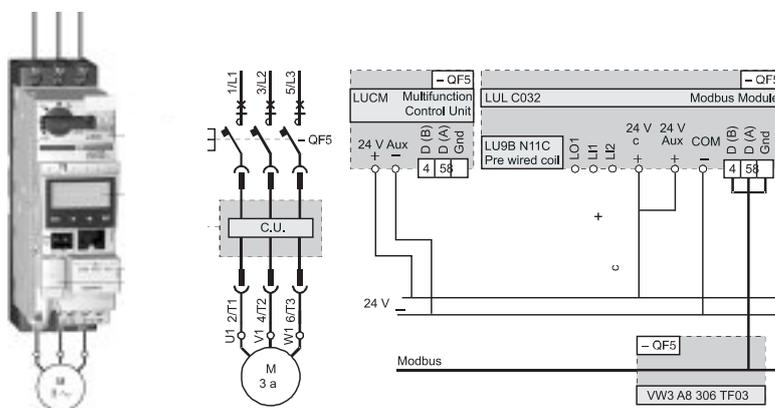
• Trois familles de produit

L'ensemble des relais multifonctions peut être illustré par trois familles de produits.

Solution 1 : relais multifonctions intégré au démarreur moteur (⇒Fig. 64). Cette solution présente l'avantage d'être très compacte avec un câblage réduit. Elle est limitée aux courants inférieurs à 32A.



↑ Fig. 66 Relais multifonction indépendant



↑ Fig. 64 Relais multifonction intégré au démarreur

Solution 2 : relais multifonction séparé de la ligne puissance et utilisant les blocs fonctions de la solution 1, il permet une association avec des organes de toute puissance (⇒Fig. 65).

Solution 3 : relais multifonction séparé de la ligne puissance et intégrant plusieurs entrées/sorties (⇒Fig. 66).

C'est la solution qui présente le plus de fonctionnalités.

Tableau de choix des relais de protection

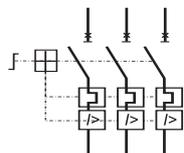
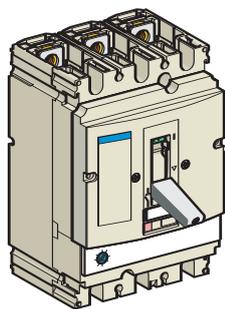
Un comparatif des principales fonctions des protections moteur est donné dans le tableau figure 67. Des informations plus complètes sont fournies dans les documentations techniques du constructeur.

4. Démarrage et protection des moteurs

4.7 Les fonctions et les produits de protection

Types de relais	Relais de surcharge (thermique ou électrique)	Relais à sondes PTC	Relais de surcouple	Relais multifonction		
				Intégré au démarreur	Contrôleur moteur séparé	Système de gestion de moteur séparé
Type de fonction						
Courant						
Classe de protection	10 et 20			5 à 20	5 à 20	5 à 30
Surintensité	++		+++	+++	+++	+++
Défauts de terre						
Déséquilibre de phases	++			++	++	+++
Blocage mécanique pendant / après le démarrage	+		++	++	++	+++
Marche à vide				module	module	+++
Tension et puissance						
Déséquilibre de tension						+++
Perte d'une phase						+++
Inversion de phase						+++
Sous tension						+++
Sur tension						+++
Puissance et facteur de puissance						+++
Température						
Sondes CTP				module	module	+++
Sondes PT100				module	module	+++
Logique						
Table de vérité				3 I/O	10 I/O	10 à 20 I/O
Temporisateur						++
Contrôle application						
Démarrage direct				+++	+++	+++
Inverseur				+++	+++	+++
Etoile triangle				+++	+++	+++
Part winding – deux vitesses					+++	+++
Exploitation / maintenance						
Diagnostic				+	+	+++
Historique				module	module	+++
Liaisons / communication						
Affichage local	+			module	module	+++
Affichage déporté par bus de communication				module	module	+++
Contrôle / commande par bus de communication				module	module	+++

↑ Fig. 67 Tableau des protections moteur



↑ Fig. 68 Disjoncteur-moteur (GV7 - Telemecanique) et son symbole graphique

■ 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 et du relais de surcharge. Il satisfait aux normes CEI 60947-2 et 60947-4-1 (⇒ Fig. 68).

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.

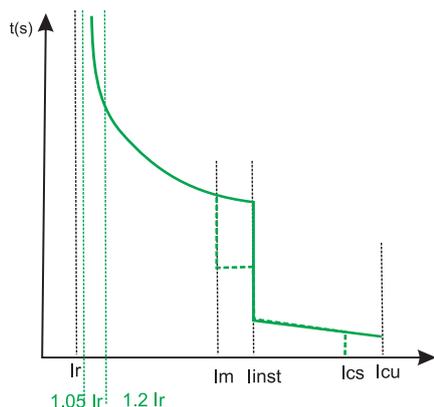
Leurs éléments thermiques (protection contre les surcharges) sont compensés contre les variations de la température ambiante. Le seuil de protection thermique est quant à lui réglable en face avant du disjoncteur. Sa valeur doit correspondre au courant nominal du moteur à protéger.

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_r).



↑ Fig. 69 Zones de fonctionnement d'un disjoncteur magnétothermique

Cette courbe comporte quatre zones (⇒ Fig. 69) :

- la zone de fonctionnement normal. Tant que $I < I_r$, il n'y a pas de déclenchement,
- la zone des surcharges thermiques. 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, 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 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,

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.

■ Conclusion

La protection des moteurs est une fonction essentielle pour la continuité du fonctionnement des machines. Le choix du dispositif de protection doit être fait avec rigueur. L'utilisateur aura tout intérêt à sélectionner les dispositifs intégrant une électronique de communication pour anticiper et prévenir les éventuels défauts. La recherche d'anomalies et la rapidité de remise en route seront ainsi grandement améliorées.