

Chapitre III : Démarrage et Freinage de moteurs asynchrones

- 1- Démarrage des moteurs à induction.
- 2- Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés.
- 3- Services types (régimes de fonctionnement des moteurs asynchrones).

Cette partie est exclusivement consacrée au démarrage, au freinage des moteurs asynchrones de tous types. Pour un descriptif physique et électrique des moteurs, veuillez consulter la partie 'moteur :schéma équivalent et caractéristique mécanique'. Cette partie 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 la partie consacrée à cette fonction.

III.1 Démarrage des moteurs à induction

1.1 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. 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.

1.2 Les principaux modes de démarrage Introduction

1.2.1 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.

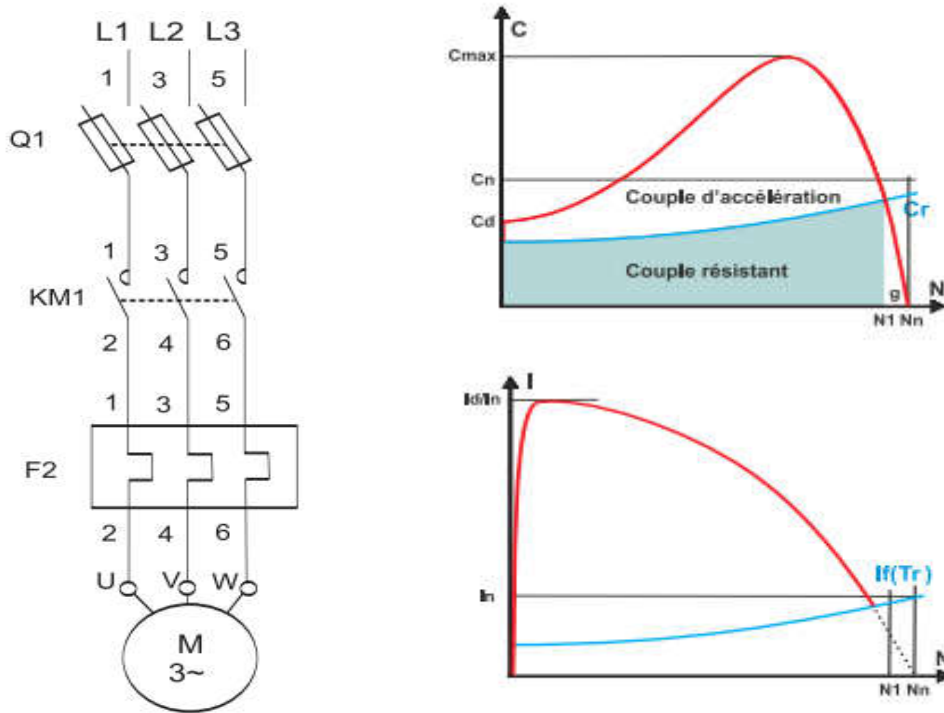


Fig.1 Démarrage direct

1.2.2 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.

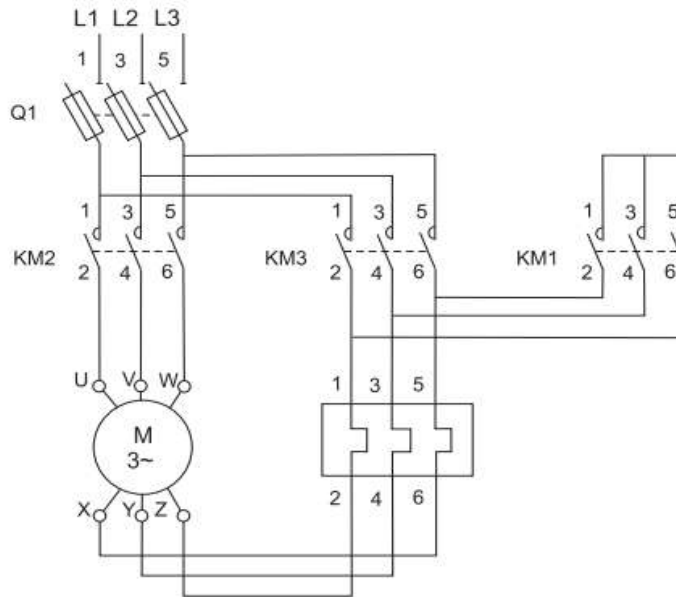


Fig.2 Démarrage étoile triangle

1.2.3 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.

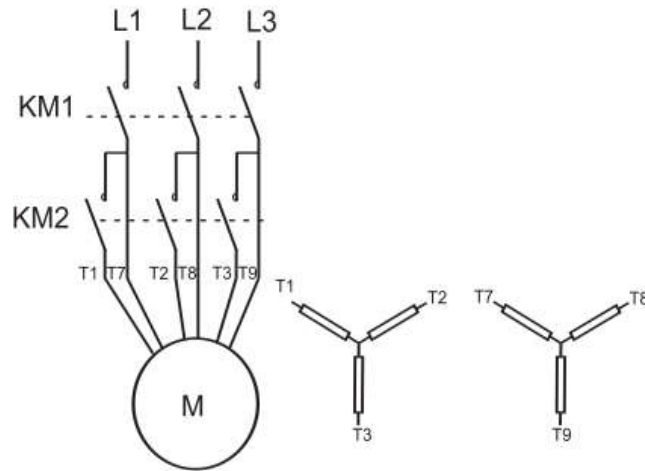


Fig.3 Démarrage à enroulement partagé

1.2.4 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.

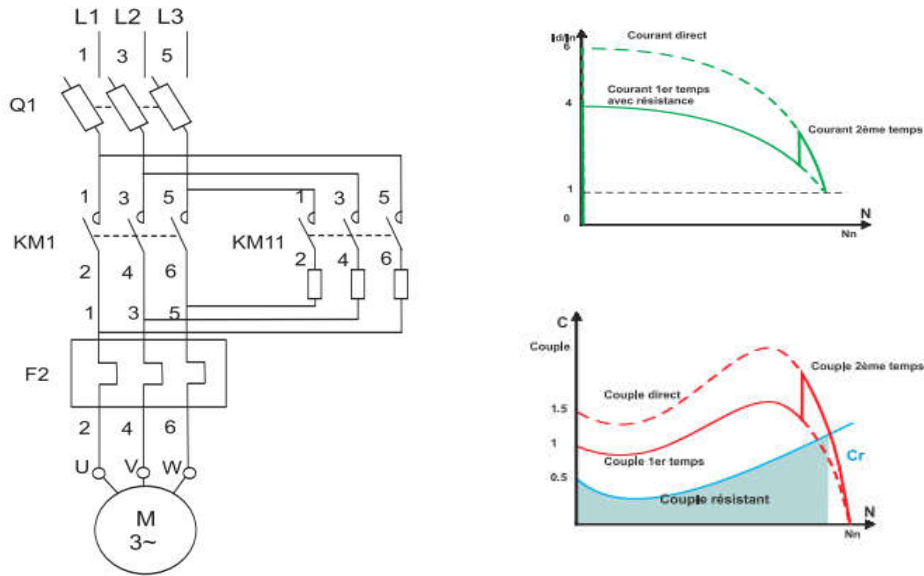


Fig.4 Démarrage statorique par résistance

1.2.5 Démarrage par autotransformateur

Le moteur est alimenté sous tension réduite par l'intermédiaire d'un autotransformateur qui est mis hors circuit quand le démarrage est terminé (Fig.5). Le démarrage s'effectue en trois temps :

- au premier temps, l'autotransformateur est d'abord couplé en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers une partie des enroulements de l'autotransformateur. Le démarrage s'effectue sous une tension réduite qui est fonction du rapport de transformation. L'autotransformateur 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'autotransformateur en série avec le moteur est court-circuitée, puis l'autotransformateur 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'autotransformateur 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'autotransformateur. Ce courant magnétisant augmente l'appel de courant dans le réseau lors de la mise sous tension de l'autotransformateur. 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'autotransformateur.

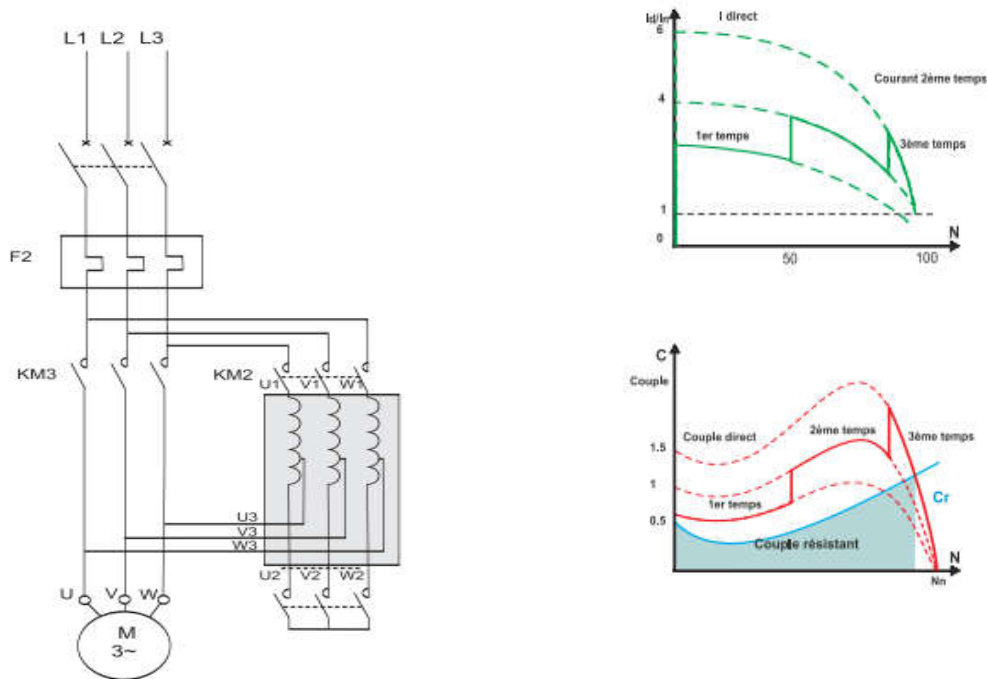


Fig.5 Démarrage par auto-transformateur

1.2.6 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.

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.).

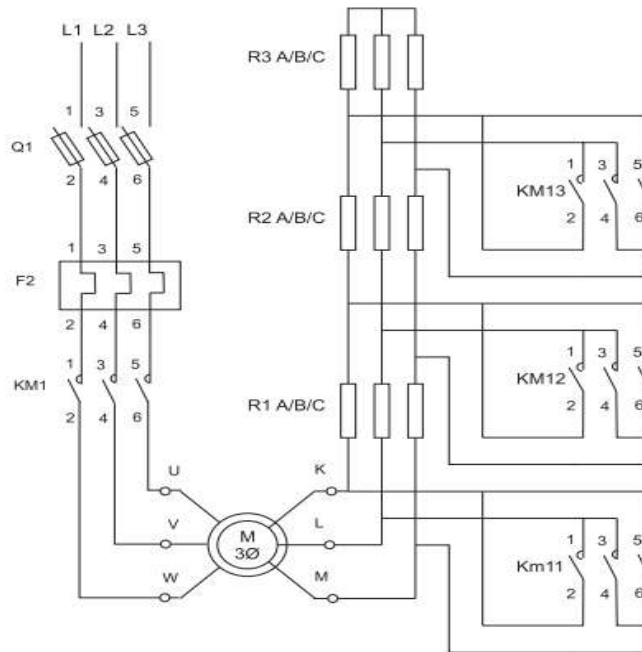


Fig.6 Démarrage d'un moteur à bagues

1.2.7 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. Il peut être utilisé :

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

Le contrôle par limitation de courant permet de fixer un courant maximum ($3 \text{ à } 4 \times I_n$) 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).

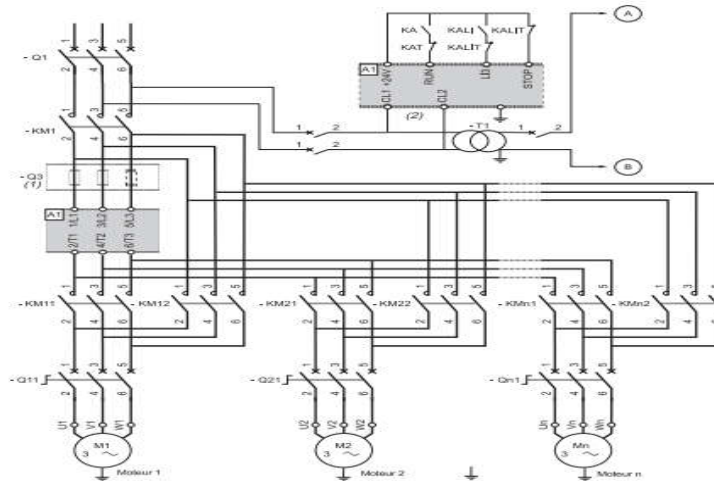


Fig.7 Démarrage multi-moteurs avec un démarreur électronique

1.2.8 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. 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.

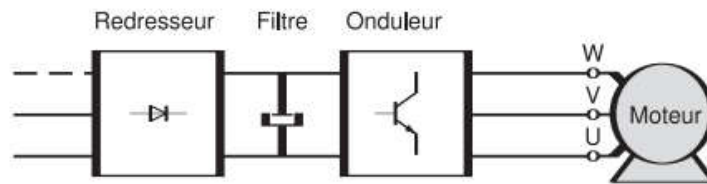


Fig.8 Schéma de principe d'un convertisseur de fréquence

Tableau récapitulatif des différents modes de démarrage des moteurs triphasés

	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

1.3 Démarrage des moteurs asynchrones monophasés

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

1.3.1 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.

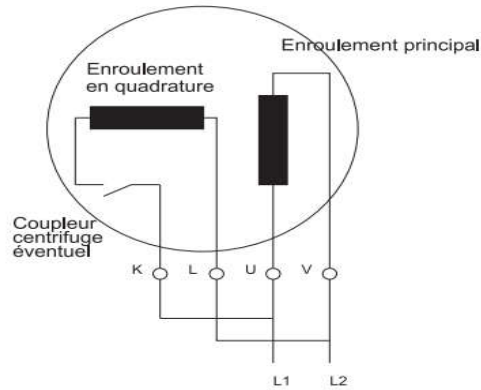


Fig.9 Moteur monophasé à phase auxiliaire

1.3.2 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.

1.3.3 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.

1.3.4 Démarrage par phase auxiliaire et condensateur

C'est le dispositif le plus utilisé (Fig.10). Il consiste à placer un condensateur dans la phase auxiliaire. La valeur pratique de la capacité pour le condensateur permanent est d'environ $8 \mu\text{F}$ pour un moteur de 200 W. Pour le démarrage, un condensateur supplémentaire de $16 \mu\text{F}$ 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.10) 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.

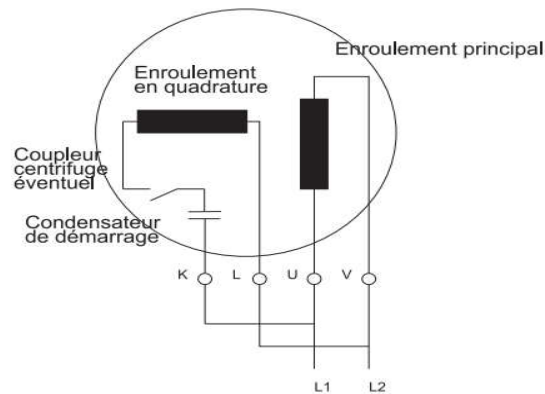


Fig.10 Moteur monophasé à condensateur de démarrage

1.3.5 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.

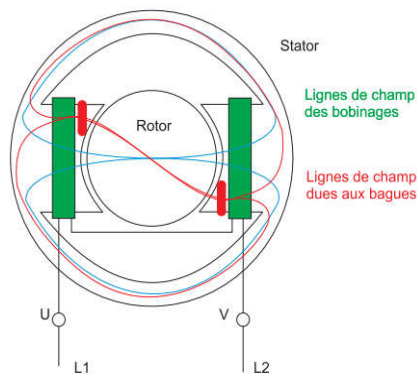


Fig.11 Moteur à bagues de déphasage

III.3 Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés

3.1 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.

3.2 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.

3.2.1 Moteur à cage

Avant d'adopter ce système (Fig.12), 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.

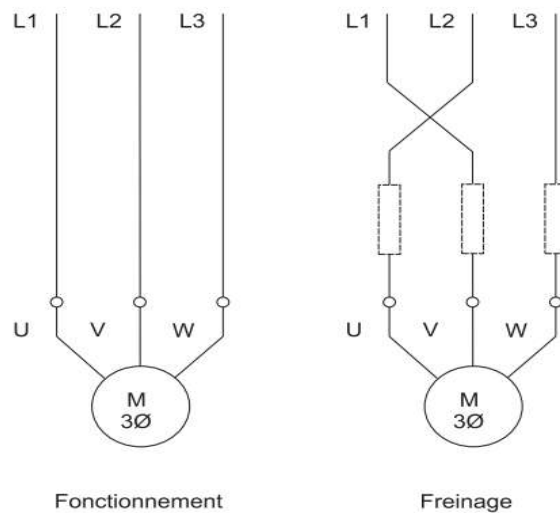


Fig.12 Principe du freinage à contre courant

3.2.2 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.13). 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.

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).

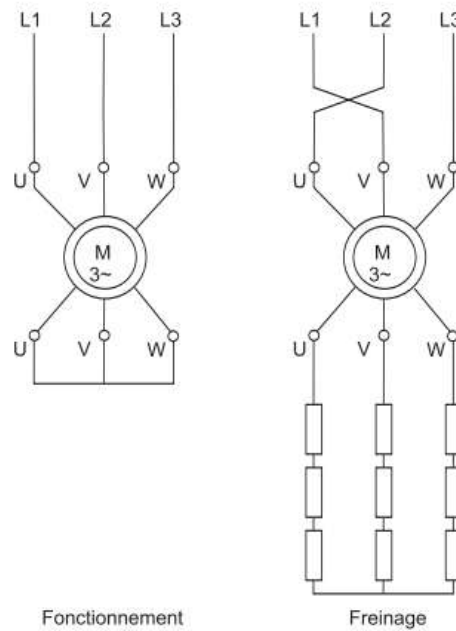


Fig.13 Principe du freinage à contre courant pour une machine asynchrone à bagues

3.3 Freinage par injection de courant redressé

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage (Fig.14). 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 entraînant, le moteur ne redémarre pas en sens inverse,
- si la charge est entraînant, 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.

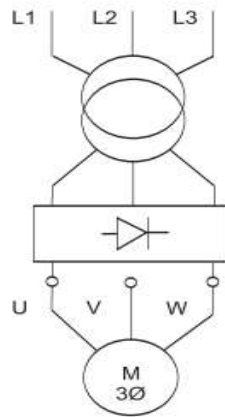


Fig14. Principe du freinage à courant continu pour une machine asynchrone

3.4 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.

3.5 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.

3.6 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.

3.7 Inversion du sens de marche

L'inversion du sens de marche des moteurs asynchrones triphasés (*Fig.15*) 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.

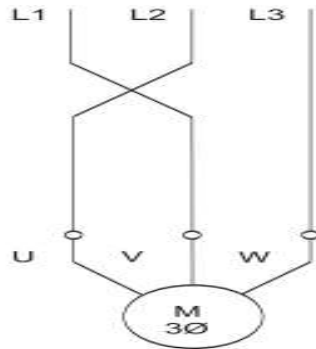


Fig.15 Principe d'inversion du sens de marche d'un moteur asynchrone

III.4 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.

4.1 Service continu - service type S1 (Fig.16)

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

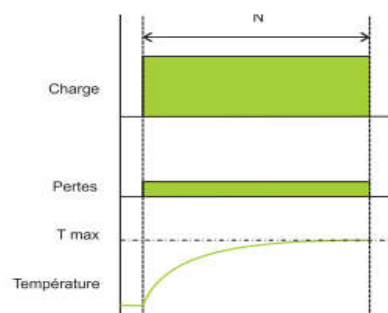


Fig.16 Service continu/Service S1

4.2 Service temporaire - service type S2 (Fig.17)

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.

4.3 Service intermittent périodique - service type S3 (Fig.18)

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.

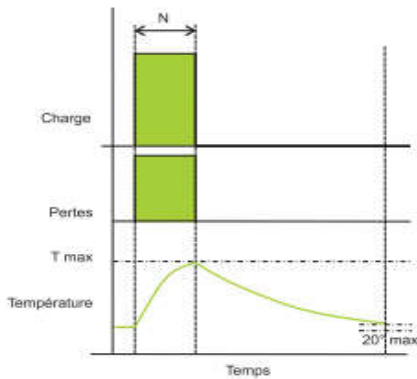


Fig.17 Service intermittent/Service S2

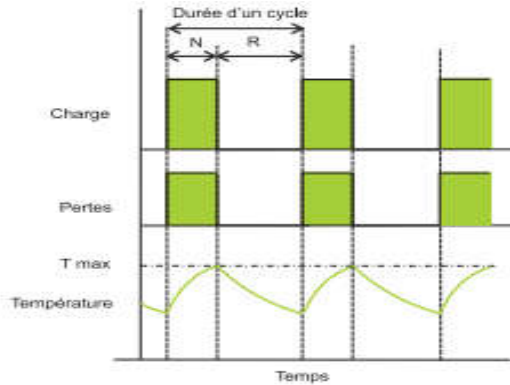


Fig.18 Service intermittent périodique/Service S3

3.4 Service intermittent périodique à démarrage - service type S4 (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.

3.5 Service intermittent périodique à freinage électrique – service type S5 (Fig.20)

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.

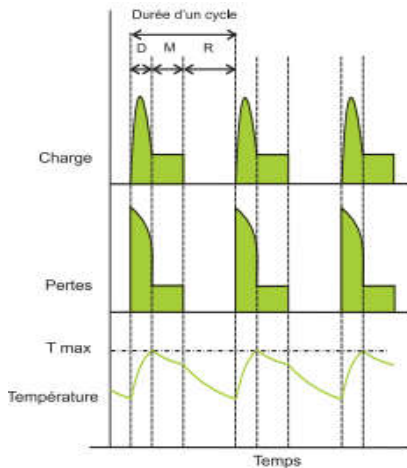


Fig.19 Service intermittent périodique à démarrage/Service S4

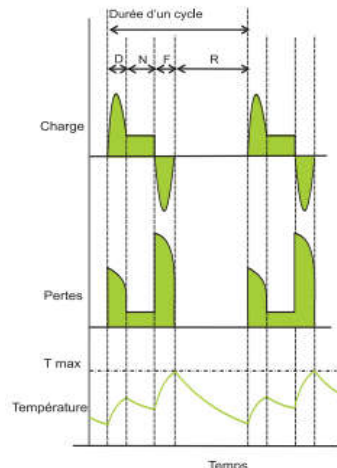


Fig.20 Service intermittent périodique à freinage électrique/Service S5

3.6 Service ininterrompu périodique à charge intermittente – service type S6 (Fig.21)

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.

3.7 Service ininterrompu périodique à freinage électrique – service type S7 (Fig.22)

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.

3.8 Service ininterrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse - service type S8 (Fig.23)

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.

3.9 Service à variations non périodiques de charge et de vitesse - service type S9 (Fig.24)

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.

3.10 Service à régimes constants distincts – service type S10 (Fig.25)

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).

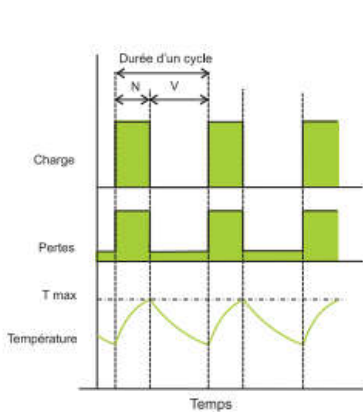


Fig.21 Service interrompu périodique à charge intermittente/Service S6

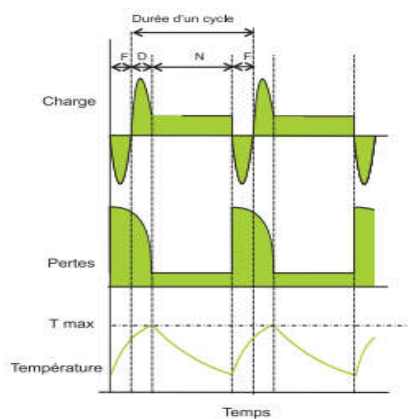


Fig.22 Service interrompu périodique à freinage électrique/Service S7

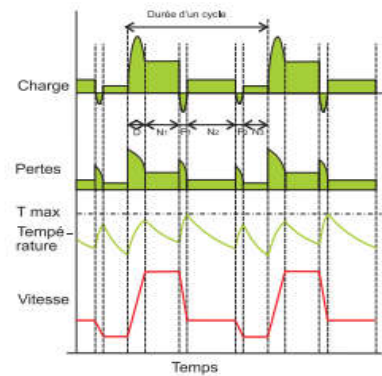


Fig.23. Service interrompu périodique à changements liés de charge et de vitesse/Service S8

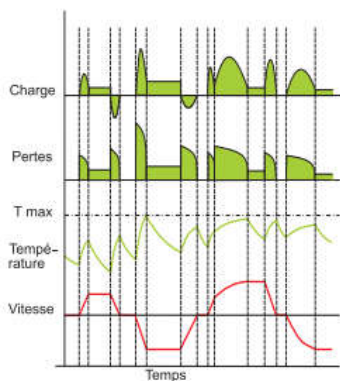


Fig.24 Service à variations non périodiques de charge et de vitesse/Service S9

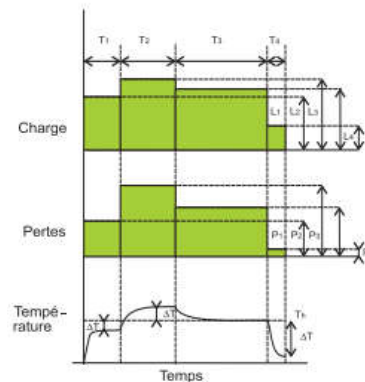


Fig.25 Service à régimes constants distincts/Service S10