

La tension en sortie moyenne du redresseur s'exprime par la relation :

$$U_r = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \sqrt{2}}{\pi}$$

soit encore

$$U_r = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_2}{\pi}$$

en remplaçant  $U_2$  on obtient

$$U_r = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot g \cdot K_1 \cdot U_1$$

par ailleurs, la tension contrôlée par le pont onduleur est :

$$U_r = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} \cdot K_2 \cdot U_1 \cdot \cos \alpha$$

avec  $\left\{ \begin{array}{l} K_2 \text{ le rapport de transformation du transformateur} \\ \alpha \text{ l'angle de retard au débloqué des thyristors} \end{array} \right.$

Or, puisque  $U_r = -U_o$ , on obtient finalement la relation entre le glissement et l'angle de retard au débloqué des thyristors :

$$g = -\frac{K_2}{K_1} \cdot \cos \alpha$$

L'angle  $\alpha$  peut être réglé de  $90^\circ$  à  $150^\circ$  environ, ce qui conduit à une variation de  $\cos \alpha$  de 0 à  $\sqrt{3}/2$  soit :

- pour  $\alpha = 90^\circ$  on obtient  $g = 0 \Rightarrow \Omega = \Omega_s$  et ,
- pour  $\alpha = 150^\circ$  on obtient  $g = g_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{K_2}{K_1} \Rightarrow \Omega = \Omega_{\min}$

Le transformateur est choisi avec un rapport de transformation permettant le glissement maximal souhaité. La récupération de l'énergie rotorique assure un excellent rendement, voisin de celui du moteur seul. Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il y a nécessité de le relever avec une batterie de condensateurs. La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques qui amène le moteur dans la zone de fonctionnement normal.

## 8.5.16. Freinage électrique des moteurs asynchrones triphasés

### 8.5.16.1. Généralités

Dans un grand nombre d'applications où la charge n'est pas entraînant, l'arrêt du moteur est obtenu simplement par décélération naturelle après la coupure de l'alimentation du stator. Le temps de décélération dépend alors uniquement de l'inertie de la machine entraînée et des frottements de la chaîne cinématique. Mais, lorsque l'application comporte une charge entraînant ou lorsqu'il est nécessaire de réduire ce temps d'arrêt naturel et d'en maîtriser la durée, il est nécessaire de recourir à un dispositif de freinage. Le freinage électrique apporte dans ce cas une solution efficace et simple.

Par rapport aux freinages mécanique et hydraulique, il offre l'avantage d'être régulier et de ne mettre en œuvre aucune pièce d'usure.

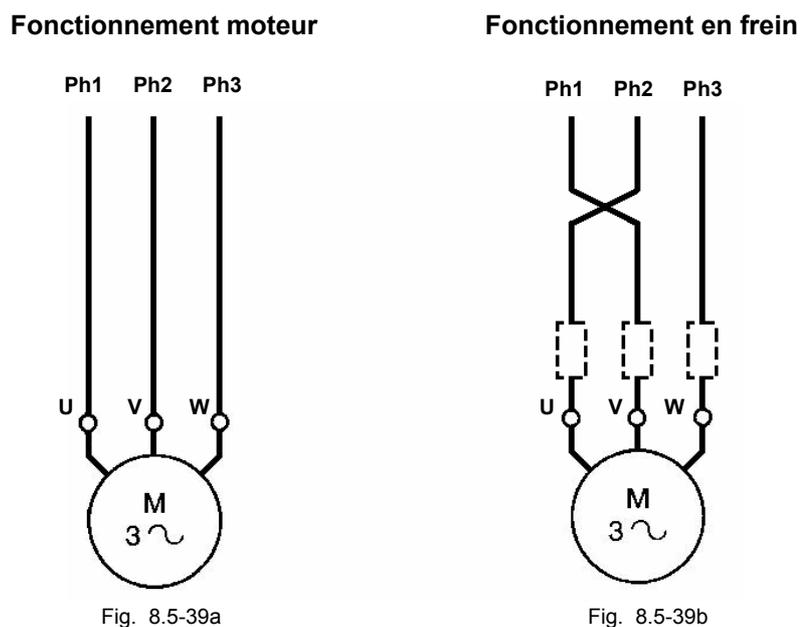
### 8.5.16.2. Freinage électrique par contre-courant

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 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, etc.

#### Moteur à cage

Le schéma de principe de ce système est représenté par la figure ci-dessous.



Avant d'adopter ce système, il faut absolument s'assurer que le moteur est capable de supporter de 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.

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

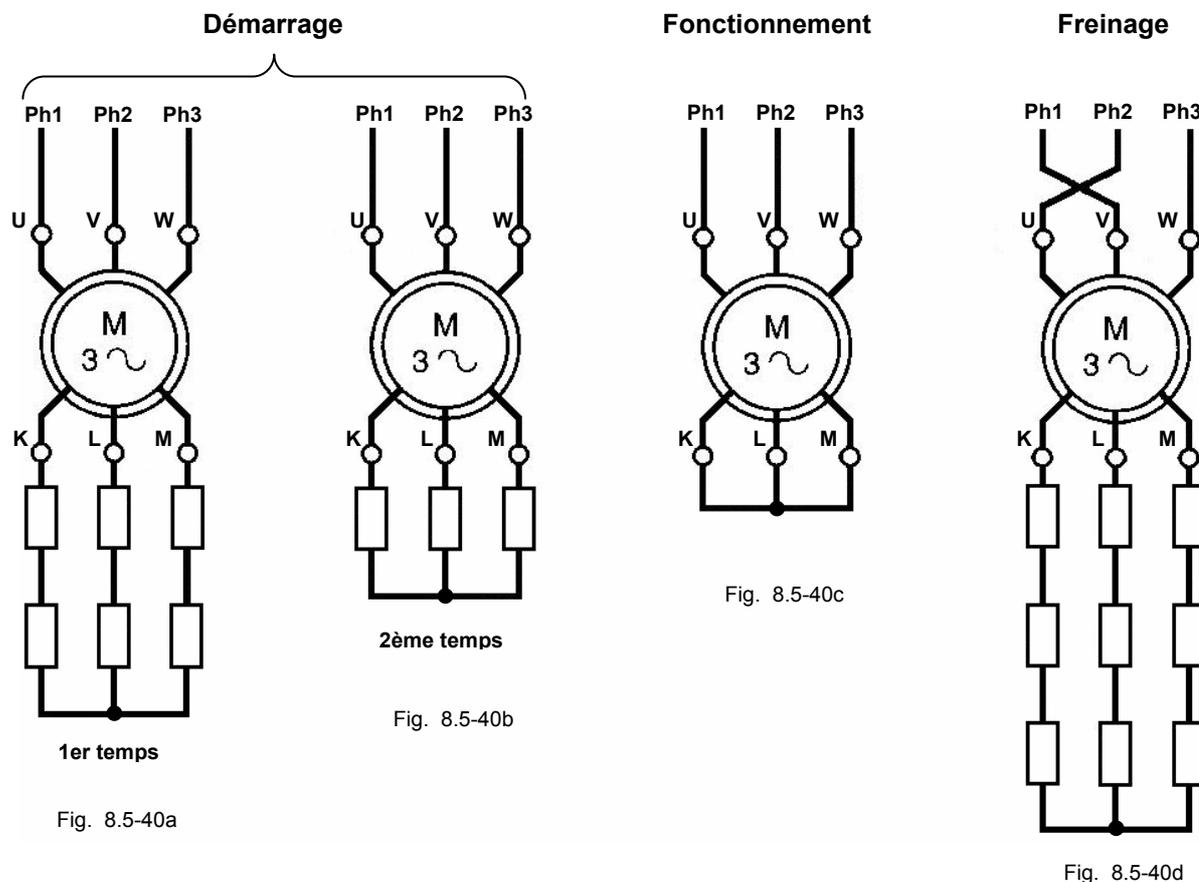
#### Moteur à bagues

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.

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.

Le schéma de principe illustrant les différentes phases de fonctionnement d'un moteur à bagues avec freinage par contre courant est donné par les figures ci-dessous.



Comme pour les moteurs à cage, une énergie importante est produite dans le circuit rotorique. Elle est dissipée en grande partie dans les résistances rotoriques externes.

La commande automatique de l'arrêt à la vitesse nulle peut être faite par l'un des dispositifs cités précédemment, 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).

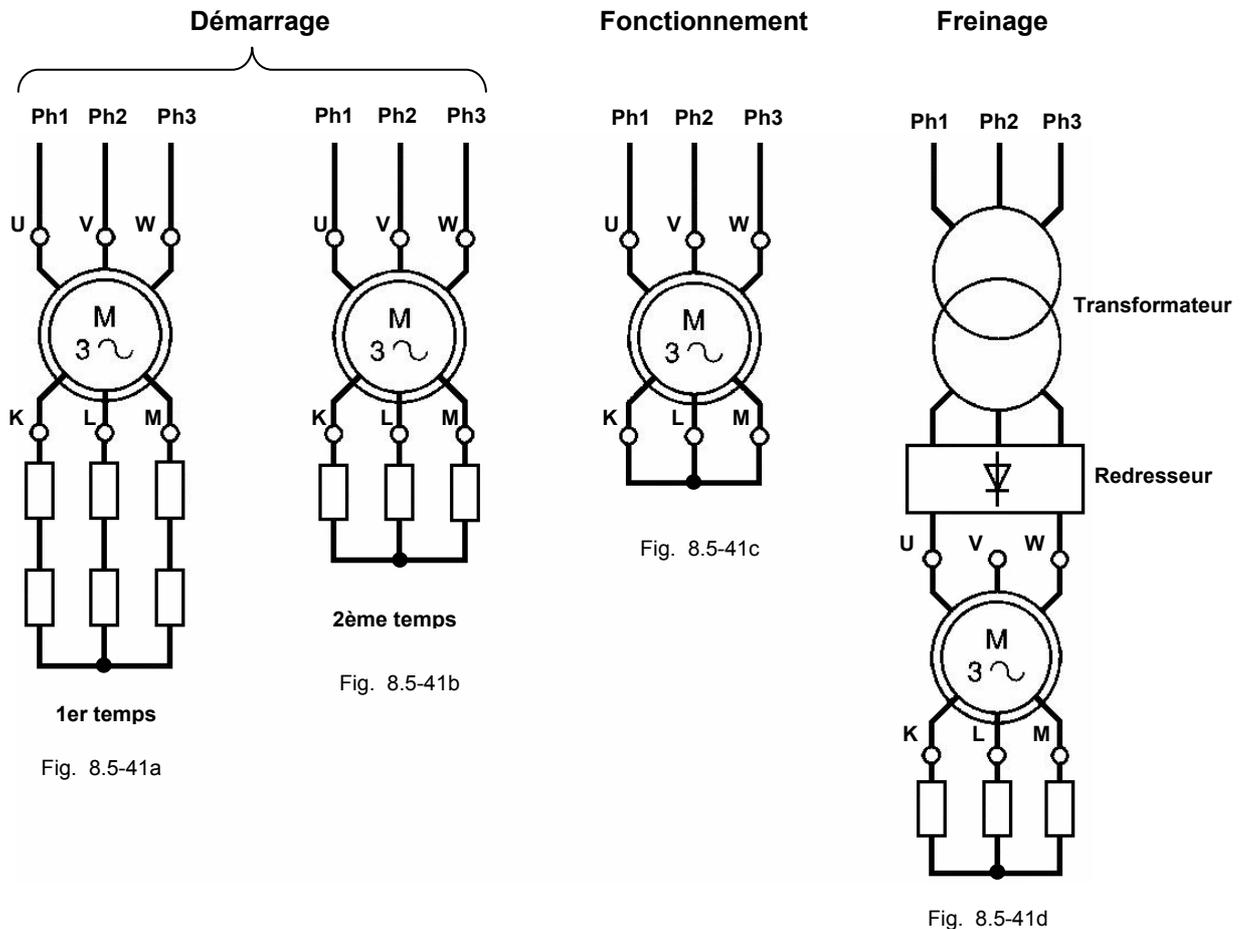
### 8.5.16.3. Freinage électrique par injection de courant continu

Ce mode de freinage est utilisé sur les moteurs à bagues et à cage. Par rapport au système à contre-courant, le coût 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'espace. 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 schéma de principe illustrant les différentes phases de fonctionnement d'un moteur à bagues avec freinage par injection de courant continu est donné par les figures ci-dessous.



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 entraînante, le moteur ne redémarre pas en sens inverse,
- si la charge est entraînante, le système fournit un freinage permanent qui retient cette charge à faible vitesse. 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.

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

#### 8.5.16.4. Freinage électrique par fonctionnement hypersynchrone

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 retenue 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 hypersynchrone se rencontre également sur les moteurs à plusieurs vitesses lors du passage à la grande vitesse.

#### 8.5.16.5. Autres systèmes de freinage

On rencontre encore parfois le freinage en monophasé qui consiste à alimenter le moteur par deux phases du réseau. A vide, la vitesse est nulle. Ce fonctionnement s'accompagne de déséquilibres et de pertes importantes.

Citons également le freinage par ralentisseur à courants de Foucault. 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.

### 8.5.17. Variation de vitesse par action sur la fréquence

#### 8.5.17.1. Généralités

La variation de vitesse des moteurs alternatifs s'effectue de plus en plus par la variation de fréquence de la tension appliquée aux bornes du stator des moteurs asynchrones à cages.

Ce type de convertisseur statique permet un fonctionnement du moteur avec un couple maximal, par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension statorique, avec conservation d'un rapport  $U/f$  constant illustré par la figure ci-dessous.

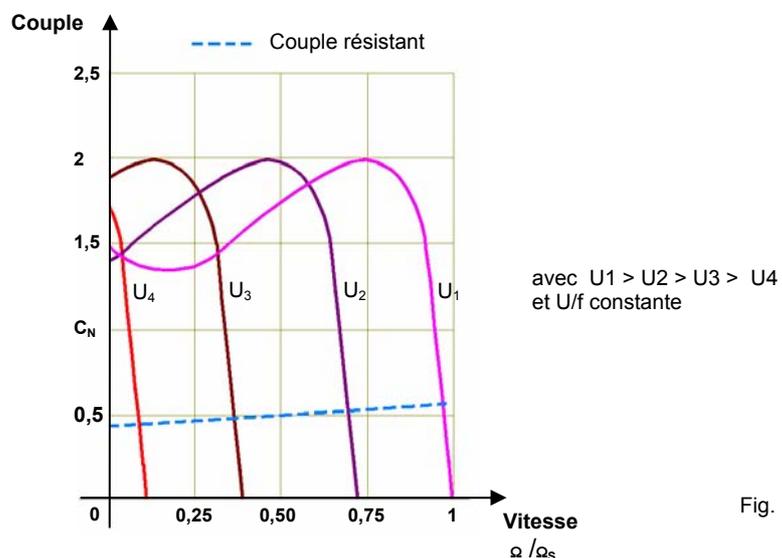


Fig. 8.5-42

Les progrès considérables réalisés dans les composants électroniques, en particulier en matière de microprocesseurs, permettent de réaliser aujourd'hui des commandes performantes à coût réduit dont les caractéristiques couple - vitesse deviennent semblables à celles obtenues avec des moteurs à courant continu.

Par rapport aux autres solutions, cette méthode de variation de vitesse appliquée aux moteurs à cage présente, entre autres avantages :

- d'améliorer l'exploitation des processus en assouplissant la conduite des machines,
- d'optimiser la consommation d'énergie,
- d'augmenter la sécurité et la disponibilité des entraînements.

Pour obtenir les tensions de valeur et fréquence variables aptes à être appliquées au stator d'un moteur à partir d'une tension de valeur et fréquence fixe, différents types de convertisseurs existent. On distingue deux familles :

- les **convertisseurs directs** qui construisent les tensions de sortie par échantillonnage convenable des tensions d'entrée, ce sont les cycloconvertisseurs (cette technique n'a quasiment jamais été utilisée en levage),
- les **convertisseurs indirects** qui redressent les tensions du réseau puis onduulent celles-ci à la fréquence voulue. Ces convertisseurs se répartissent en deux sous familles :
  - les convertisseurs à onde de courant
  - les convertisseurs à onde de tension

Le choix entre ces différentes solutions dépend :

- de la puissance de l'entraînement
- de la gamme des fréquences à réaliser
- des réversibilités à assurer (2 ou 4 quadrants de fonctionnement)

Dans cet ouvrage, nous nous limiterons à présenter quelques types de convertisseurs indirects rencontrés dans les applications de levage.

### 8.5.17.2. Convertisseurs à onde de tension

#### Principe

L'onduleur à onde de tension se prête très bien à l'alimentation du moteur asynchrone. A cause de son inductance, celui-ci supporte sans mal les discontinuités des tensions qui lui sont appliquées.

La figure ci-dessous donne le schéma équivalent à ce type de variateur de vitesse lorsqu'il est alimenté par le réseau industriel.

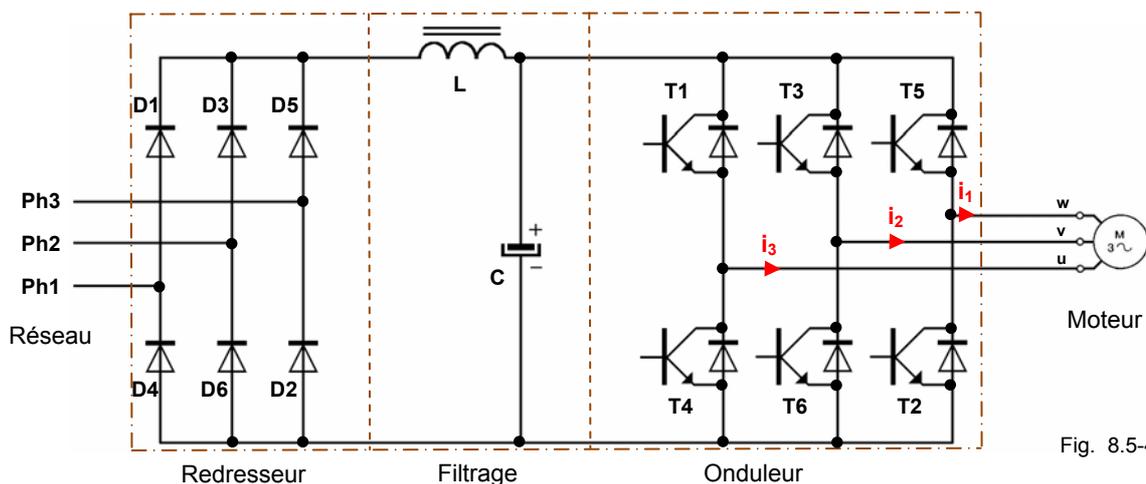


Fig. 8.5-43

On trouve successivement:

- un étage redresseur composé ici de six diodes montées en pont de Graëtz,
- un filtre L-C, associé au pont redresseur qui permet d'obtenir une tension de même valeur moyenne que celle délivrée par le redresseur mais d'ondulation négligeable,
- un onduleur de tension formé de six transistors T1 à T6 fonctionnant en "tout ou rien" équipés chacun d'eux d'une diode montée en parallèle inverse afin de permettre la réversibilité en courant.
- le moteur asynchrone dont les phases absorbent les courants  $i_1, i_2, i_3$  ayant un taux d'harmoniques très inférieur à celui des tensions fournies par l'onduleur par un découpage approprié de la tension de sortie. Il se comporte ainsi comme un filtre passe bas.

### Les techniques de modulation

Les onduleurs utilisés dans les applications de manutention - levage, sont à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) encore appelé PWM en anglais (Pulses Width Modulation). Chaque phase d'un tel onduleur est constituée par deux hacheurs, un par polarité. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable suivant la loi de modulation choisie.

Cette technique, assure une rotation régulière et sans à-coups des machines, y compris à basse vitesse, grâce à une forme de courant de sortie très proche de la sinusoïde. Elle permet, en plus de la variation de fréquence :

- ❖ de faire varier la valeur du fondamental des tensions de sortie, c'est-à-dire de faire varier les tensions efficaces appliquées au stator en fonction de la vitesse alors que la tension en sortie du filtre après le redresseur reste constante.
- ❖ de repousser vers les hautes fréquences les harmoniques des tensions de sortie. La réactance présentée par le moteur étant croissante avec le rang des harmoniques, on peut ainsi obtenir des courants statoriques pratiquement sinusoïdaux.

L'ajustage de la largeur des impulsions et leur répétition permet d'ajuster l'alimentation du moteur en tension et en fréquence pour conserver un rapport  $U/f$  constant afin de maintenir le flux désiré dans le moteur.

Les lois de modulation sont nombreuses. Nous en présenterons dans cet ouvrage deux types que l'on rencontre fréquemment dans les applications de levage :

- La modulation sinus-triangle.

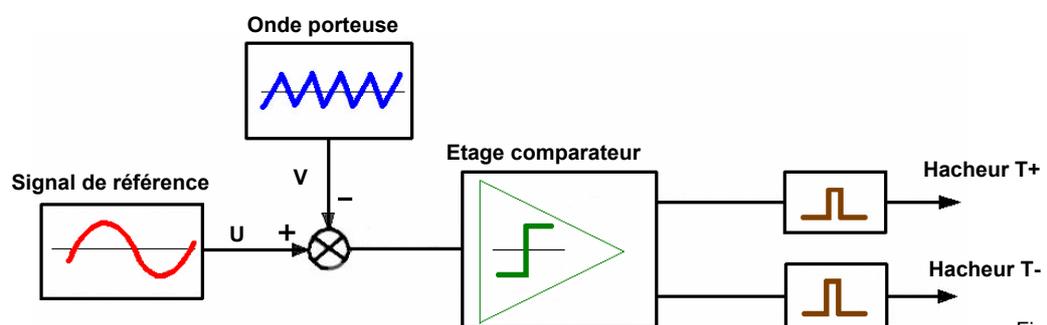


Fig. 8.5-44

Comme le montre la figure ci-dessus, la modulation sinus-triangle consiste à comparer :

- une tension de référence sinusoïdale (signal U), image de la tension de sortie recherchée, ayant la fréquence de la tension désirée ( $f_u$ ) et une amplitude proportionnelle à celle-ci, avec
- une onde de modulation triangulaire (signal V) de fréquence ( $f_v$ ) nettement plus élevée. Ce signal triangulaire est appelé porteuse.

La sortie du comparateur permet, par l'intermédiaire de transistors de puissance, le pilotage d'une phase de la machine.

Ce principe, décrit pour une phase s'applique naturellement au montage triphasé. Dans ce cas, un générateur d'onde triangulaire délivre aux trois phases la porteuse commune, et le signal de référence, propre à chaque phase, est constitué par trois références déphasés de  $120^\circ$ .

Les intersections des deux ondes donnent en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des semiconducteurs commandés (voir la figure 8.5-45 avec  $m = f_v / f_u = 9$ ).

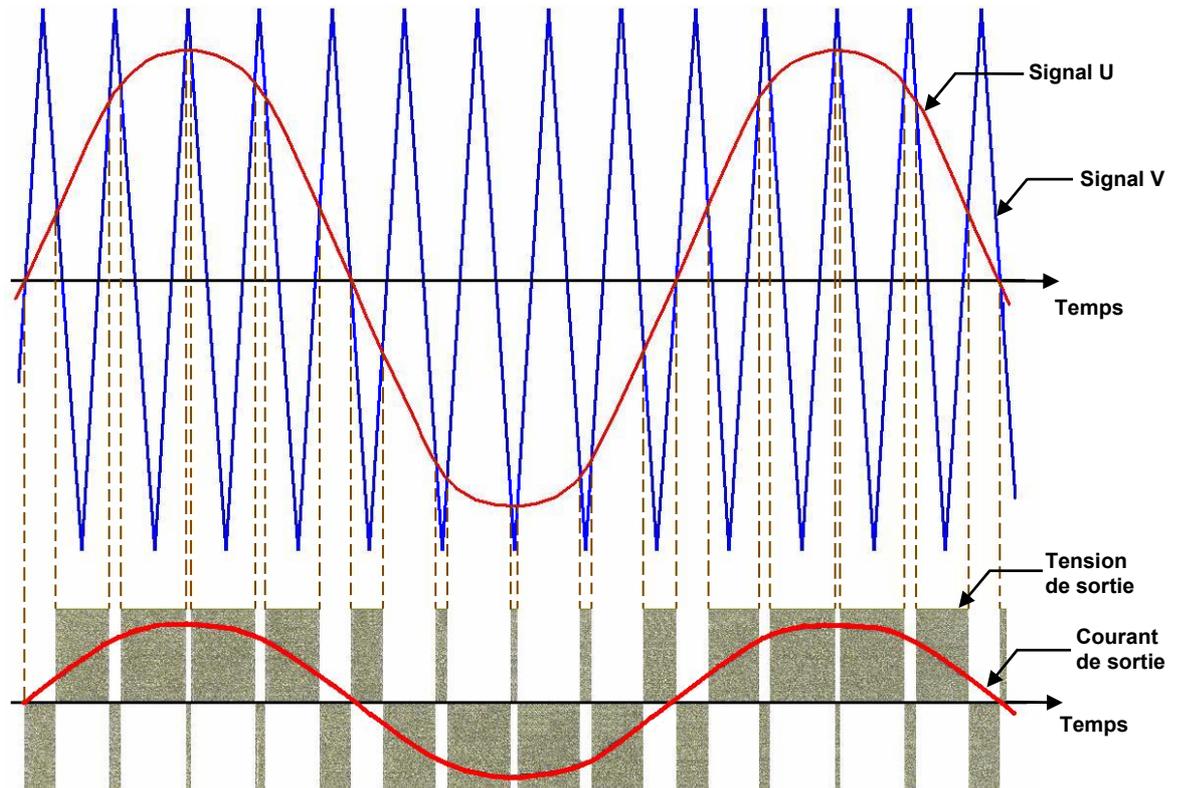


Fig. 8.5-45

La figure suivante donne un exemple de l'allure des courants et tensions (onduleur monophasé) pour des rapports de modulation différents :

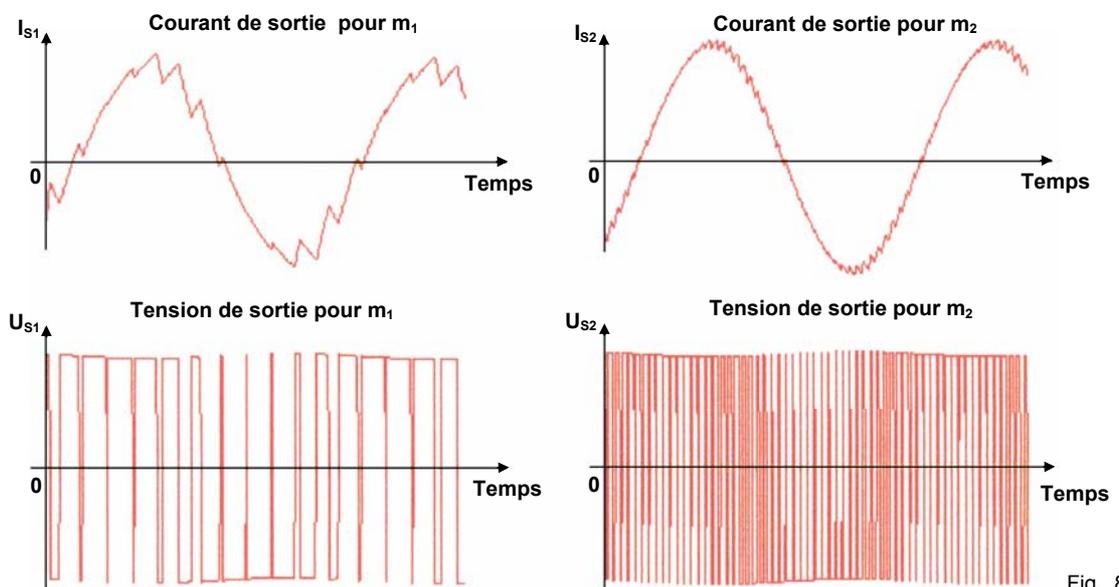


Fig. 8.5-46

➤ Modulation vectorielle

Dans ce type de modulation, on représente les trois tensions sinusoïdales désirées par un seul vecteur. Celui-ci a une amplitude proportionnelle à la valeur de ces tensions et tourne à une vitesse angulaire égale à leur pulsation. On détermine, à chaque instant, la meilleure façon d'approximer ce vecteur à partir des vecteurs représentant les diverses valeurs que peuvent donner aux tensions les états passants ou bloqués des semi-conducteurs du pont onduleur. Cette commande, en temps réel, est de plus en plus utilisée car elle s'intègre naturellement dans les systèmes de régulation des moteurs asynchrones, surtout si l'on utilise le pilotage par la commande vectorielle du flux.

Le pilotage par contrôle vectoriel de flux

Nous savons que le couple instantané est donné par le produit du flux inducteur  $\Phi$  par le courant induit  $I$ . Pour obtenir des performances dynamiques élevées avec un moteur, il faut agir directement sur le couple instantané. C'est en particulier le cas dans les entraînements des mouvements verticaux des engins de levage lorsqu'il y a un transfert de couple très rapide du frein vers le rotor du moteur au moment de la phase de desserrage du frein.

Avec le moteur à courant continu le contrôle de cette situation est facilité par la séparation naturelle liée à la structure de la machine, des commandes du flux et du courant induit. Dans ce cas, si l'on maintient le flux  $\Phi$  constant, le couple instantané est directement proportionnel au courant induit  $I$ .

Sur une machine asynchrone à cage, la complexité de ce type de commande vient du fait qu'on ne dispose que des bornes des enroulements statoriques, pour maîtriser au niveau du rotor, le flux et le courant actif, ces deux grandeurs étant fortement couplées.

Pour obtenir des performances dynamiques avec un moteur asynchrone comparables à celles d'un moteur à courant continu, il est nécessaire de découpler la commande du flux à celle du courant. C'est la méthode dite "à flux orienté" ou à "commande vectorielle".

Celle-ci fait appel à un développement mathématique complexe " transformation de Park" (voir annexe A8.3) montrant que les courants statoriques triphasés peuvent se décomposer en un système de courants biphasés  $I_q$  et  $I_d$  décalés de  $90^\circ$  et de même fréquence que celle de la tension d'alimentation du stator.

Le pilotage à flux orienté réside dans le contrôle des courants dans ces bobines fictives D et Q :

- $I_q$  pour la production du couple
- $I_d$  pour la production du flux

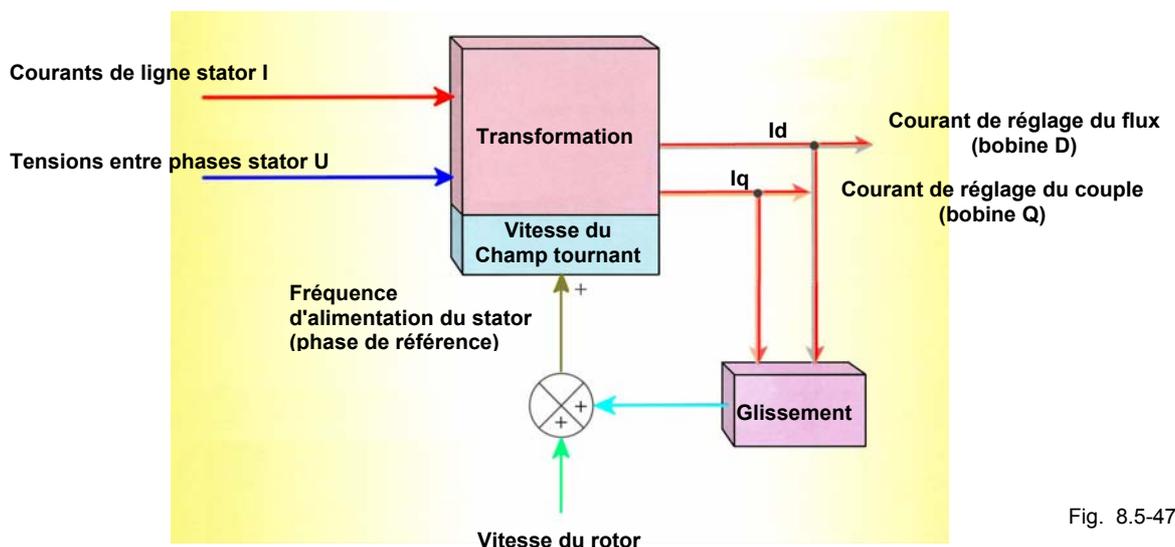


Fig. 8.5-47

Ces courants  $I_q$  et  $I_d$  sont, comme dans une machine à courant continu, les deux variables de réglage. Le passage des grandeurs sinusoïdales triphasées aux grandeurs de réglage (et le passage inverse) s'effectue par un traitement électronique numérique rapide (microprocesseur et ASIC) qui utilise une phase de référence : la position du champ tournant. Celle-ci est obtenue par la mesure de la position du rotor à partir des informations délivrées par un codeur ou un resolver. A cette position, mesurée ou parfois estimée par des algorithmes de traitement complexes, on ajoute la prédétermination de la position relative du champ tournant par rapport au rotor qui résulte du glissement.

Le reste de la commande peut être très classique et s'apparenter à celle de machines courant continu. Un régulateur de vitesse en général PID (proportionnel, intégral et dérivé) compare la consigne et la mesure. Il délivre à sa sortie une consigne de couple.

Celle-ci, éventuellement corrigée par le flux, devient consigne  $I_q$ . La consigne  $I_d$  peut être soit fixe, soit prédéterminée en zone de diminution du flux (ou défluxage) en fonction de la vitesse. Les régulateurs des courants  $I_d$  et  $I_q$ , de type PID usuels, permettent de corriger en boucle fermée les tensions  $U_d$  et  $U_q$  prédites à partir d'un modèle de machine.

Les signaux de commande ainsi obtenus après ces différentes phases de calcul sont ensuite appliqués, après passage en triphasé, au modulateur MLI qui pilote le convertisseur de puissance à transistors.

Le synoptique ci-dessous illustre de façon très élémentaire l'organisation d'un tel entraînement.

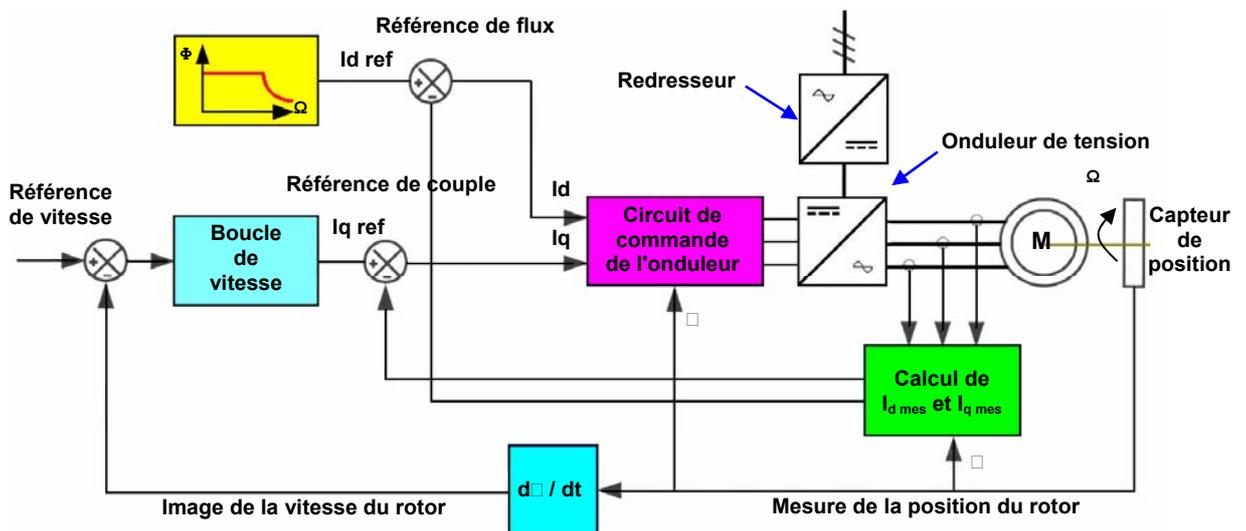


Fig. 8.5-48

Ce type de pilotage permet un excellent contrôle des paramètres couple et vitesse. Le couple est très élevé (supérieur au couple nominal) même à vitesse nulle.

Cette technique allie la souplesse de fonctionnement de la machine à courant continu à la robustesse d'utilisation du moteur asynchrone à cage et s'applique depuis les puissances fractionnaires (inférieure au kilowatt) à plusieurs mégawatts, ce qui justifie son utilisation de plus en plus fréquente sur les engins de levage.

### Le freinage

Le fonctionnement en génératrice se produit :

- soit lorsque la charge entraînée tend à faire tourner le moteur au-delà de la vitesse synchrone correspondant à la fréquence des tensions délivrées par l'onduleur (descente d'une charge, entraînement de l'engin par le vent).
- soit lors des phases de ralentissement du moteur lorsque le temps de décélération souhaité est inférieur à celui de la décélération naturelle (roue libre).

L'inversion du sens de transfert d'énergie, qui se produit lors du passage du fonctionnement en moteur au fonctionnement en génératrice, entraîne une inversion du sens de circulation du courant dans le circuit intermédiaire. Dans ce cas, l'onduleur fonctionne en redresseur, et le courant va de la machine vers l'étage à courant continu à travers les diodes en parallèle sur les transistors de sortie. Or, le redresseur à diodes équipant généralement ce type de variateur de vitesse ne permet pas une telle inversion.

Pour que le fonctionnement en génératrice soit possible, on peut citer trois techniques à utiliser :

- soit de compléter le variateur par l'adjonction d'un hacheur de freinage (résistance + transistor) connecté en parallèle sur la source de tension,

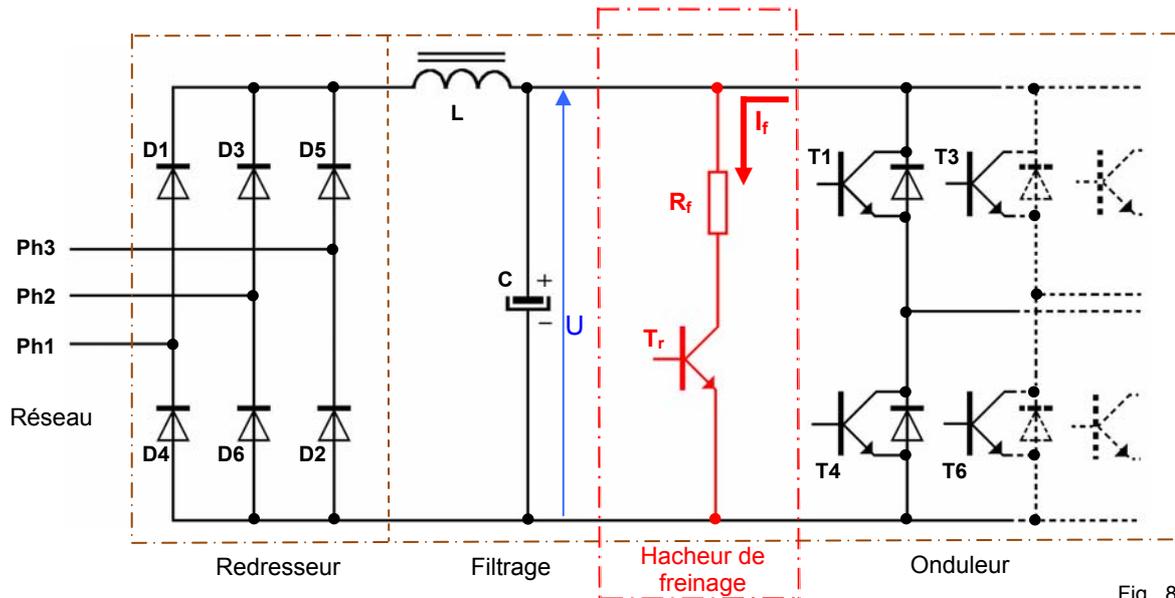


Fig. 8.5-49

Lorsque l'onduleur fonctionne en redresseur, l'énergie est récupérée par la capacité C. Ceci se traduit par une élévation de la tension U aux bornes du condensateur. Lorsque la tension atteint une valeur prédéfinie, le transistor  $T_r$  est rendu conducteur et la résistance de freinage  $R_f$  se trouve alors mise en service pour décharger le condensateur.

La commande du transistor est réalisée avec un rapport cyclique variable, dépendant de la quantité d'énergie à absorber, la dissipation maximale se faisant pour la conduction continue.

La figure ci-dessous suivante donne un exemple de l'allure du courant dans le circuit de freinage et de la tension filtrée alimentant la partie onduleur.

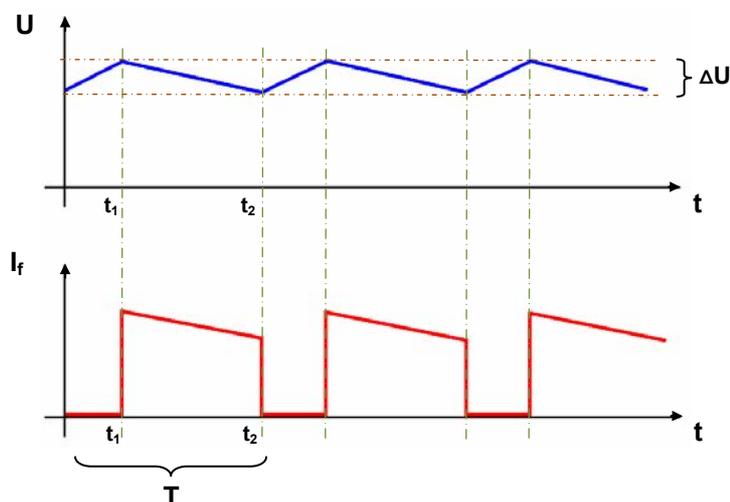


Fig. 8.5-50

- soit de rendre réversible en courant la source de tension en remplaçant par exemple le pont à diodes par deux ponts à thyristors, câblés en montage tête bêche et débloqués à tour de rôle.

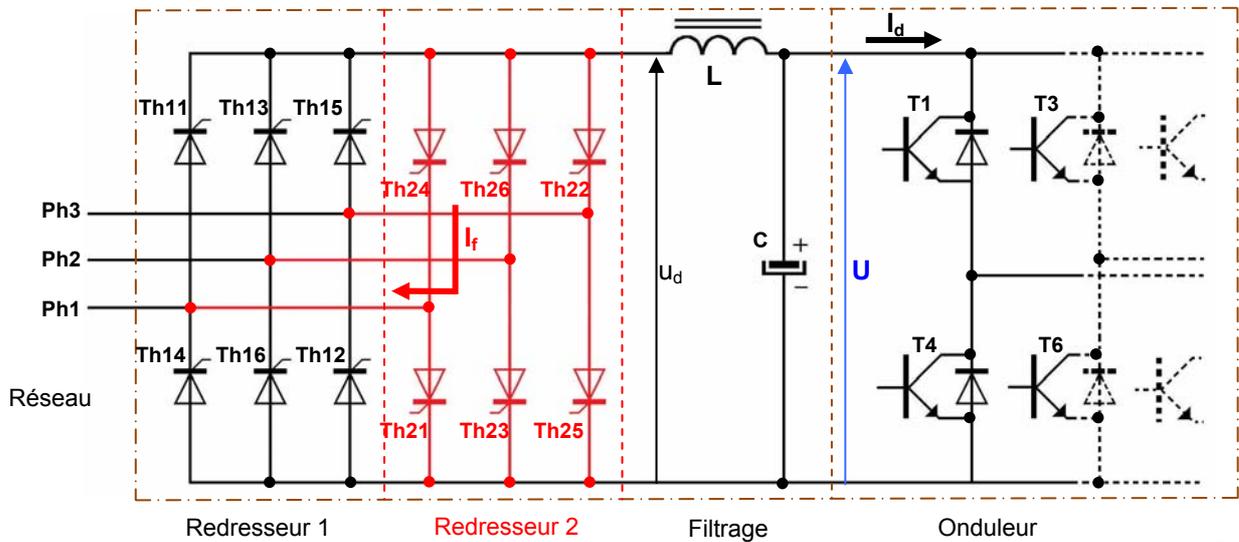


Fig. 8.5-51

Le redresseur 1, commandé avec un retard à l'amorçage voisin de zéro, donne une tension  $u_d$  positive et fournit le courant  $I_d$  lorsqu'il est positif.

Le redresseur 2, commandé avec un retard à l'amorçage voisin de  $180^\circ - \alpha_M$ , donne également une tension  $u_d$  positive, mais absorbe le courant  $I_d$  lorsqu'il est négatif.

Si un transformateur n'est pas prévu pour élever la tension à l'entrée du pont redresseur 2, la tension  $U$  du circuit intermédiaire doit être abaissée, avant le passage en fonctionnement génératrice, d'environ 85% par rapport à sa valeur en fonctionnement moteur.

- soit enfin, d'utiliser un redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsions similaire à la structure du pont onduleur.

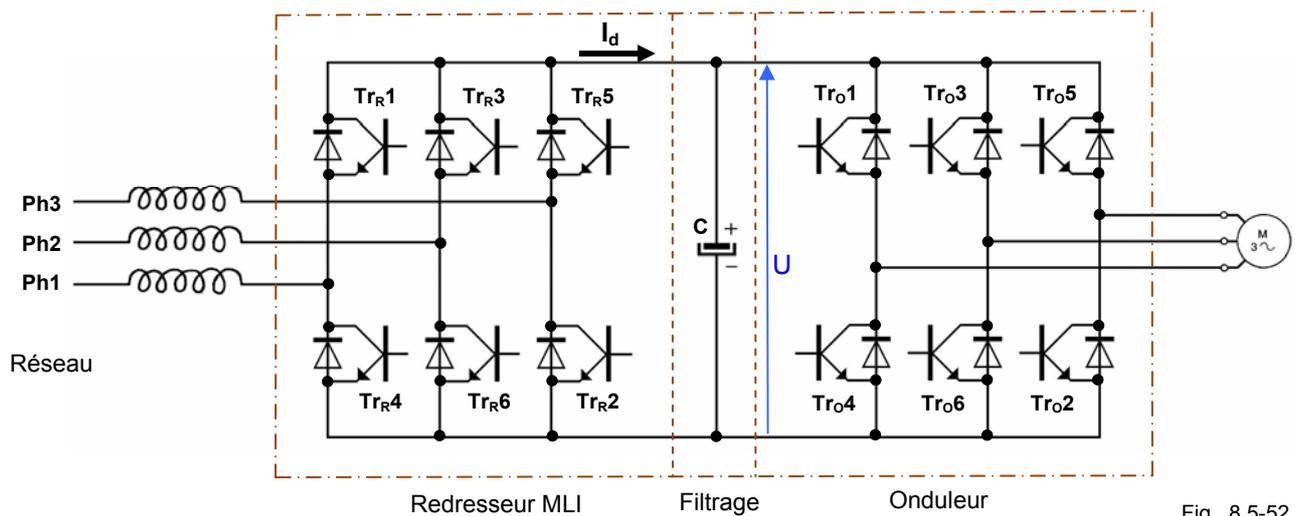


Fig. 8.5-52

Cette structure est de plus en plus utilisée car elle permet d'élever le rang des harmoniques des courants pris au réseau, facilitant ainsi le filtrage et pour rendre voisin de l'unité le facteur de puissance à l'entrée de la chaîne de conversion.

Un redresseur MLI à structure d'onduleur de tension doit avoir côté continu une tension peu ondulée et doit être alimenté par une source alternative inductive. Habituellement un transformateur abaisseur est placé entre le réseau et la chaîne de conversion; on remplit la seconde condition en augmentant l'inductance de fuite du transformateur.

L'examen du schéma précédent montre que le montage est alors entièrement symétrique. Quand la machine asynchrone fonctionne en moteur, le courant  $I_d$  est positif, le redresseur fonctionne en redresseur et l'onduleur de tension en onduleur. Quand la machine fonctionne en génératrice asynchrone, les deux convertisseurs permutent leurs rôles.

### Notion de bus continu commun à plusieurs onduleurs de tension

Il est possible de réaliser l'interconnexion de plusieurs convertisseurs de fréquence par la mise en commun du circuit intermédiaire à tension continu, généralement appelé "bus continu".

Ce procédé est très intéressant, car il permet de limiter le recours à des résistances de freinage sur les engins où les mouvements ne sont pas en même temps en phase de ralentissement. L'énergie provenant du mouvement en freinage est alors renvoyé via le bus commun vers les autres mouvements fonctionnant en moteur.

Deux méthodes sont possibles pour constituer un circuit intermédiaire commun:

- mise en parallèle des sorties continues de plusieurs variateurs

La première consiste à utiliser des variateurs de vitesse standard dont le circuit intermédiaire est raccordé à un jeu de barres à courant continu au moyen de dispositifs de couplage et de protection appropriés (contacteur, fusibles, inductances, etc.).

Le schéma unifilaire de principe d'un tel système est illustré par la figure ci-dessous

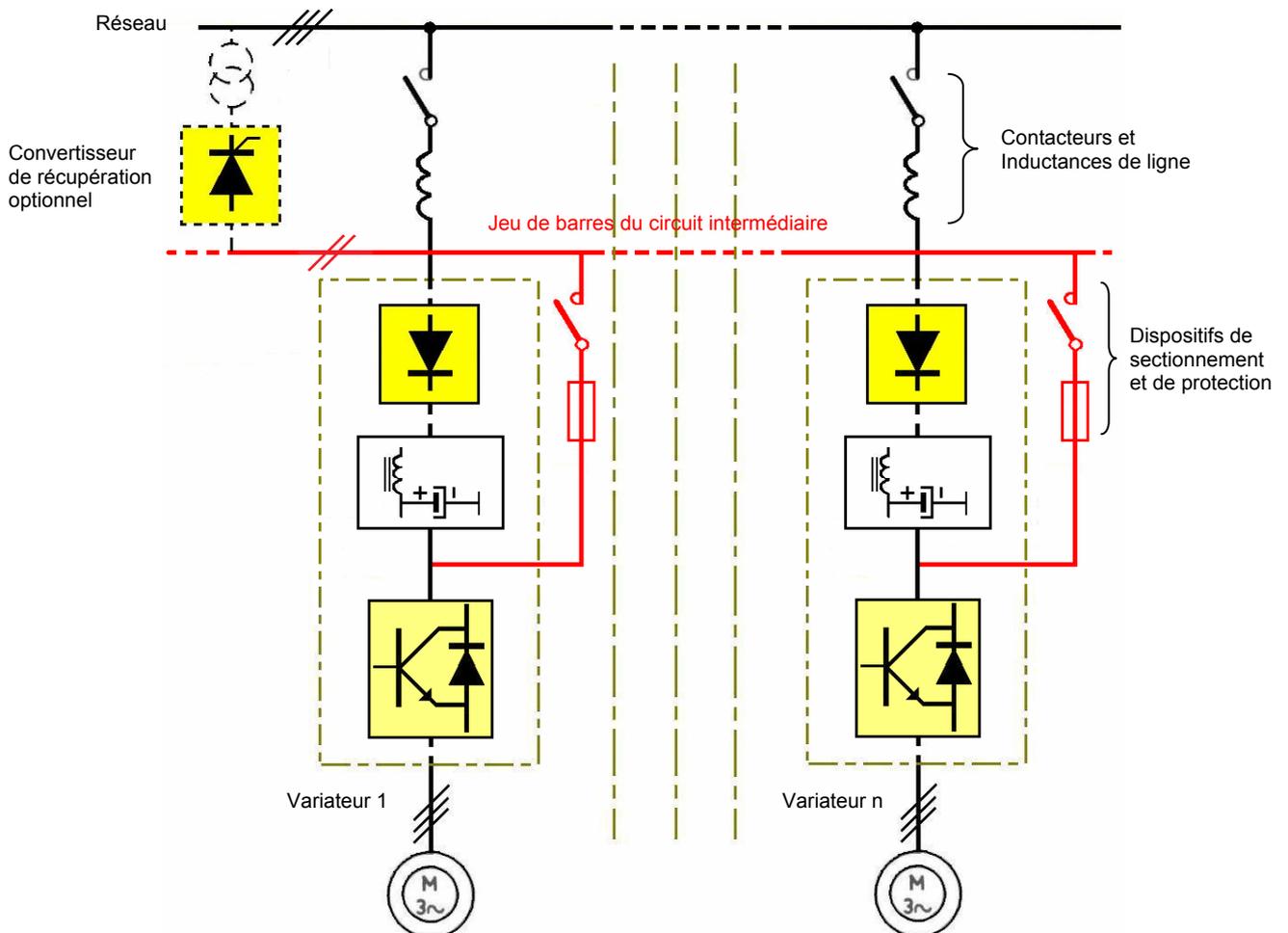


Fig. 8.5-53

Certaines recommandations et précautions de mise en œuvre doivent être respectées :

- équilibrage des courants d'entrée par la mise en place d'inductances de valeur appropriées aux calibres de chaque variateur en série dans les phases d'alimentation,
- protection contre les courts-circuits pour se prémunir d'un défaut interne à l'un des variateurs (fusibles, disjoncteurs, etc.),
- séquence de mise sous tension des variateurs évitant toute surcharge du variateur de plus faible puissance,
- gestion des défauts permettant d'isoler le variateur en dérangement.

Dans ce type de solution, les convertisseurs de fréquence restent autonomes et peuvent être mis en et hors circuit indépendamment les uns des autres.

➤ Création d'une source de tension continue commune aux onduleurs de tension

Cette seconde méthode consiste à raccorder les modules de puissance onduleurs de tension au jeu de barres d'un circuit intermédiaire commun. Le circuit intermédiaire doit alors être alimenté de façon centrale à partir du réseau d'alimentation (avec éventuellement un module de récupération d'énergie ou un hacheur de freinage).

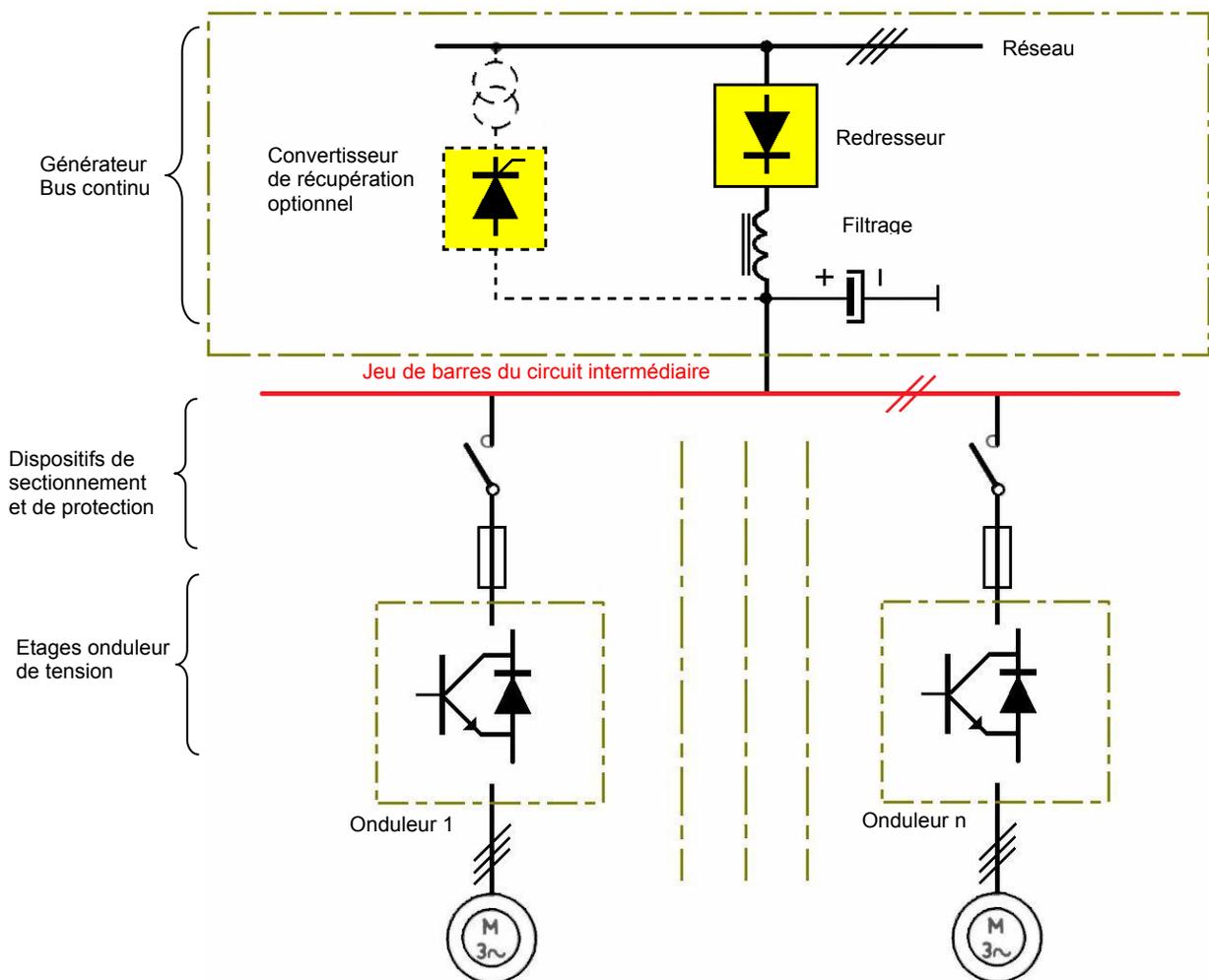


Fig. 8.5-54

### 8.5.17.3. Convertisseurs à onde de courant

L'équipement comprend :

- un redresseur qui délivre une tension redressée  $U_R$ ,
- une inductance de lissage  $L$  qui permet d'avoir un courant redressé  $I_R$  peu ondulé malgré l'ondulation de la tension redressée
- un onduleur de courant délivrant à la machine des ondes rectangulaires de courant de  $120^\circ$  électriques, positives ou négatives séparées par des intervalles de  $60^\circ$  à courant nul.

Il existe de nombreux schémas de cette famille de convertisseurs se différenciant en particulier par leurs circuits de commutation du courant d'une phase à l'autre (existence ou non de thyristors auxiliaires et nombre de condensateurs).

Le montage ci-dessous qui n'utilise pas de thyristors auxiliaires est la solution la plus utilisée pour la commande à fréquence variable à l'aide de convertisseur à onde de courant.

Dans ce type de schéma, le courant est imposé à la machine, laquelle génère sa tension qui est quasi sinusoïdale.

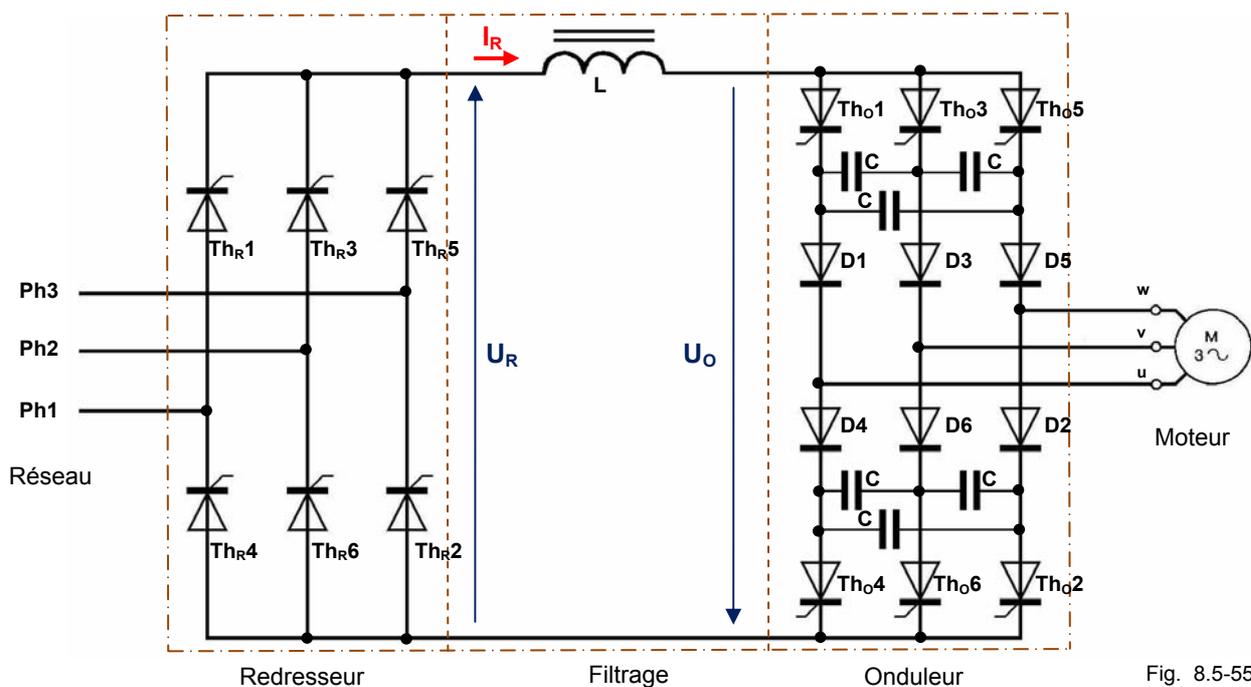


Fig. 8.5-55

Le redresseur contrôlé côté réseau est généralement un pont de Graëtz triphasé complet à thyristors. La variation de l'angle de retard à l'allumage des thyristors entre  $0^\circ$  et  $180^\circ - \beta_M$  permet de faire varier la valeur moyenne de la tension  $U_R$ . Il peut donc fonctionner en redresseur ou en onduleur assisté par le réseau d'alimentation. Le convertisseur côté machine qui change la fréquence de la tension statorique n'est pas un simple pont de Graëtz triphasé. En effet, la machine d'induction absorbant de l'énergie réactive pour maintenir son flux, la commutation d'un bras de pont ne peut s'effectuer de façon naturelle comme dans le cas du redresseur côté réseau. Il est nécessaire de recourir à des condensateurs parcourus par des courants de charge lors des commutations qui assurent le blocage forcé des thyristors. Les diodes évitent la décharge des condensateurs dans les phases du moteur. Une petite inductance (non représentée) en série avec chaque thyristor limite les variations rapides de courant ( $di/dt$ ).

L'inversion de la séquence de commande des thyristors permet l'inversion du sens de rotation du moteur. Le freinage par récupération a lieu naturellement lorsque la fréquence de rotation du moteur devient supérieure à la fréquence de synchronisme.

La figure suivante présente les ondes de courant délivrées par le convertisseur en fonction de la succession des conductions des thyristors de sortie.

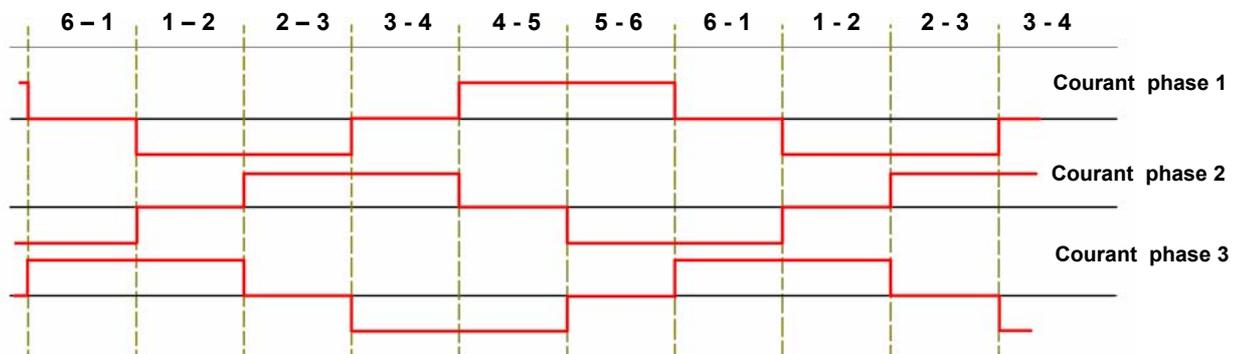


Fig. 8.5-56

## 8.5.18. Adaptation des machines asynchrones à la vitesse variable

### 8.5.18.1. Généralités

Depuis le début de leur utilisation, les moteurs alternatifs étaient alimentés par des générateurs de même nature, les problèmes de forme d'onde et de fréquence ne se posaient donc pas particulièrement. Le développement des convertisseurs statiques oblige, dans une certaine mesure, à une remise en cause. En effet, l'optimisation technico-économique des entraînements à vitesse variable par moteurs à courant alternatif a exigé une adaptation réciproque des convertisseurs et des moteurs. Le succès de l'opération résulte d'une collaboration étroite entre ingénieurs électrotechniciens et électroniciens.

En même temps, cette remise en cause permet une double évolution : élargissement du marché des moteurs alternatifs et accès aux grandes vitesses jusque là réservées aux turbines.

L'adaptation des moteurs à leur alimentation amène parfois quelques contraintes que nous verrons plus loin, mais parfois aussi des simplifications. C'est le cas, par exemple, du démarrage de fortes inerties, ou de résonances dangereuses.

Il y a, à la fois, une adaptation électrique et une adaptation thermique :

- car on peut régler ou limiter le courant donc les pertes,
- mais à faible vitesse, il faut un moyen « séparé » de refroidissement,
- et il y a des pertes supplémentaires, dues en particulier, aux harmoniques.

### 8.5.18.2. Adaptation des moteurs d'induction à cage aux gradateurs

Nous avons vu que la puissance de glissement était dissipée dans le rotor. Ceci conduit à surdimensionner un moteur classique d'un coefficient 2 à 3. On obtient de meilleurs résultats en utilisant des moteurs spéciaux à rotor massif évidé et à ventilation forcée indépendante, avec, toutefois, un facteur de puissance et un rendement inférieurs à 0,7; leur puissance ne dépasse guère 50 kW.

### 8.5.18.3. Adaptation des moteurs d'induction à bagues aux cascades hyposynchrones

Pour les applications les plus courantes l'adaptation ne pose aucun problème : si le moteur existe, on choisira les semiconducteurs du convertisseur de puissance en fonction de la tension rotorique, dans le cas contraire on choisira la tension rotorique économique pour les semiconducteurs.

Dans les cas d'applications à couple constant, on veillera à la ventilation du moteur.

#### 8.5.18.4. Adaptation des moteurs d'induction à cage aux convertisseurs de fréquence

##### *Conception de la cage*

Les moteurs à cage standards ont des cages conçues pour limiter le courant et augmenter le couple au démarrage. Les dispositions prises pour le démarrage sur le réseau (double-cages et cage à barres profondes) sont inutiles pour des moteurs alimentés en fréquence variable, puisque le démarrage s'opère maintenant à basse fréquence et dans des conditions qui se rapprochent beaucoup des conditions nominales. De plus, ces dispositions sont nuisibles :

- dans le cas des moteurs alimentés en ondes imposées de tension car elles conduisent à une diminution rapide des inductances des barres de la cage pour les harmoniques. Les courants harmoniques risquent donc d'être sensiblement plus élevés que ceux obtenus par un calcul rapide,
- quel que soit le schéma adopté, en ce qui concerne les pertes additionnelles dans le rotor. La résistance du rotor s'élève rapidement pour les harmoniques, dans ce cas et peut très facilement être multipliée par 5 ou 10, de sorte que, même pour des taux de distorsion très faibles, les pertes additionnelles dans le rotor peuvent être très importantes.

##### *Choix des inductances de fuites*

Les dispositions à prendre en ce qui concerne les inductances de fuites sont diamétralement opposées selon que le moteur doit être alimenté à ondes imposées de tension ou à ondes imposées de courant :

- dans le cas d'alimentation en ondes de tension rectangulaire ou impulsionnelle, il convient de prévoir de grandes inductances de fuites dans les moteurs. Des inductances de 30 à 40 % de l'impédance nominale, correspondant à des courants de démarrage de l'ordre de  $3.I_n$ , paraissent convenir. Il en découle une augmentation de la puissance apparente et donc du dimensionnement du convertisseur,
- dans le cas d'alimentation en ondes imposées de courant, il est souhaitable, au contraire, d'utiliser un moteur à faible réactance. Il s'agira donc d'un moteur plus parfait, débarrassé, au maximum, d'impédances nuisibles.

##### *Ventilation*

Selon la forme du couple résistant et la plage de vitesse requise, l'autoventilation du moteur sera suffisante ou non. Par exemple, un fonctionnement à couple constant dans une plage de vitesse notable nécessitera l'adjonction d'un motoventilateur.

Si toutes ces précautions sont souhaitables, elles ne sont pas forcément nécessaires. On peut dire aujourd'hui, avec l'expérience, que, par exemple, pour l'entraînement des machines dont le couple résistant a une allure quadratique que les moteurs standards existants conviennent très bien quel que soit le type de convertisseur de fréquence utilisé.