

12.6.10. Les onduleurs triphasés et la vitesse variable des machines asynchrones

12.6.10.1. Le contrôle vectoriel de flux

Nous savons que le couple instantané est donné par le produit du flux inducteur Φ 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 Φ 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 du chapitre machines électriques) montrant que les courants statoriques triphasés peuvent se décomposer en un système de courants biphasés I_q et I_d décalés de 90° 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

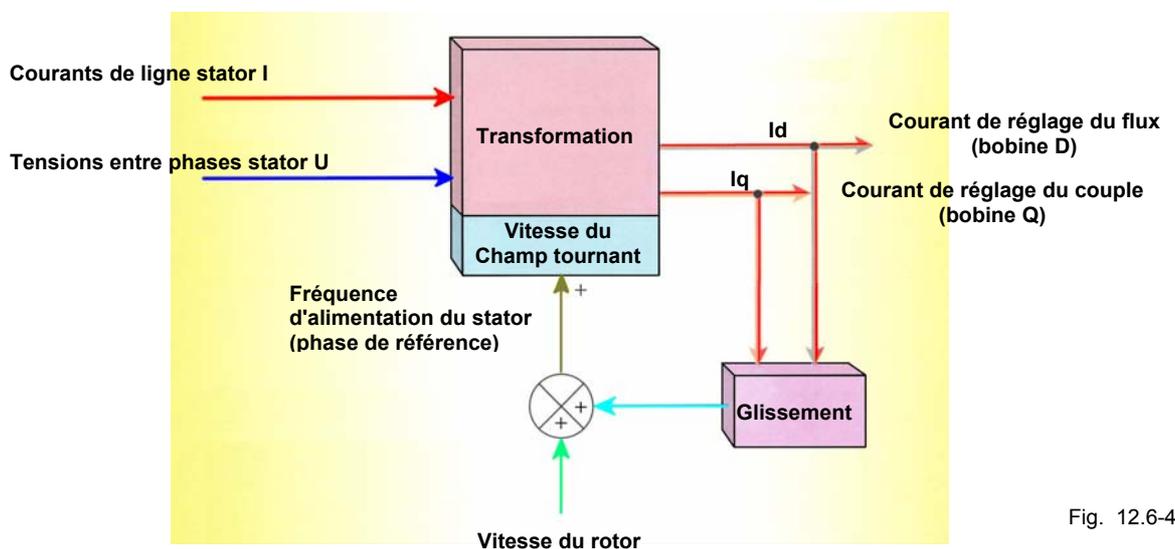


Fig. 12.6-41

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.

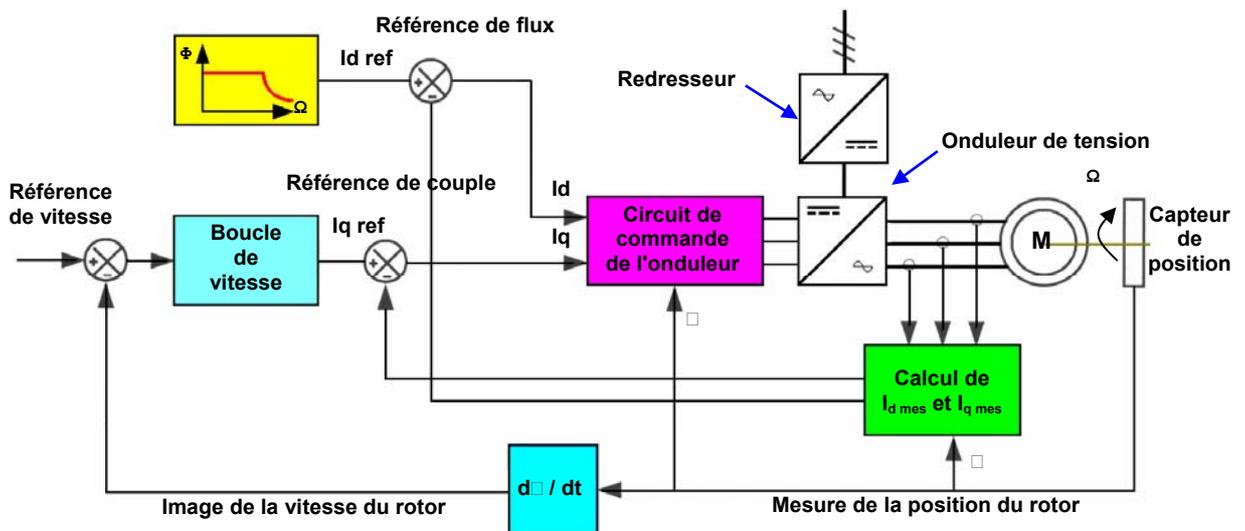


Fig. 12.6-42

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.

12.6.10.2. 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,

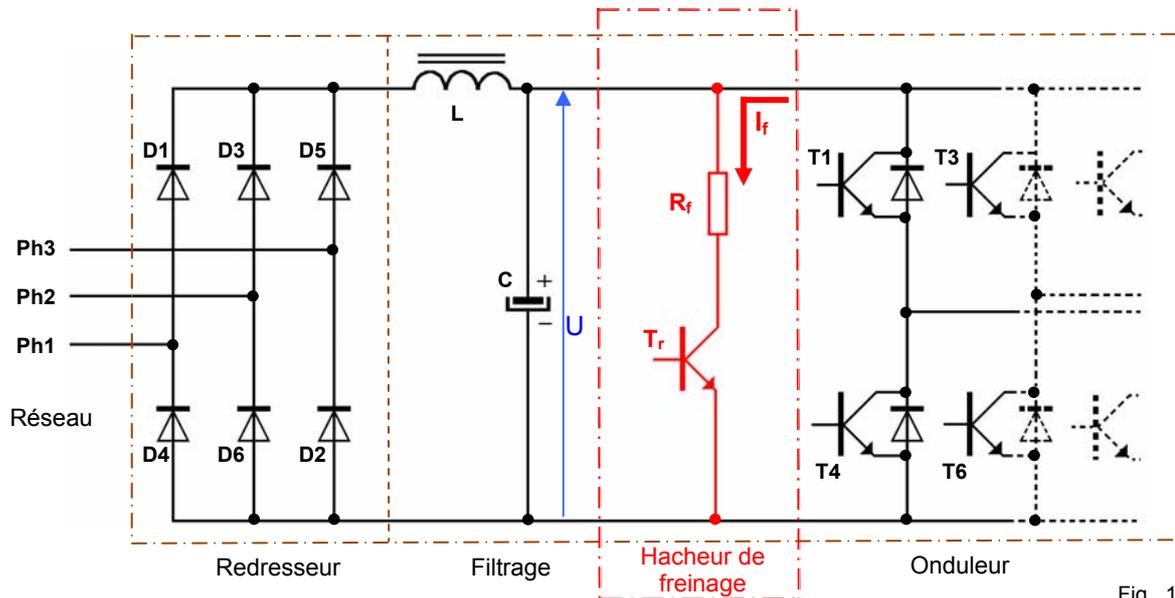


Fig. 12.6-43

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.

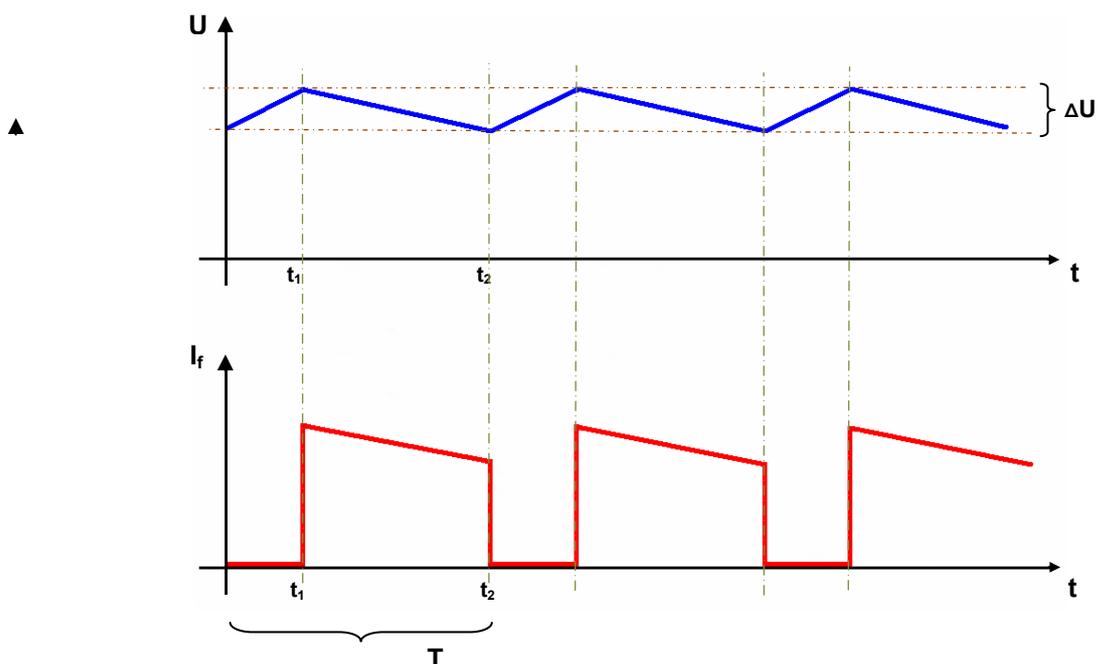


Fig. 12.6-44

- 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.

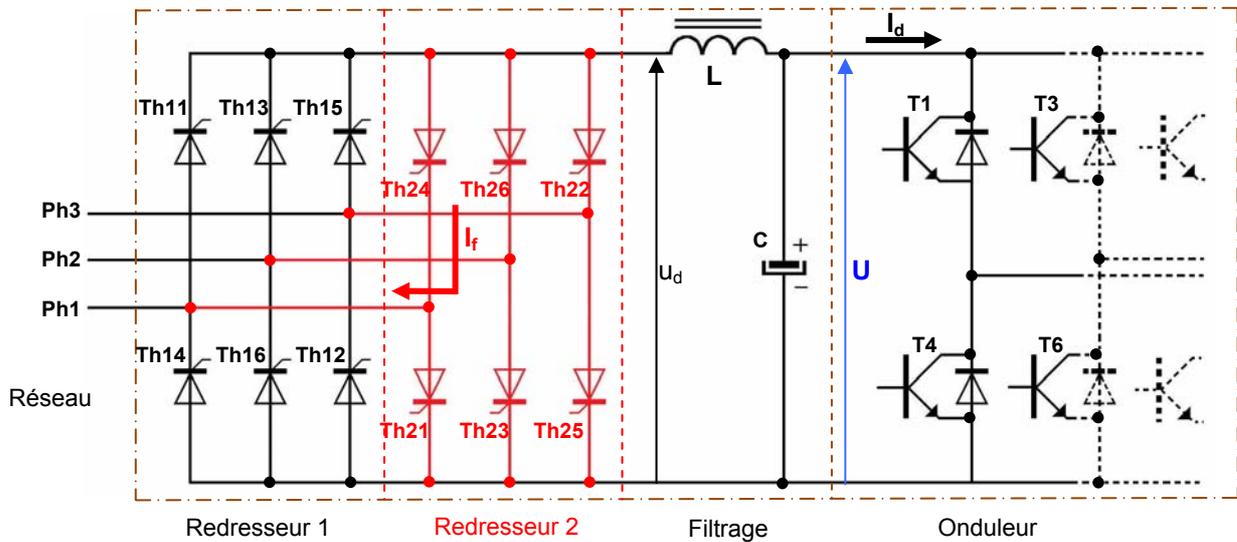


Fig. 12.6-45

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.

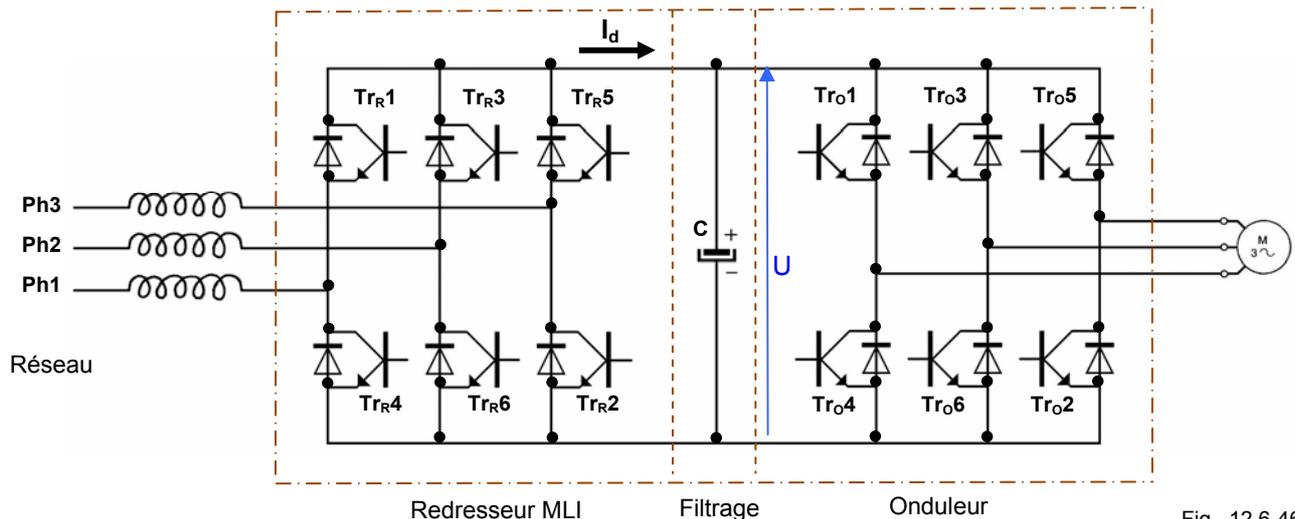


Fig. 12.6-46

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.

12.6.10.3. Notion de bus continu commun à plusieurs onduleurs de tension

Il est possible de réaliser l'interconnexion de plusieurs convertisseurs de fréquence à onde de tension 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

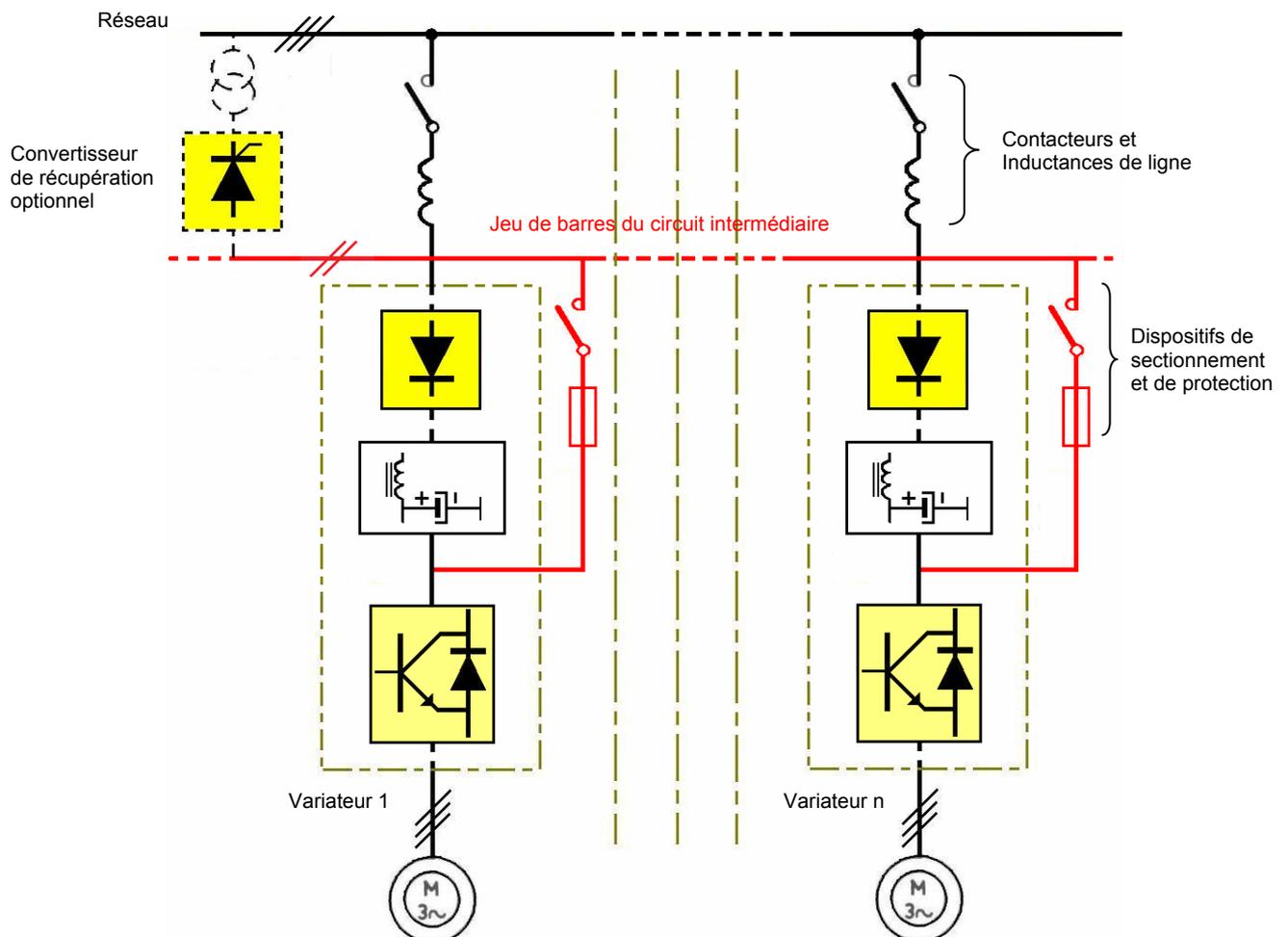


Fig. 12.6-47

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).

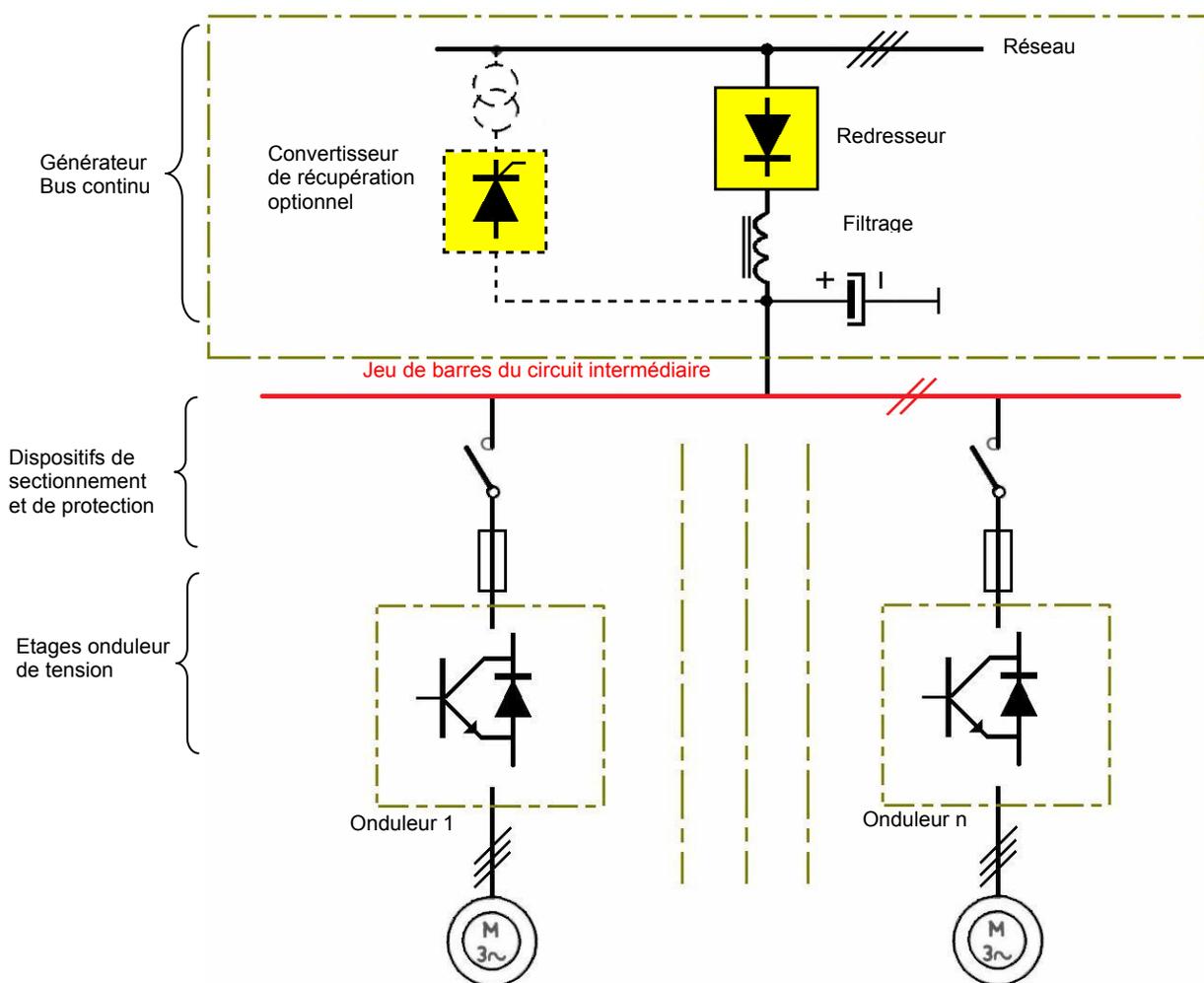


Fig. 12.6-48

12.6.10.4. Les convertisseurs de fréquence à onde de courant

L'équipement destiné à la commande d'une machine asynchrone 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° électriques, positives ou négatives séparées par des intervalles de 60° 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.

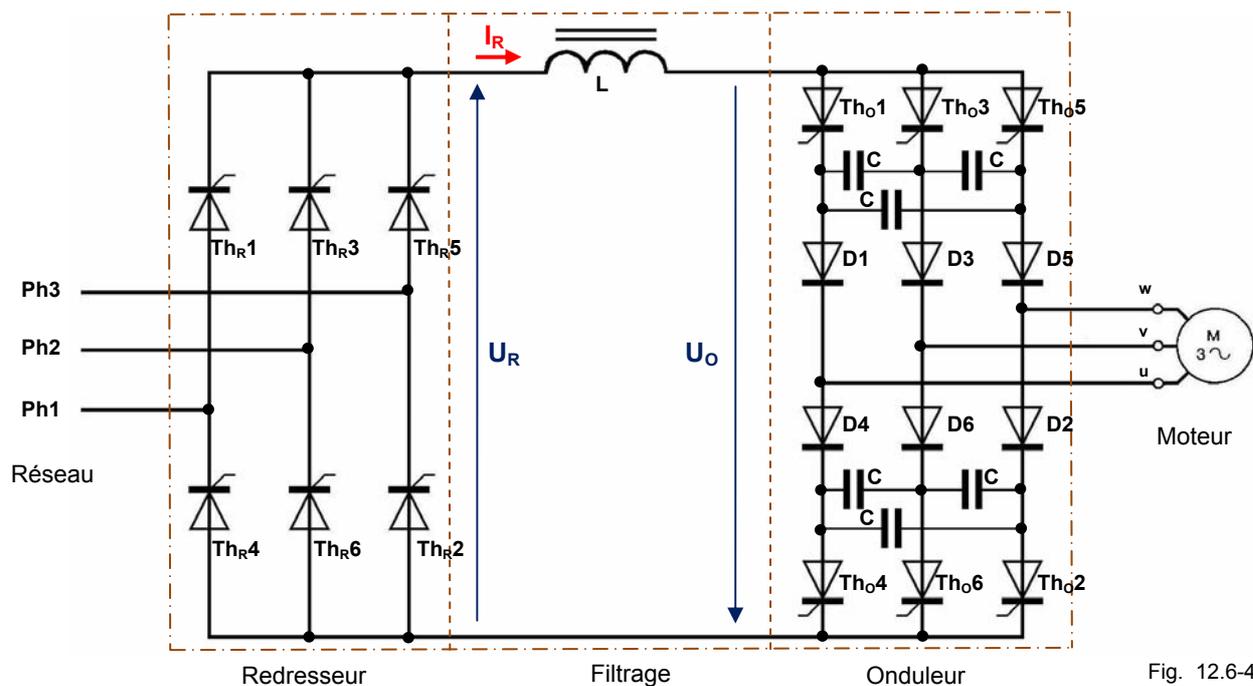


Fig. 12.6-49

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° et $180^\circ - \alpha_M$ 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.