

12.3.8. La réversibilité des convertisseurs alternatif/continu

12.3.8.1. Introduction

Les structures des convertisseurs étudiées précédemment découlent d'un cahier des charges dont une caractéristique essentielle est l'unidirectionnalité en courant de la source de courant continu. Sa réversibilité en tension peut, par contre, dans le cas général, être totale, en valeur instantanée comme en valeur moyenne.

Pour la commande des moteurs à courant continu par l'induit, devant opérer des inversions de marche rapides ou des freinages contrôlés (fonctionnement dans les quatre quadrants du plan vitesse/couple), la source de courant alimentant l'induit du moteur doit être bidirectionnelle en tension et en courant.

Le fonctionnement dans les quatre quadrants est illustré par le diagramme rappelé ci-dessous :

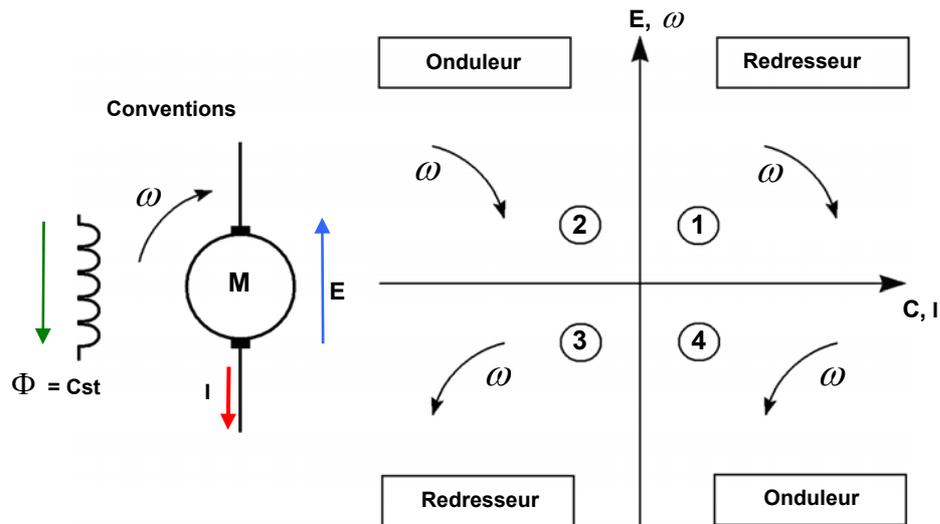


Fig. 12.3-69

La force électromotrice et le courant peuvent s'inverser avec les conventions indiquées sur la figure, les quadrants (1) et (3) correspondant à des fonctionnements en moteur et les quadrants (2) et (4) à des fonctionnements en génératrice.

Pour inverser le sens de marche d'un moteur à courant continu en agissant sur l'induit, nous devons soit :

- Utiliser un second groupe de redresseurs contrôlés connecté en montage anti-parallèle (tête-bêche) avec le premier. On appelle cette association « réversible statique ».

La figure ci-après représente le schéma de principe de cette solution :

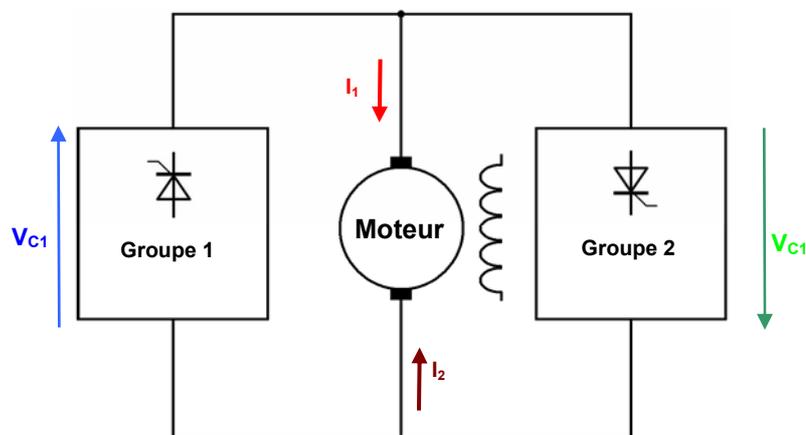


Fig. 12.3-70

Ce type de montage reste encore le plus utilisé pour les applications de manutention utilisant des machines à courant continu (essentiellement pour les mouvements verticaux).

- Utiliser un dispositif électromécanique pour inverser les connexions entre l'induit du moteur et le convertisseur. C'est le réversible à contacteurs.

La figure ci-après représente le schéma de principe de cette autre solution :

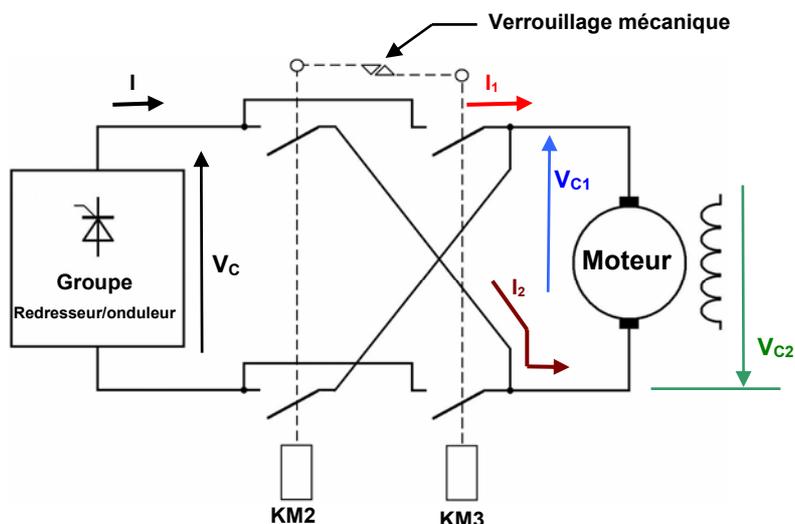


Fig. 12.3-71

Ce montage qui ne met en œuvre qu'un seul convertisseur n'est plus guère utilisé aujourd'hui à cause de ses médiocres performances dynamiques dues au temps d'inversion long des contacteurs situés dans le circuit d'induit.

Les convertisseurs réversibles peuvent fonctionner selon trois principes différents. La différence réside dans la séquence de commande des convertisseurs.

On distingue les réversibles « à circulation de courant », « à bande morte » et à « logique d'inversion ».

Remarque :

Pour information, car non utilisé dans les applications de levage, nous présenterons rapidement plus loin dans ce chapitre le principe des réversibles sur l'inducteur (applications de machine outil et entraînements de très fortes puissances).

12.3.8.2. Montages réversibles à courant de circulation

Les deux montages les plus courants de ce type sont représentés sur les figures a et b suivantes, en prenant toujours l'exemple de structures triphasées en pont.

Montage antiparallèle

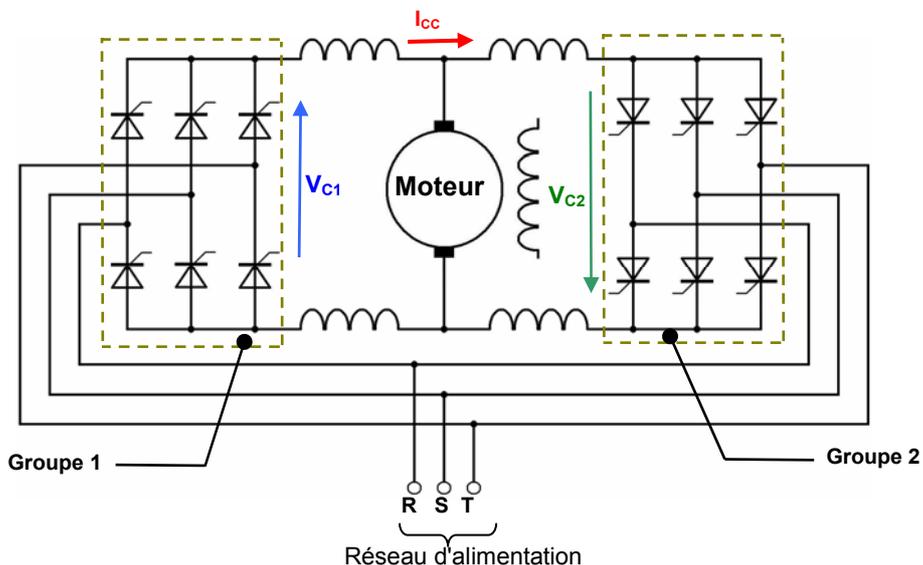


Fig. 12.3-72a

Montage en croix

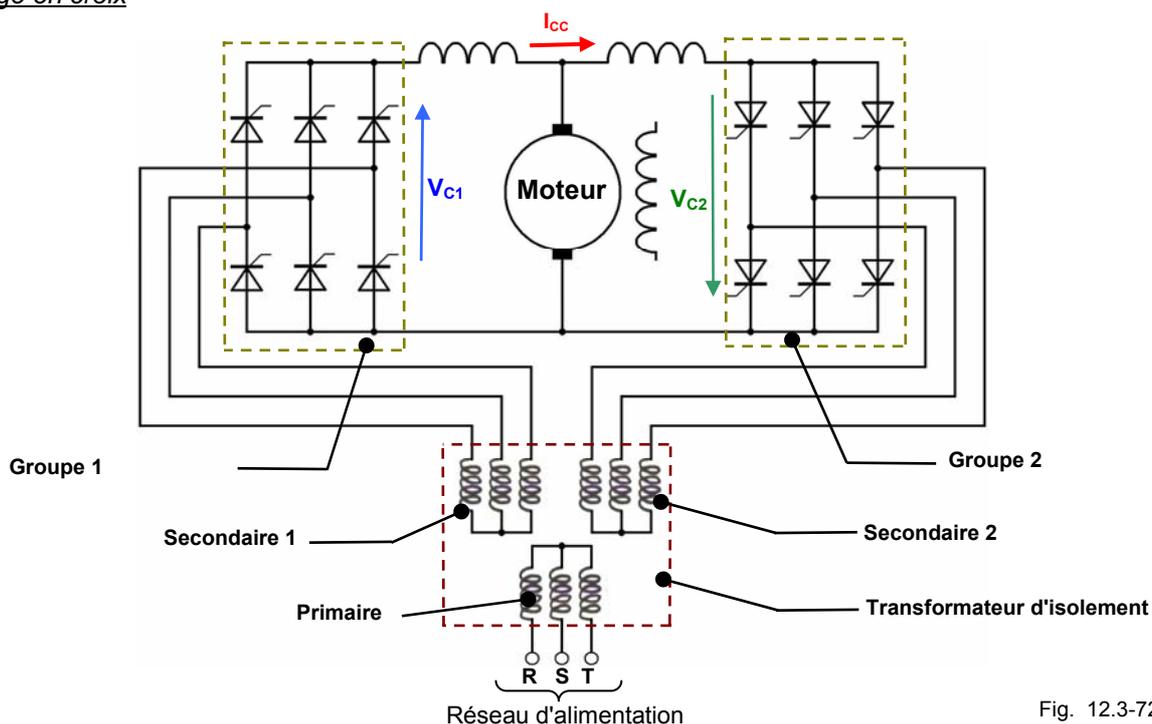


Fig. 12.3-72b

Les deux montages présentés utilisent deux commutateurs identiques, montés en anti-parallèle par l'intermédiaire d'inductances servant à limiter le courant de circulation I_{CC} entre les convertisseurs, sans passer par l'induit du moteur.

Dans ces montages, les deux commutateurs sont commandés en permanence ; nous entendons par là que tous les thyristors reçoivent des impulsions de commande périodiques de manière que les valeurs moyennes des tensions théoriques à vide de chaque pont apparaissant aux bornes de l'induit soient égales et opposées.

Si nous appelons α_1 l'angle de contrôle d'un pont et α_2 l'angle de contrôle du second, la commande doit être telle que l'on ait toujours la relation suivante qui soit satisfaite :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$$

Il suffit pour cela que les angles de retard à l'amorçage des deux groupes, soient déphasés de manière symétrique autour de la valeur $\alpha_0 = 90^\circ$ (angle qui correspond à une tension moyenne nulle sur charge inductive).

En conséquence, lorsqu'un pont fonctionne en redresseur, l'autre fonctionne en onduleur et inversement. En fait, un seul des deux ponts contribue à la conversion d'énergie suivant le signe du courant et de la tension moyenne. L'autre fonctionne sensiblement à vide.

Mais les valeurs instantanées des tensions qui apparaissent en sortie des ponts ne sont pas égales et leur différence donne naissance à un courant de circulation (courant de court-circuit) qui doit être limité par des inductances de valeur élevée. Ces inductances, pour une question de volume, sont généralement à noyau de fer et donc susceptibles de saturation lorsqu'elles sont parcourues par le courant continu de l'induit de la machine.

Dans le premier montage, les deux ponts sont alimentés à partir d'une source alternative commune. Il existe un courant de circulation relatif aux deux cellules supérieures de redressement et un courant de circulation relatif aux deux cellules inférieures. Chacun de ces deux circuits nécessite une inductance de limitation. Comme, de plus, le courant continu de charge entraîne la saturation de cette inductance et donc une forte diminution de sa valeur vis-à-vis du courant de circulation, celle-ci est fractionnée en deux de part et d'autre du pôle de la source de courant. Ainsi, il y a toujours une des deux bobines qui n'est parcourue que par le courant de circulation et qui peut pleinement jouer son rôle.

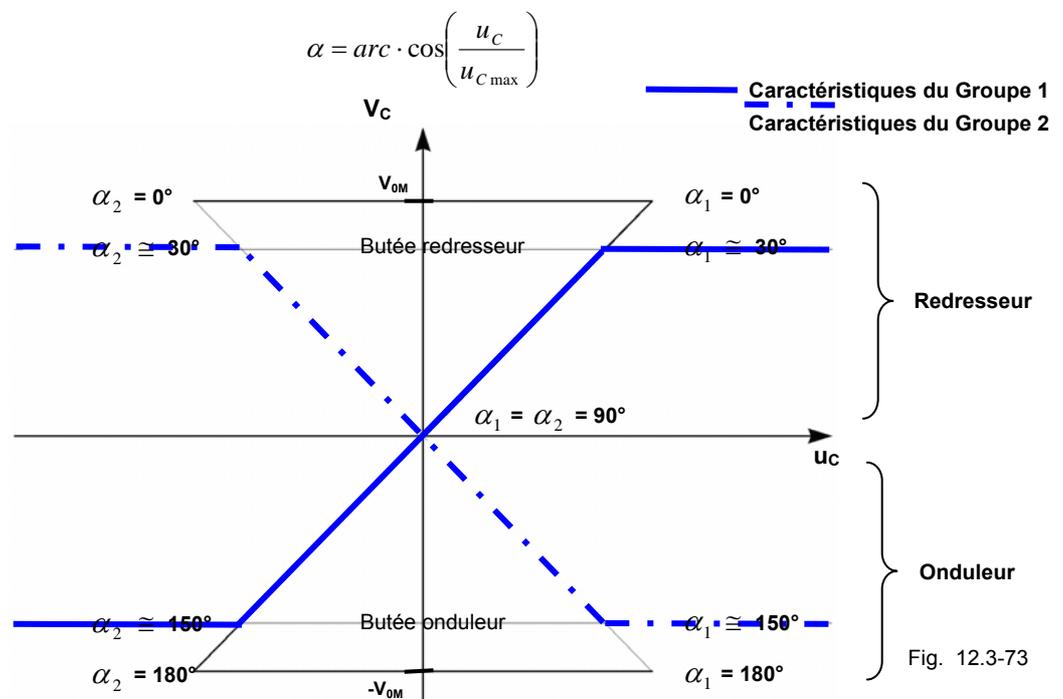
Dans le second montage (montage en croix), le transformateur à deux secondaires permet d'isoler galvaniquement les circuits d'alimentation des deux ponts. Il en découle qu'il n'existe qu'un trajet unique pour le courant de circulation qui emprunte successivement chacune des quatre cellules. En conséquence, le nombre de bobines est limité à deux.

L'étude du courant de circulation montre que ce dernier est très sensiblement réduit dans le deuxième montage, ce qui permet d'utiliser des bobines de limitation plus petites.

Si ces montages sont intéressants du point de vue de la simplification de la commande et surtout de la rapidité d'inversion du courant qui se fait sans discontinuité, ils présentent, en plus de la nécessité des bobines de limitation, un défaut important pour des puissances élevées: l'angle de contrôle dans un fonctionnement en onduleur est limité à une valeur supérieure, égale à 150° environ.

La relation $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$ limite donc la valeur inférieure de l'angle de contrôle dans un fonctionnement en redresseur à 30° environ. Il en résulte une limitation de la valeur moyenne de la tension continue, une consommation importante d'énergie réactive, un surdimensionnement et un coût plus important que celui d'un montage à logique d'inversion. Sauf cas exceptionnel, ce dernier sera donc préféré.

La figure suivante donne la position des caractéristiques de la tension de sortie V_c du convertisseur réversible en fonction de la tension de commande u_c lorsque le circuit de commande (allumeur) a une fonction de transfert de la forme :



On observe sur la figure précédente que ces fonctions sont linéaires.

A chaque instant, un groupe fonctionne donc en redresseur, l'autre en onduleur. Les angles de retard à l'amorçage doivent respecter la relation :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$$

En fait, pour éviter le défaut de recombinaison en onduleur, chacun des angles α_1 et α_2 ne peut dépasser la valeur $(\pi - \beta)$, où :

$$\beta = u \text{ (angle de commutation)} + \psi \text{ (angle de sécurité).}$$

La condition : $\alpha_1 + \alpha_2 = 180^\circ$ n'est donc valable pour autant que la valeur de l'un des deux angles α_1 ou α_2 ne soit pas supérieure à $(\pi - \beta)$.

Si les valeurs moyennes des tensions redressées sont égales, leurs valeurs instantanées, par contre, sont différentes : elles dépendent de la nature du groupe, du montage utilisé et de la valeur de l'angle de retard à l'amorçage.

La figure ci-dessous illustre le diagramme des tensions et du courant de circulation inter ponts dans un montage à courant de circulation du type montage en croix.

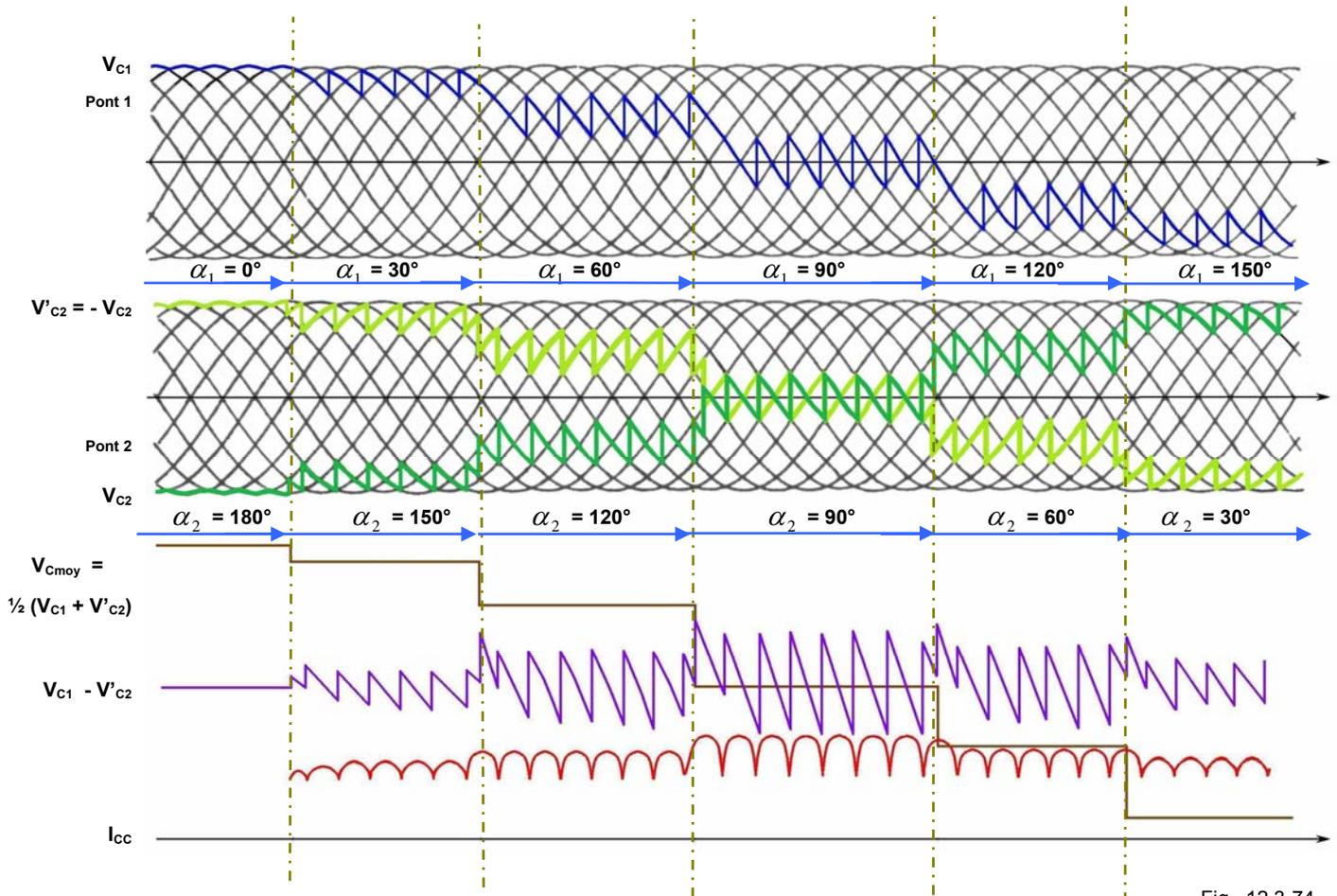


Fig. 12.3-74

La tension différentielle ($V_{C1} - V'_{C2}$) crée un courant unidirectionnel, appelé courant de circulation, (nous l'avons nommé I_{CC} sur la figure ci-dessus). L'amplitude de ce courant dépend de l'impédance du trajet qu'il parcourt ; il peut donc être limité par des inductances. Celles-ci sont généralement calculées de telle manière que le courant moyen maximal de circulation soit de l'ordre de 10 % du courant nominal du moteur, ce qui suppose des inductances relativement importantes, encombrantes et coûteuses. Il est possible de les concevoir avec un noyau magnétique, donc moins volumineuses. Elles peuvent alors être saturables, mais l'inconvénient est la non linéarité qui en découle. Dans ce cas, le courant de saturation doit être supérieur au courant maximal de circulation.

L'avantage de tels montages réside, outre la simplicité des circuits de commande, dans une minimalisation des problèmes posés par la conduction discontinue.

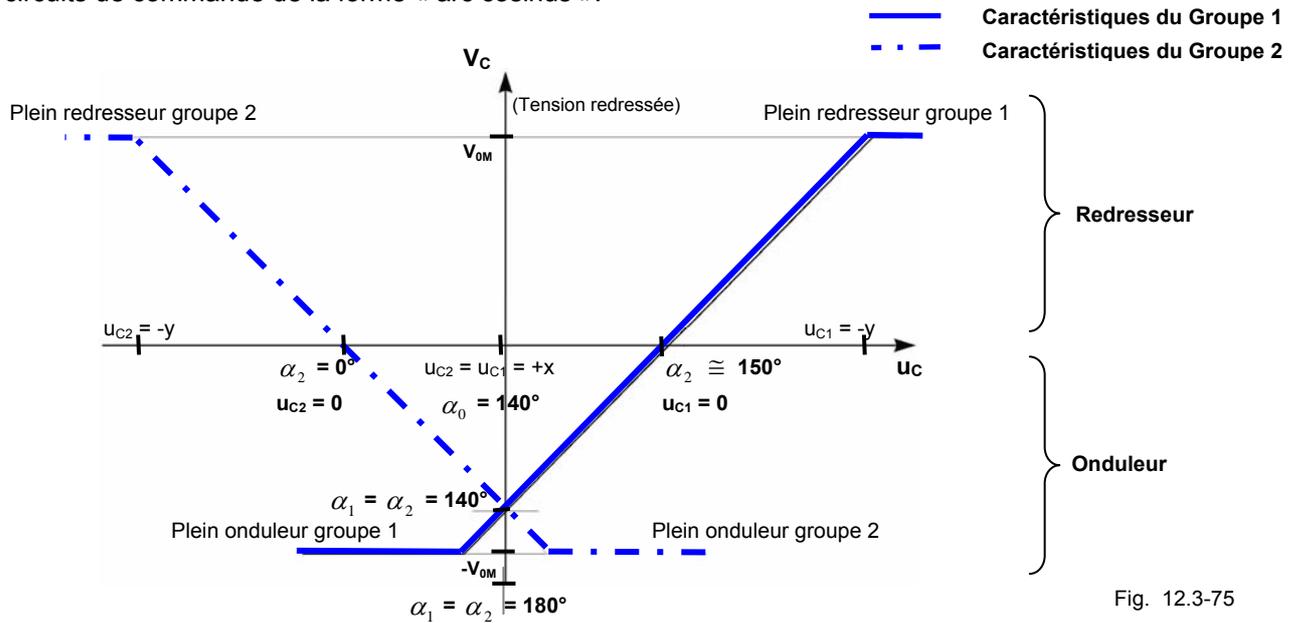
12.3.8.3. Montages réversibles à bande morte ou zone morte

Il est possible de supprimer tout courant de circulation entre les deux ponts en effectuant un calage différent des angles de commande α_1 et α_2 .

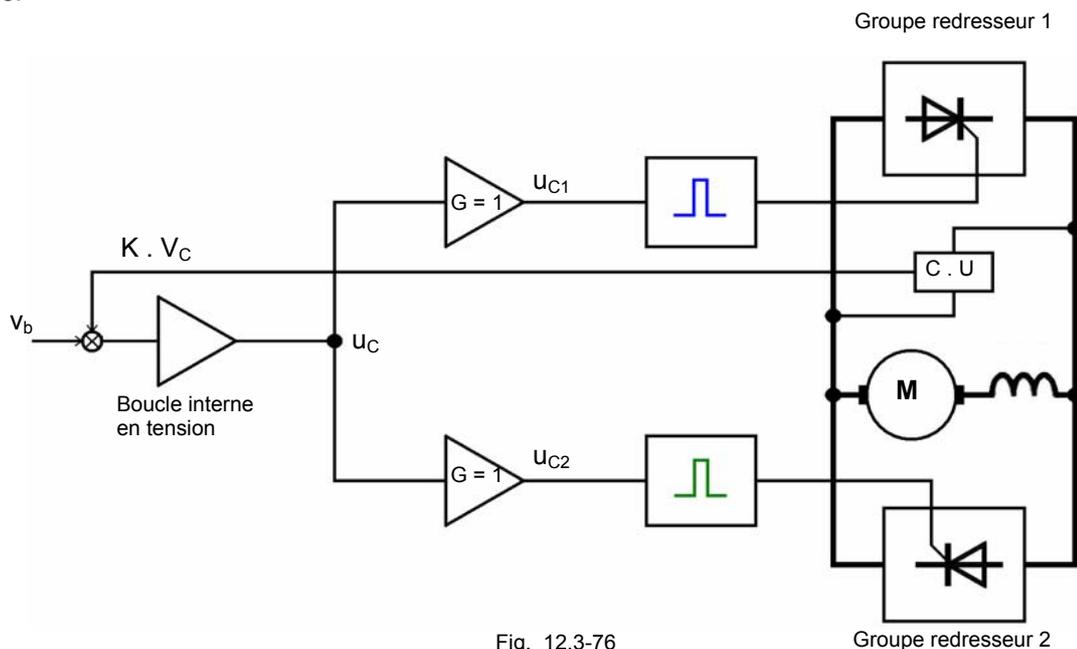
Dans ce cas, on fait en sorte que la différence instantanée des tensions délivrées par les deux groupes ne soit pas génératrice de courant ; pour cela, il faut et il suffit que cette différence ne change pas de polarité et soit toujours négative par rapport au sens passant des thyristors ; en d'autres termes, il faut que la tension instantanée du groupe « en onduleur » soit toujours supérieure à celle du groupe « en redresseur ».

Ceci est obtenu en écartant les courbes de la caractéristique $V_C = f(u_C)$ comme le montre la figure 12.3-75.

Là aussi, nous avons supposé que les caractéristiques étaient linéarisées par la fonction de transfert des circuits de commande de la forme « arc cosinus ».



On adopte pour ce montage une commande à deux voies suivant le schéma synoptique de la figure ci-dessous.



Les tensions de commande des circuits d'amorçage des deux convertisseurs sont telles qu'aucun courant de circulation ne peut apparaître entre les convertisseurs « direct » et « inverse ».

L'étude des courbes de tension montre que le choix de α_0 dépend du montage. Par exemple, pour le montage antiparallèle, on trouve que α_0 doit être supérieur ou égal à 140° , en pont de Graëtz triphasé.

Il est nécessaire de prendre, en plus, une marge de sécurité qui tiendra compte de l'évolution rapide du régulateur en régime dynamique, eu égard au retard statistique du redresseur. Une valeur de α_0 comprise entre 140° et 150° est recommandée, pour le montage cité.

Ceci élimine l'emploi du « marqueur » et en échange, impose que le régulateur soit défini pour protéger le montage contre tout défaut de recombinaison en onduleur.

La figure 12.3-77 illustre un exemple de fonctionnement d'un réversible à bande morte, en montage antiparallèle.

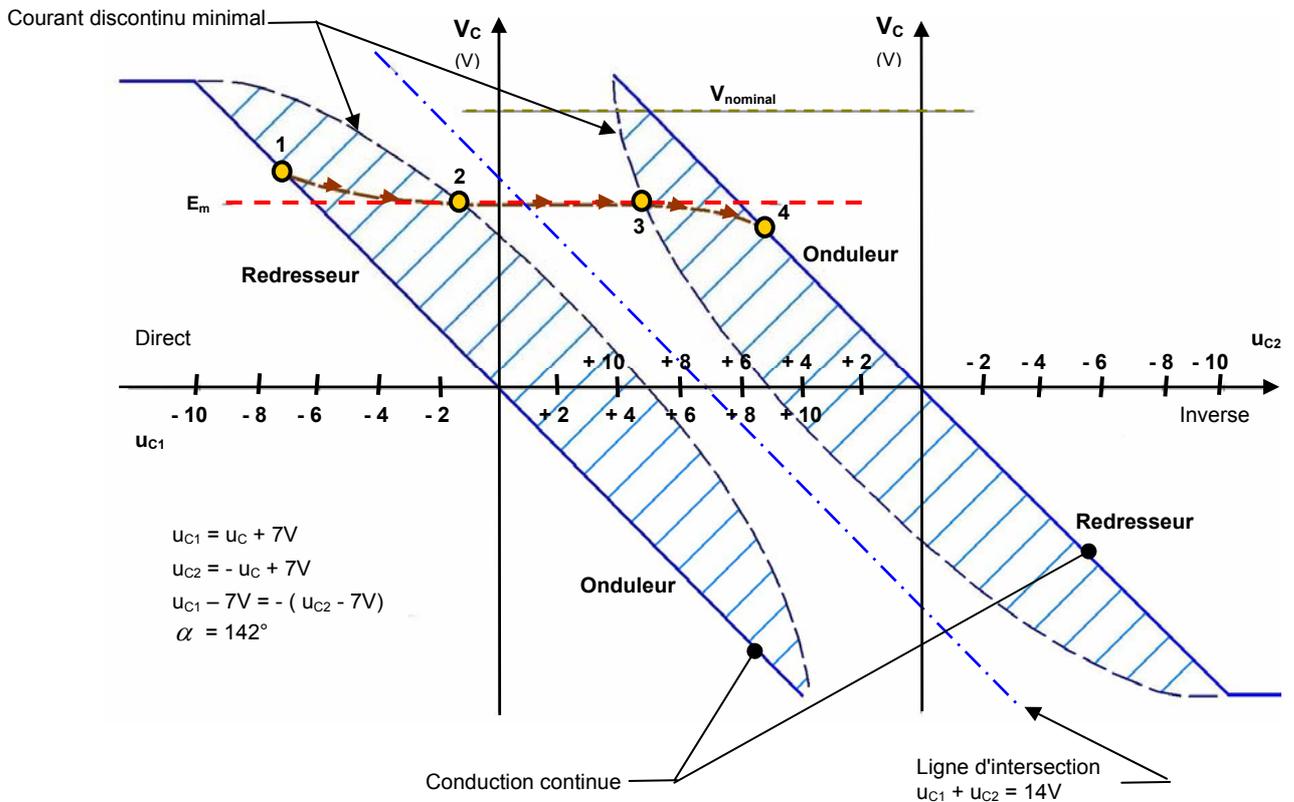


Fig. 12.3-77

Sur la figure 12.3-77, nous remarquons qu'aucun courant ne peut circuler au point $u_{C1} = u_{C2} \Rightarrow \alpha_0 \cong 140^\circ$.

Quand la tension V_b (référence) devient négative, u_{C1} a une variation négative à partir du point α_0 ; u_{C2} a une variation de même amplitude mais de signe opposé. L'angle de retard α_1 du groupe « direct » tend vers 0° tandis que celui du groupe « inverse » tend vers 180° . Le courant apparaît sur le convertisseur direct et la tension redressée augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de consigne fixée par V_b .

Une inversion du courant d'induit du moteur peut être expliquée à l'aide de la figure précédente.

Nous avons représenté sur la figure la force contre-électromotrice de la machine par le trait pointillé (rouge) repéré E_m .

- Au point 1, le convertisseur direct fonctionne en redresseur et le convertisseur inverse est alors bloqué.

Si l'on demande au système une vitesse plus faible, la référence V_b diminue, demandant ainsi une inversion du courant. Ceci provoque une variation positive de u_{C1} et une variation négative de u_{C2} .

- Au point 2, le courant (qui était délivré par le groupe « direct ») s'annule et V_C est égal à E_m .
- Au point 3, u_{C2} atteint une valeur suffisamment négative pour que le courant s'établisse dans le groupe « inverse ».
- Finalement, au point 4, l'équilibre est atteint sur le convertisseur « inverse » et V_C correspond à la valeur de consigne fixée par V_b .

On effectue la séquence opposée pour repasser du groupe « inverse » au groupe « direct ».

La figure suivante montre une inversion de courant.

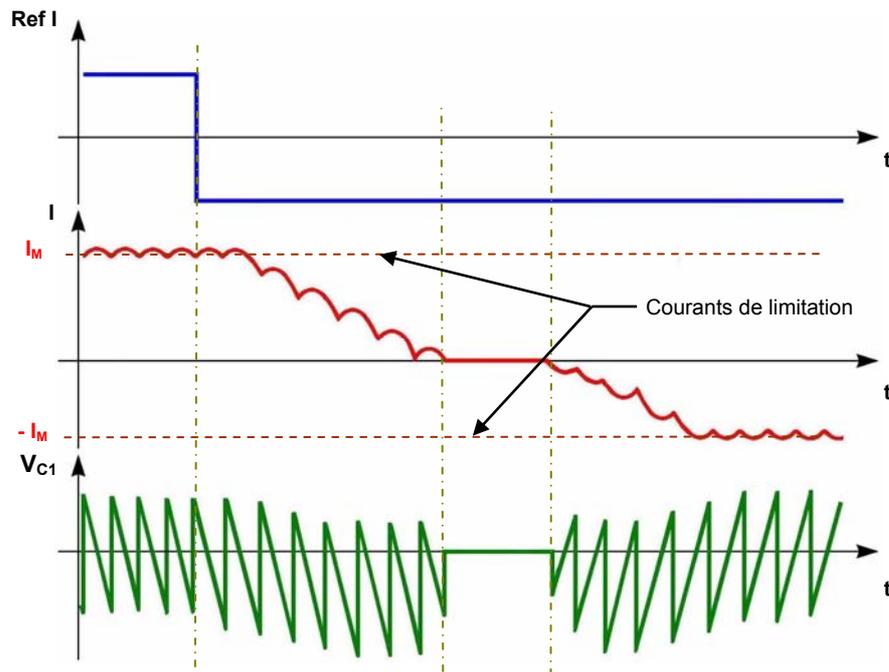


Fig. 12.3-78

Durant le temps de franchissement de la bande morte, aucun courant ne traverse le moteur, donc aucun couple n'est disponible sur la machine. La durée de ce temps mort dépend :

- de la valeur de α_0 (compromis entre la sécurité de fonctionnement et la durée du temps mort),
- de la rapidité de la régulation qui doit être compatible avec les performances dynamiques acceptables par le système. Une trop grande rapidité peut entraîner des courants circulants, transitoirement très importants et une protection insuffisante contre les défauts de recombinaison.

En pratique, ce temps mort est de l'ordre de 10 à 15 ms, ce qui ne constitue une gêne que si les performances dynamiques demandées au système sont extrêmement sévères.

12.3.8.4. Montages à logique d'inversion ou de basculement

Cette technique illustrée par le schéma de principe ci-dessous consiste à n'avoir à chaque instant qu'un groupe redresseur en conduction.

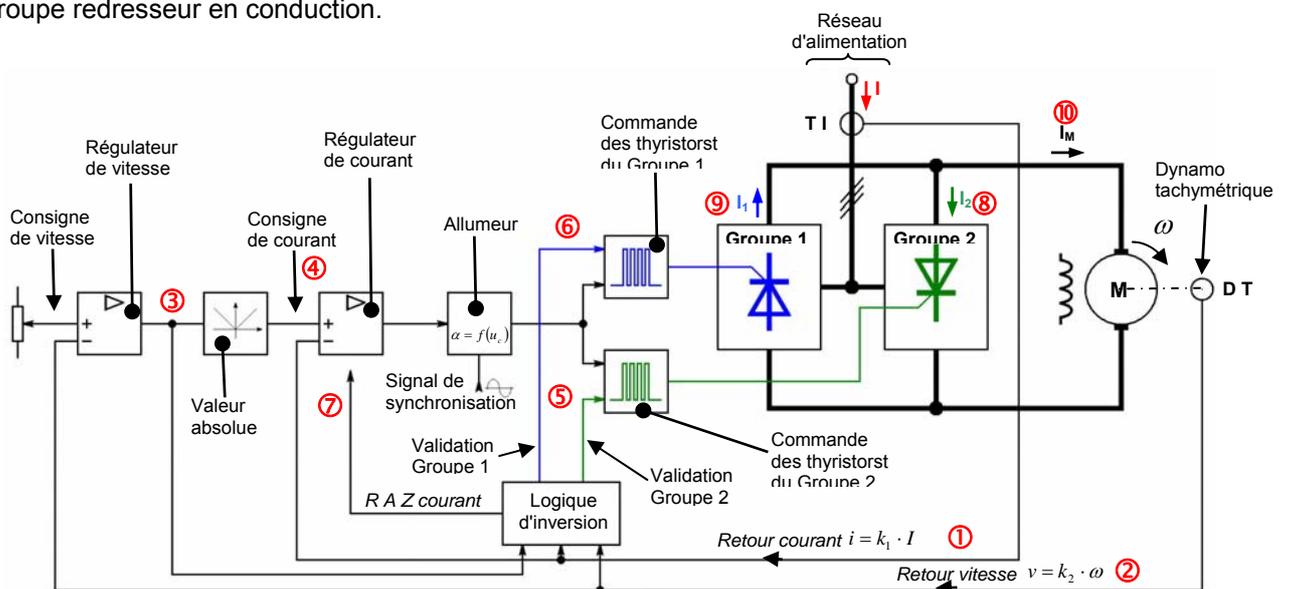


Fig. 12.3-79

Dans ce cas, le choix du groupe qui doit conduire est fait par un circuit logique d'inversion à partir de certaines informations : signe de l'écart de vitesse, niveau du courant induit, niveau et signe de la vitesse, etc. La conduction ou le blocage d'un groupe de redressement est assuré par l'application ou la suppression des impulsions de gâchette des thyristors de celui-ci.

Le fonctionnement d'un tel système est le suivant : la consigne de vitesse symbolisée par un potentiomètre est appliquée à l'entrée du régulateur de vitesse qui en compare la valeur avec celle de la vitesse réelle de la machine élaborée à partir d'une génératrice tachymétrique. L'écart amplifié ③ en sortie du régulateur de vitesse est ensuite redressé au moyen de la fonction valeur absolue. Le nouveau signal ④ et devient alors la référence courant (éventuellement écrêté afin de régler le niveau maximal de l'intensité de limitation du moteur). Cette grandeur est elle-même comparée au courant induit par l'intermédiaire d'un circuit de lecture composé de T.I. (Transformateurs d'intensité) et de divers éléments d'adaptation (redressement, résistances de charge, etc.). Il en résulte un signal qui, transformé en impulsions synchronisées par rapport au réseau d'alimentation, pilote les allumeurs des redresseurs contrôlés validés par le circuit de logique d'inversion, afin de réaliser la variation de vitesse souhaitée.

La sélection du groupe redresseur est effectuée par les sorties ⑧ et ⑨ du circuit logique d'inversion et le forçage à zéro (R.A.Z.) de la référence intensité par la sortie ⑦ afin de demander et de maintenir le courant nul pendant la phase de changement de pont redresseur.

Ceci est réalisé à partir des informations suivantes :

- le retour courant ①
- le retour vitesse ②
- le signal de sortie du régulateur de vitesse ③

Le passage d'un groupe redresseur à l'autre est initialisé par la détection du changement de signe en sortie du régulateur de vitesse.

La figure 12.3-80 illustre le diagramme de fonctionnement d'un variateur réversible à logique d'inversion.

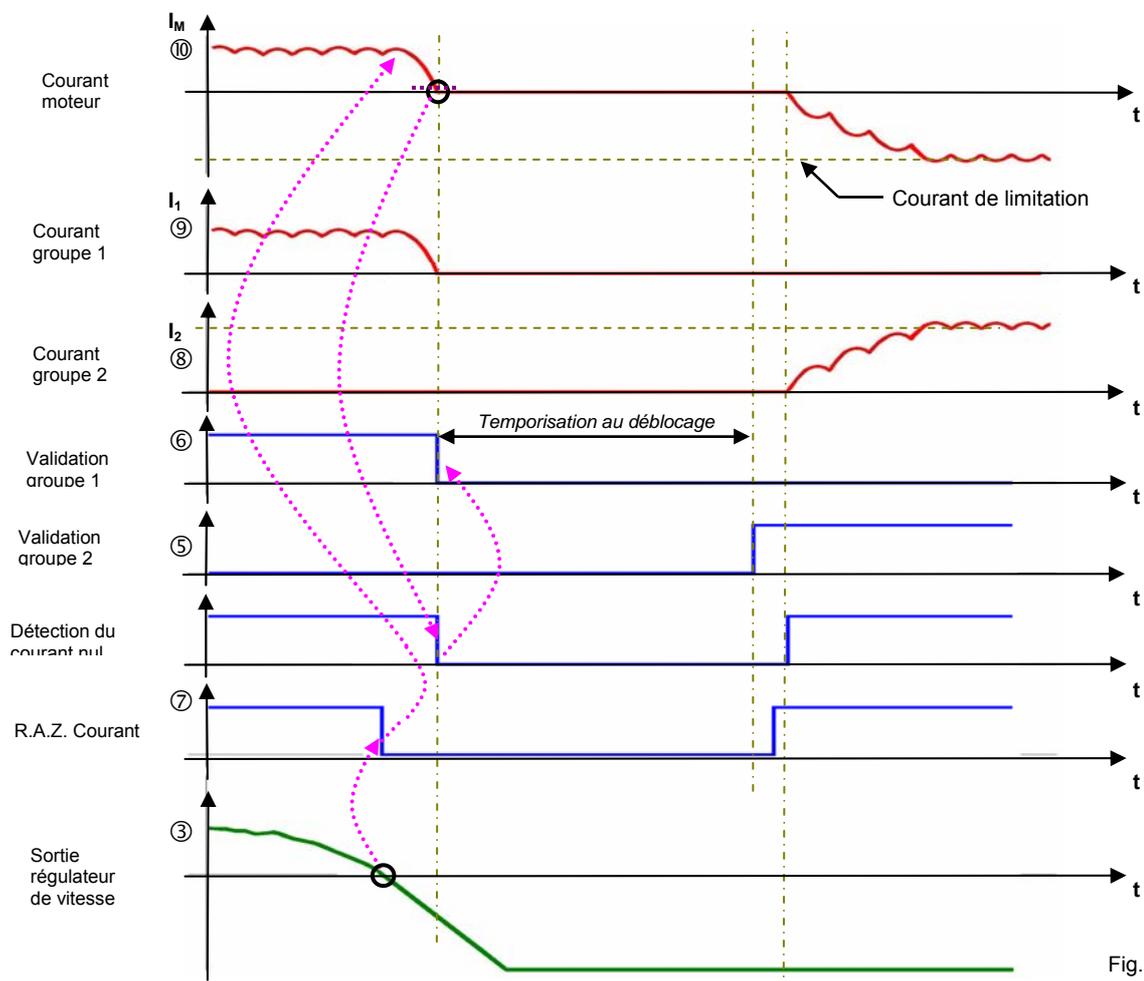


Fig. 12.3-80

A partir du diagramme précédent, on en déduit que le changement de pont puissance se déroule en quatre temps principaux :

- 1) Annulation du courant de charge, avec vérification de cette annulation dès qu'une inversion du signe de l'erreur vitesse est détectée. Dans cette phase de fonctionnement, l'angle de retard est rapidement augmenté jusqu'à sa valeur maximale ($\alpha = 150^\circ$, fonctionnement plein onduleur). Le courant décroît rapidement jusqu'à son annulation.
- 2) Suppression des impulsions de commande des thyristors lorsque le courant de charge est devenu suffisamment petit pour éviter tout défaut de recombinaison. Pour cela, un capteur de courant (T.I. ou shunt) fournit une information « courant nul » qui interdit le blocage des impulsions tant que la valeur du reste courant au-dessus d'un certain seuil prédéfini.
En pratique ce seuil est fixé généralement au cinquantième du courant nominal moteur ($0,02 I_{nom}$).
Il faut remarquer que cette détection du zéro de courant n'est pas aisée (sensibilité et précision du capteur). Mais, la conduction discontinue est atteinte au-dessous d'un certain niveau de courant et il devient alors possible de supprimer les impulsions sans provoquer de défaut.
- 3) Temporisation au déblocage de l'autre groupe. Ce temps mort doit être suffisant pour être certain du blocage de tous les thyristors car il faut toujours attendre le désamorçage naturel du ou des thyristors conducteurs avant d'appliquer les impulsions sur l'autre groupe, au risque de provoquer une conduction entre ponts (court-circuit entre phases).
Cette attente de sécurité doit être au moins égale au retard statistique du montage T/m, où T représente la période de la tension d'alimentation (20 ms en 50Hz) et « m » l'indice de pulsation du montage (6 pour un pont de Graëtz triphasé). Pour ce type de montage, la temporisation théorique est ainsi de $\Delta t = 20 / 6 = 3,33$ ms. En pratique on prend 4 ms au minimum pour plus de sécurité.
- 4) Déblocage de l'autre groupe. Ce déblocage consiste à assurer la présence des impulsions de commande sur le groupe qui était initialement bloqué et qui va maintenant prendre le contrôle du courant demandé par le système, puis à supprimer la R.A.Z. de la boucle de courant. Sous l'action du régulateur de courant, le courant continu redressé atteint rapidement la valeur désirée.

Pour le calage des groupes de redressement (valeur de α_0), il faut tenir compte que durant les courts intervalles de temps où les deux groupes sont bloqués, la régulation de vitesse se trouve en boucle ouverte. La tension de commande des allumeurs est alors maintenue, par la commande logique de la R.A.Z. du courant, à une valeur correspondant au fonctionnement en butée onduleur afin d'éviter toute surintensité au déblocage des ponts.

Remarque

En conduction discontinue, sur un induit de moteur, le courant nul est obtenu pour un angle de retard à l'amorçage de 110° à 120° .

La figure 12.3-81 montre le calage des caractéristiques $V_C = f(u_C)$ linéarisées là encore par la fonction de transfert des circuits de commande.

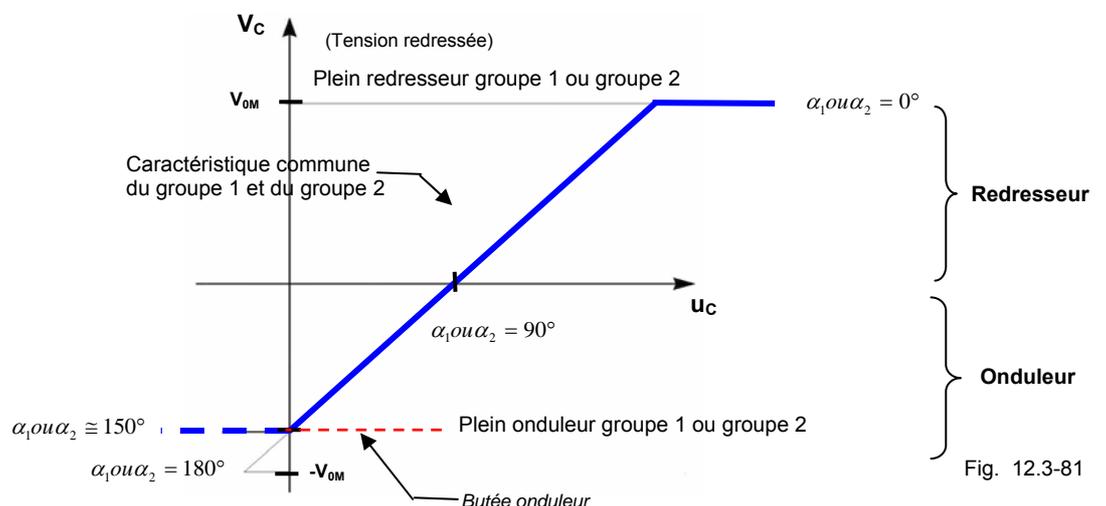


Fig. 12.3-81

12.3.8.5. Comparaison des différentes techniques de réversibilité

La comparaison des différentes techniques présentées conduit aux remarques suivantes :

- Le montage à circulation de courant, du fait de la suppression du temps mort pendant les phases d'inversion, est utilisé dans les applications nécessitant une dynamique de fonctionnement très élevée. Malheureusement, cette technique conduit très vite à un encombrement prohibitif des inductances de limitation ; de plus, l'existence du courant circulant se traduit par une surcharge non négligeable des thyristors et du transformateur. Enfin, le courant réactif résultant de ce montage diminue le facteur de puissance de l'installation. C'est pourquoi, cette technique n'est pratiquement plus utilisée de nos jours, et a été progressivement remplacée par des techniques de convertisseurs alternatif / alternatif pilotant des machines asynchrones ou synchrones à haute performances.
- Le montage à bande morte conduit à un temps mort de 10 à 15 ms, ce qui peut, dans certaines applications, être incompatible avec les performances dynamiques demandées au système, puisque durant ce temps, aucun couple n'est appliqué à la machine. Cette technique n'est plus utilisée aujourd'hui.
- Le montage à logique d'inversion, qui peut paraître le plus sophistiqué de par son électronique séquentielle, reste encore la technique la plus usitée pour le pilotage des commutateurs de courant réversibles quatre quadrants alimentant des machines à courant continu. On les rencontre essentiellement pour des applications de moyennes et de fortes puissances telles que la commande des mouvements verticaux des engins de levage.

Choix de la tension d'alimentation.

La tension monophasée est économique jusqu'à 20 kW environ. Au-dessus, le déclassement du moteur qu'impose l'ondulation du courant rend préférable l'utilisation d'une alimentation triphasée. Par ailleurs, les départs monophasés industriels sont généralement limités à de faibles puissances. L'alimentation triphasée en 220 ou 380 V conduit à des moteurs de 240 V ou 440 V : cette solution convient bien pour quelques centaines de kilowatts. Pour des puissances plus grandes, il est préférable de choisir des transformateurs et des moteurs de tension supérieure.

Enfin le montage en pont de Graëtz est évidemment préférable au montage « triphasé simple » et la configuration antiparallèle est plus simple du point de vue construction du transformateur. D'ailleurs, ce dernier ne s'impose plus dès lors que la tension du réseau et celle du moteur ont des valeurs homogènes, si ce n'est pour des problèmes d'isolement.

12.3.8.6. Problèmes particuliers à l'alimentation de charges très selfiques (inducteurs)

Les montages décrits précédemment peuvent être utilisés pour les alimentations réversibles des inducteurs.

Dans ce dernier cas, il existe une différence importante dans le fonctionnement :

- Pour un moteur à courant continu commandé par l'induit nous avons vu au chapitre introduction 12.3.8.1. que le freinage, ou la récupération de l'énergie cinétique et mécanique, se fait au moyen d'un groupe onduleur par l'inversion du courant d'induit de la machine.
- Pour un inducteur piloté au moyen d'un variateur réversible, la récupération de l'énergie électromagnétique emmagasinée dans l'inductance se fait sur le pont d'alimentation positionné en zone onduleur sans inversion du sens du courant de circulation dans le circuit. La récupération se fait ainsi sans basculement, sur le même groupe que celui utilisé primitivement pour la marche en redresseur, ceci jusqu'à obtention du courant nul.

L'inversion du courant dans le circuit de l'inducteur s'effectue ensuite par la mise en oeuvre du second groupe qui opère alors en redresseur après avoir vérifié que le courant était bien nul avant de procéder à la validation de ce second pont puissance.

En général, la tension efficace des deux groupes de redresseurs est supérieure à la tension nominale de l'inducteur piloté (de 1,5 à 3 fois selon les applications) afin d'améliorer les caractéristiques dynamiques de régulation (forcing).

La figure 12.3-82 ci-dessous permet de montrer le mode de fonctionnement d'un convertisseur réversible sur l'inducteur.

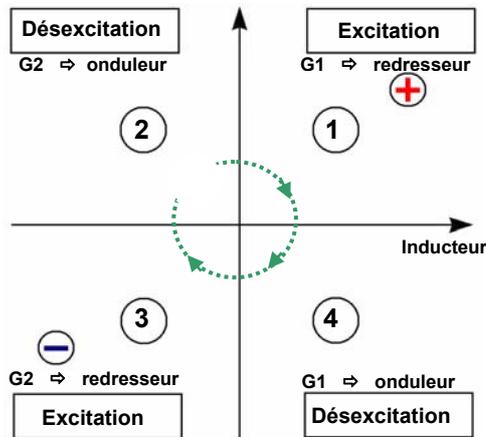


Fig. 12.3-82

Le fonctionnement se résume aux différentes phases suivantes :

- **1^{ère} phase** : quadrant 1 : redresseur 1 : excitation sens « plus »
- **2^{ème} phase** : quadrant 4 : onduleur 1 : récupération
- **3^{ème} phase** : quadrant 3 : redresseur 2 : excitation sens « moins ».

La séquence de commande des alimentations réversibles d'inducteurs reste la même que celle des induits.

Toutefois, certaines fonctions doivent être adaptées car la conduction discontinue du courant n'est atteinte qu'à de très faibles intensités. Le niveau de courant à la limite de la conduction discontinue / continue est du même ordre de grandeur que la sensibilité du détecteur de courant nul et que le courant de maintien des thyristors. C'est pourquoi, il est très souvent nécessaire de câbler une résistance en parallèle avec l'inducteur, pour assurer le passage du courant en régime discontinu.

Si l'on suppose que le courant de charge est encore en conduction continue lorsqu'on atteint le courant de maintien d'un thyristor, celui-ci se désamorce et coupe instantanément le courant inducteur, d'où une surtension importante ($U = L \, di/dt$) limitée uniquement par la résistance en parallèle. En l'absence de résistance, ou si celle-ci est mal dimensionnée, cette surtension peut provoquer la destruction des thyristors.

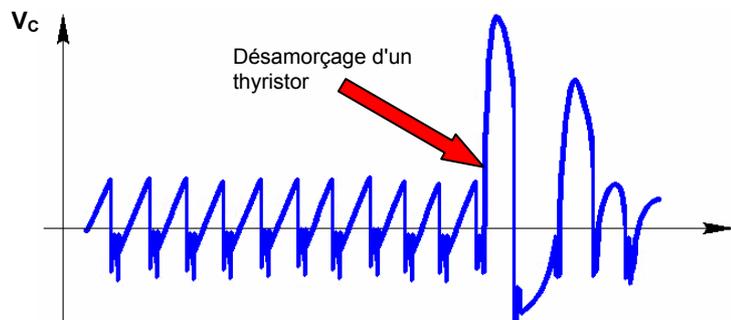


Fig. 12.3-83

La figure 12.3-83 illustre un exemple d'évolution de la tension de sortie d'un convertisseur pour un faible courant.

La surtension qui apparaît est due au désamorçage des thyristors dès que le courant qui les parcourt est tel que $i < I_H$.

Pour pallier à cette difficulté, la solution consiste à utiliser des impulsions larges ou un train d'impulsions pour la commande de gâchette des thyristors. Ainsi les thyristors ne se désamorcent plus lorsque le courant contrôlé atteint le niveau de maintien (fonctionnement en transistor) et l'on peut ainsi atteindre sans difficulté le courant discontinu autorisant le blocage des impulsions de commande sans incident de fonctionnement.

Le second problème est également lié à la faible amplitude de l'information « courant nul ». En effet, si la détection du courant est faite comme pour la commande d'induit par des transformateurs d'intensité, au courant redressé s'ajoutant les courants des réseaux RC des circuits de protection entre anodes et cathodes des thyristors, ceux-ci ne sont plus négligeables pour la détection de courant nul. Ils peuvent apporter un bruit d'amplitude plusieurs fois supérieure au signal utile.

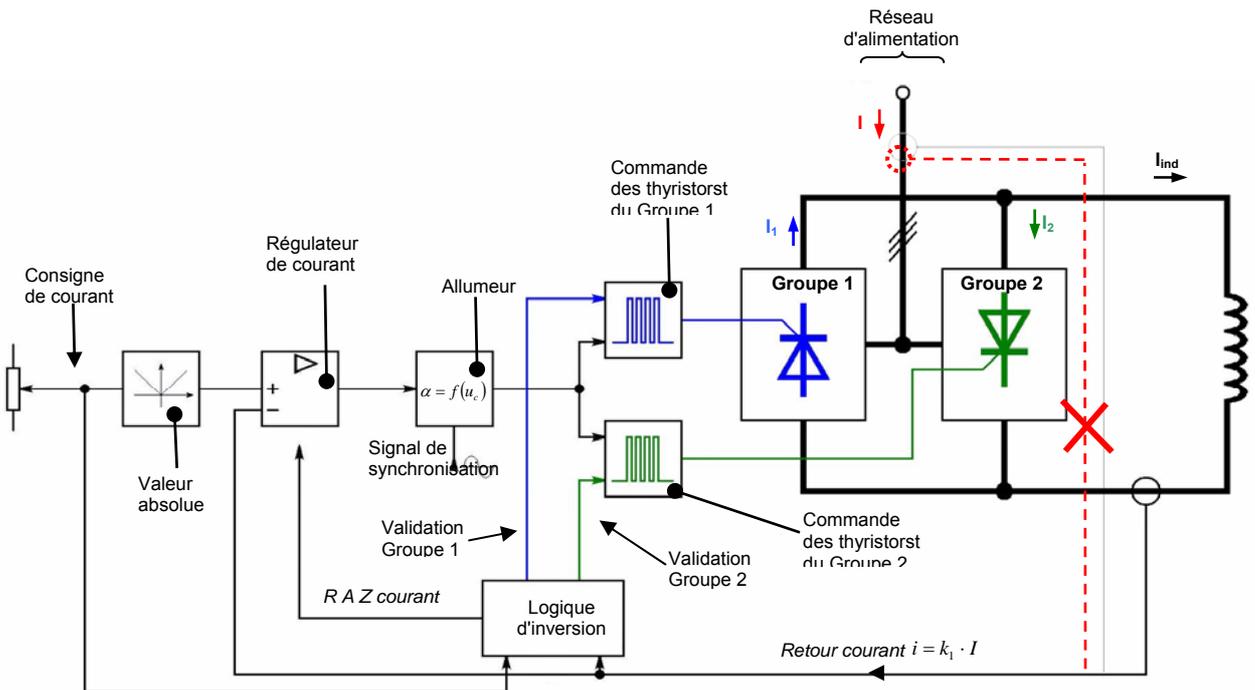


Fig. 12.3-84

Nous voyons ainsi que si la détection du courant par T.I. remplit bien toutes ses fonctions sur un inductif, il n'en est pas de même pour le contrôle du courant circulant dans un inducteur.

C'est la raison qui justifie de placer le capteur de courant du côté continu, comme le montre le schéma synoptique de la figure 12.3-84.

Parmi les solutions de réalisation ce capteur nous citerons en particulier :

- le shunt résistif dont la tension à ses bornes, image du courant inducteur, est isolée par un circuit spécifique avant d'être aiguillée vers le régulateur de courant et la fonction logique d'inversion,
- le capteur à effet Hall, solution plus récente, qui avec son alimentation isolée assure l'isolement galvanique entre la partie puissance et la commande électronique tout en fournissant une image très convenable du courant inducteur.