

AUTOMATISMES

Freinage électronique des

▼ Les variateurs de vitesse ont beaucoup évolué ces dernières années, tant en termes de performance technique que de coût. Cela leur a permis de conquérir de nouvelles positions, aussi bien dans les applications techniquement difficiles (dans le "motion control") que les applications "économiques" (contrôle de ventilateurs, de pompes, etc.). Dans les multiples conférences et articles techniques consacrés aux variateurs de vitesse, un domaine est quelque peu délaissé: le freinage. Siemens rappelle ici les différentes techniques de freinage électronique mises en œuvre dans les variateurs.

Comme leur nom l'indique les variateurs de vitesse ont pour vocation de pouvoir faire varier la vitesse d'un moteur. Pour ce faire, ils font varier la fréquence du courant appliqué aux phases du moteur. Au glissement près, la vitesse est proportionnelle à la fréquence. Pour augmenter la vitesse, il "suffit" donc d'augmenter la fréquence. Plus

l'inertie de la charge à entraîner est élevée, plus il faudra du temps pour atteindre la vitesse demandée.

Pour réduire la vitesse, c'est un peu le même principe: il faut réduire la fréquence. Lorsque l'on a affaire à un convoyeur montant, le ralentissement est immédiat. Par contre, lorsque l'on a affaire à un ventilateur ou une centrifugeuse, il est évident que l'inertie de l'équipement est telle qu'il faudra plus de temps pour réduire la vitesse. Cette inertie peut être importante: sur certaines machines tournantes, lorsque l'on coupe l'alimentation, il faut attendre plusieurs minutes pour atteindre l'arrêt complet...

Quand on parle de

"freinage", il faut bien préciser les choses. Il existe des techniques de "vrai" freinage, afin d'obtenir un arrêt rapide de l'entraînement, le plus souvent en agissant directement sur la charge. Mais quand on parle de freinage, il s'agit la plupart du temps de mettre en place des techniques pour "accompagner" le variateur lorsqu'on cherche à diminuer la vitesse:

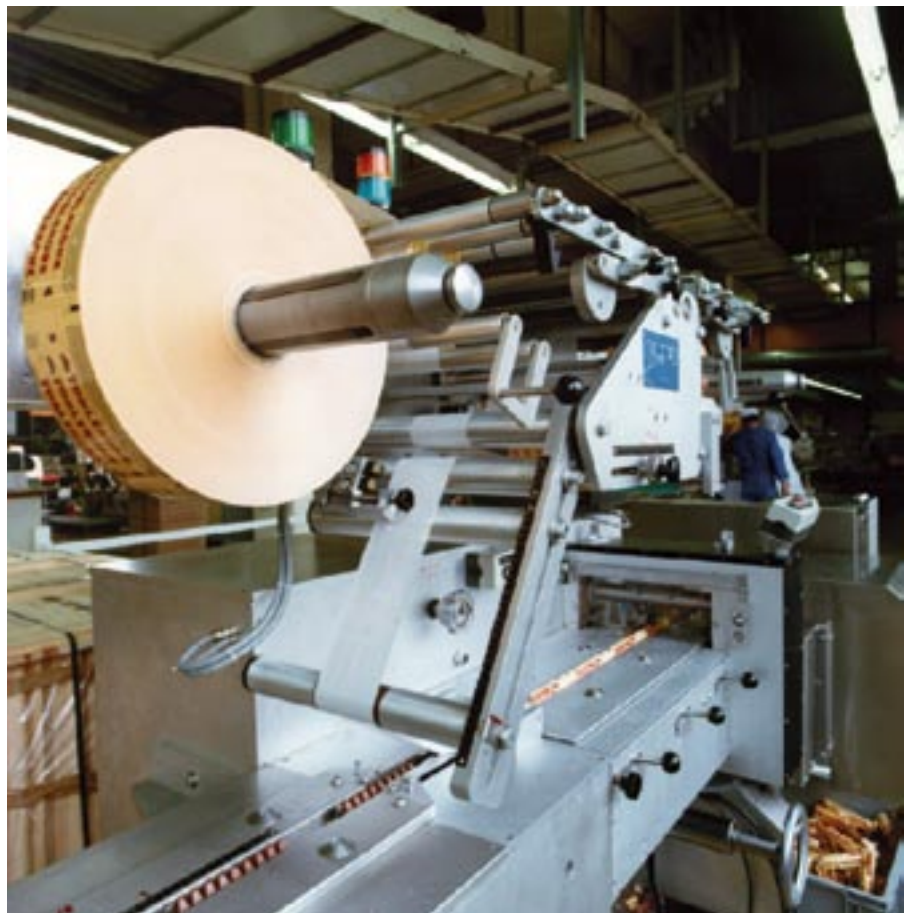
avec ces techniques qualifiées souvent de "freinage électronique", on arrive à décélérer fortement jusqu'à la vitesse requise.

Des freinages opérationnels sans variateur

La solution la plus triviale pour arrêter un moteur est d'utiliser un frein mécanique ou électromécanique par friction sur l'arbre. Ce type de freinage est utilisé dans les applications de sécurité (lorsqu'une machine dangereuse doit être arrêtée aussi rapidement que possible) ou dans les applications de levage, où il faut éviter que la charge ne redescende lorsqu'une consigne d'arrêt du moteur est envoyée au variateur (on parle alors de "frein de maintien" ou de "moteur frein").

L'essentiel

- ▶ Les variateurs de vitesse permettent de changer la vitesse, et donc d'accélérer ou ralentir une charge
- ▶ Lorsque l'on veut ralentir (freiner) une charge qui présente une énergie cinétique (volant d'inertie, par exemple) ou potentielle (convoyeur descendant, par exemple), le moteur fonctionne en "génératrice"
- ▶ Dans ce mode, le moteur renvoie un courant au variateur, qui a pour effet d'élever la tension du bus à courant continu (CC) du circuit intermédiaire du variateur
- ▶ Pour éviter que cette tension n'atteigne un niveau prohibitif (qui déclencherait une sécurité et désactiverait le variateur), il faut évacuer cette énergie
- ▶ Il existe plusieurs techniques pour cela



Lorsqu'un variateur de vitesse cherche à ralentir une charge entraînée, l'énergie cinétique de la charge est absorbée par le moteur et renvoyée sous forme de courant vers le variateur. Pour que le ralentissement (et donc le freinage) soit effectif, il faut que le variateur puisse évacuer cette énergie électrique: c'est le rôle des "techniques de freinage".

moteurs : que choisir ?

Il existe d'autres techniques, électriques, qui consistent à agir sur le moteur lui-même. C'est le cas du freinage par contre-courant (on croise l'alimentation des phases, ce qui a pour effet d'inverser le sens de rotation du champ tournant à l'intérieur du moteur). C'est le cas aussi du freinage par injection de courant continu dans le stator, qui a pour effet de créer un couple de freinage.

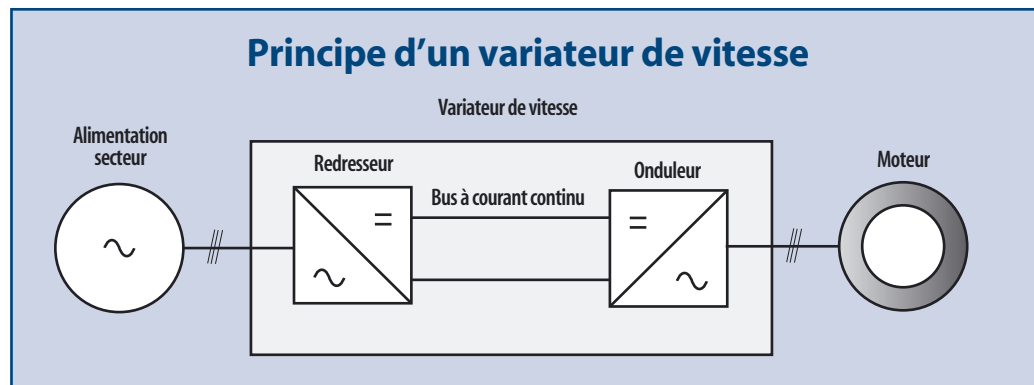
A côté de ces techniques, il y a, comme nous l'avons dit, les techniques de "freinage électronique", mises en œuvre dans les installations équipées de variateurs de vitesse. Pour bien les maîtriser, il faut connaître les différents régimes de fonctionnement des moteurs et le principe de base de fonctionnement d'un variateur.

Fonctionnement en mode "moteur" ou "génératrice" ?

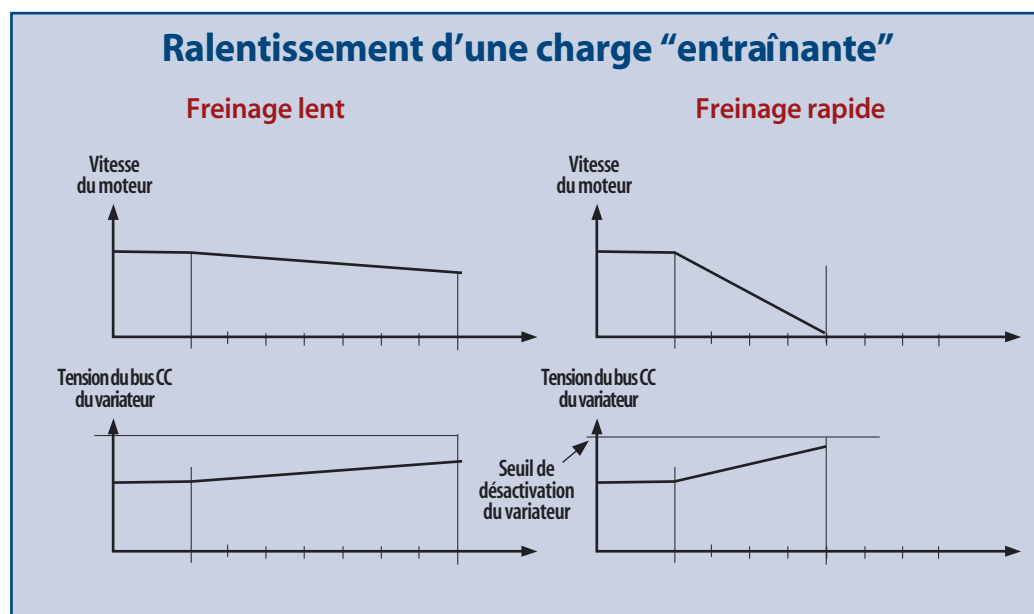
Le rôle d'un moteur est d'entraîner une charge. Lorsque l'on veut faire une montée en vitesse (et que l'on augmente donc la



fréquence appliquée aux bobinages du moteur), le moteur transforme l'énergie électrique fournie par le variateur en une énergie mécanique transmise sur l'arbre. Il s'agit là du mode de fonctionnement "moteur", tout ce qu'il y a de plus classique. Il existe un deuxième mode, dit fonctionnement en "génératrice". Ce mode se rencontre lorsque l'on cherche à ralentir une charge présentant une inertie: quand bien même le variateur cherche à réduire la vitesse, la charge continue d'entraîner le moteur. Un autre exemple



Tous les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones suivent le même schéma de principe : on y trouve un redresseur qui transforme le courant alternatif du secteur en un courant continu et un onduleur qui transforme le courant continu en un courant alternatif de fréquence variable. L'onduleur est réversible, c'est-à-dire qu'il peut envoyer du courant au moteur mais aussi faire l'inverse, c'est-à-dire transformer un courant alternatif issu du moteur en un courant continu qui vient alimenter le bus à courant continu du circuit intermédiaire. Cette propriété est essentielle dans les applications de freinage : en effet, dans ces applications, le moteur fonctionne en génératrice (autrement dit, la charge, du fait de son inertie, entraîne le moteur) et le courant issu du moteur vient alimenter le bus à courant continu. Toutes les techniques de freinage ont pour but d'évacuer ce courant.

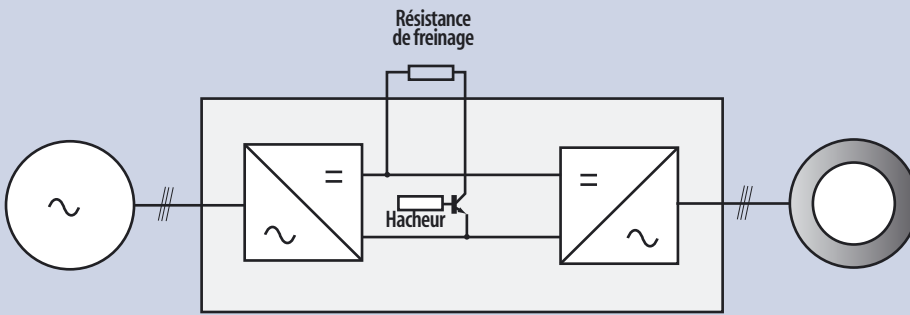


Lorsque l'on veut ralentir ou arrêter une charge, on paramètre une pente de décélération dans le variateur. Si le moteur fonctionne en mode "génératrice" (c'est le cas lorsque l'on cherche à ralentir une charge présentant une certaine inertie), le courant qu'il renvoie dans le variateur a pour effet d'élever le niveau de la tension du bus à courant continu (bus CC) du variateur. Plus la pente de décélération est forte (c'est-à-dire plus on souhaite un freinage rapide), plus la tension du bus à courant continu s'élève rapidement. Si cette tension dépasse un certain seuil, une sécurité est déclenchée et le variateur est désactivé. Pour éviter cela, il existe plusieurs techniques pour "pomper" le courant du bus CC et diminuer ainsi la tension du bus CC.

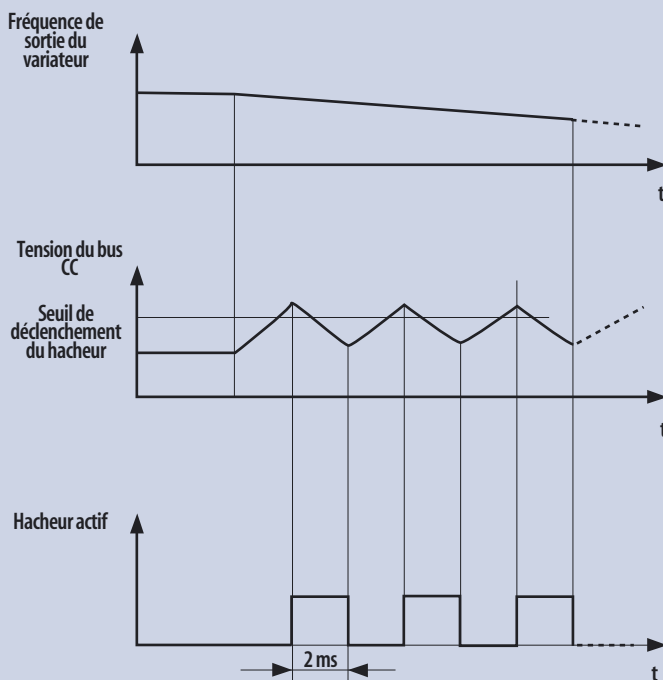
de fonctionnement en génératrice se présente en levage lorsque l'on cherche à descendre une charge, ou sur les tapis roulants et les convoyeurs "descendants" (pour lesquels la charge est transportée vers le bas). Dans tous ces cas, la charge applique un couple sur l'arbre du moteur et celui-ci trans-

forme l'énergie mécanique présente sur l'arbre du moteur en une énergie électrique. Cette énergie électrique se "matérialise" par un courant qui est envoyé vers le variateur. En résumé, en mode "moteur", le variateur envoie un courant au moteur, en mode "génératrice", il reçoit un courant du moteur.

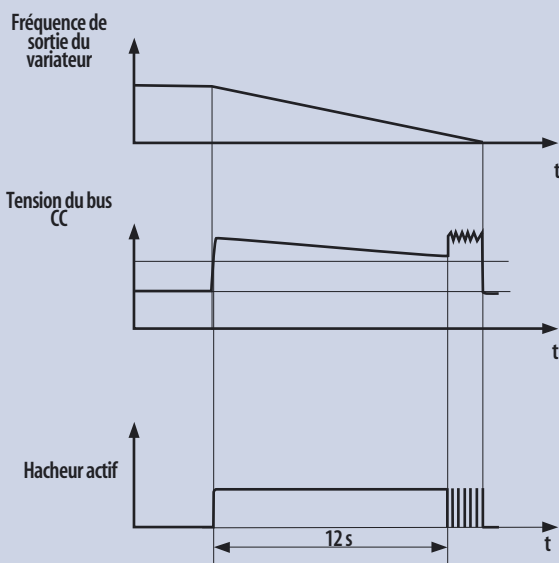
Freinage par résistance



Fonctionnement du hacheur pour une décélération lente (faible réserve d'énergie)



Fonctionnement du hacheur pour une décélération rapide



Sur le variateur, tout se passe sur le bus à courant continu

Pour aller plus loin, il faut connaître la structure d'un variateur de vitesse. Celui-ci comprend, du point de vue électrique, deux sous-ensembles : côté secteur, un redresseur qui transforme la tension alternative du secteur en une tension continue et côté moteur, un onduleur qui fournit la tension alternative variable aux trois phases du moteur. L'onduleur est alimenté par la tension continue délivrée par le redresseur : entre ces deux sous-ensembles, on a un circuit intermédiaire, en l'occurrence un bus à courant continu.

Lorsque le moteur fonctionne en mode "génératrice" (c'est-à-dire lorsqu'il est entraîné par la charge), le courant issu du moteur traverse l'onduleur et est "bloqué" par le redresseur. L'énergie transférée sur le bus à courant continu a pour effet d'élever la tension de ce bus. Les variateurs de vitesse sont protégés contre les élévations trop importantes de la tension du circuit intermédiaire. Si cette tension atteint un certain seuil, une sécurité est déclenchée et le moteur est mis hors tension.

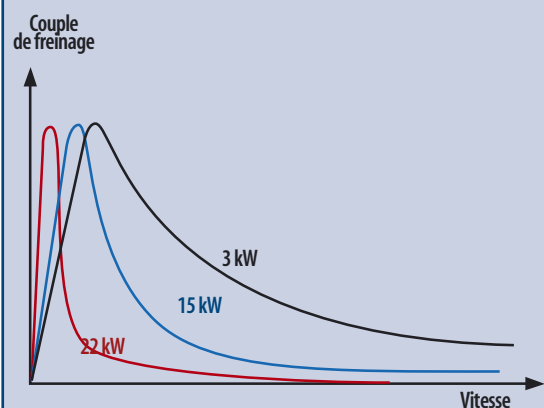
Tous les variateurs de vitesse offrent la possibilité de paramétrer le profil de décélération du moteur. Plus la pente de la rampe de décélération est forte, plus la tension du bus à courant continu va s'élever rapidement (lorsque le moteur fonctionne en "génératrice" ; bien entendu).

Certains modèles de variateurs proposent une régulation de la tension du bus à courant continu. Si la pente de la rampe de la décélération paramétrée se révèle trop forte (et que la restitution de l'énergie de freinage risque de trop élever la tension du bus), le régulateur change automatiquement la pente de la rampe. Dans ce cas, bien évidemment, c'est le régulateur qui choisit le temps optimal pour le ralentissement ou l'arrêt.

Mais si l'on veut un freinage énergique, en suivant une rampe de décélération paramétrée, il faut donc mettre en œuvre des moyens pour évacuer l'énergie renvoyée par le moteur sur le bus à courant continu du variateur. C'est ce que réalisent les techniques de freinage par résistance, par couplage avec d'autres variateurs ou par réinjection du courant sur le réseau. Avant de voir plus en détail ces modes de freinage, il faut évoquer

Dans le freinage rhéostatique ou dynamique, la diminution de la tension du bus à courant continu est obtenue en évacuant le courant dans une résistance électrique. Ce mode de freinage est très efficace mais l'énergie de freinage est dissipée en pure perte.

Freinage par injection de courant continu



Le freinage par injection de courant continu est facile à mettre en œuvre mais il est nettement moins efficace que le freinage par résistance. De plus, il n'est pas aussi précis. Ces courbes montrent que le freinage par courant continu est surtout efficace aux basses vitesses et aux basses puissances (il n'a de sens que pour des moteurs jusqu'à 15 kW).

deux autres modes, qui reposent sur un principe de fonctionnement radicalement différents : le freinage par injection de courant continu dans le moteur et le freinage combiné.

Le freinage par injection de courant continu pour arrêter le moteur

Le freinage par injection de courant continu dans le moteur peut être mis en œuvre même si l'installation ne comporte pas de variateur de vitesse (on trouve sur le marché des modules spécialement conçus pour ce type d'application). Mais, facile et peu coûteuse à implémenter, cette technique est en général proposée sur les variateurs de vitesse. Pour mettre en œuvre le freinage par injection de courant, il n'est pas nécessaire d'avoir paramétré une rampe de décélération (avec décrémentation progressive de la fréquence et de la tension de sortie du variateur). Le principe est le suivant : le variateur coupe l'alimentation du moteur et durant la phase d'arrêt, lorsque la vitesse est tombée en deçà d'un certain seuil, il injecte un courant continu dans le bobinage du stator, ce qui a pour effet de produire un couple de freinage. La valeur et la durée du courant de freinage (et par conséquent le couple de freinage), ainsi que la fréquence d'activation du freinage, peuvent être réglées par paramétrage.

Lors du freinage par injection de courant continu, l'énergie cinétique de l'entraînement est transformée en chaleur dissipée directement dans le moteur. Si ce freinage est

activé trop longtemps, il y a un risque de surchauffe.

Le freinage par injection de courant présente deux caractéristiques importantes : un couple de freinage élevé aux faibles vitesses et un couple de retenue à l'arrêt. Par contre, le couple de freinage généré se dégrade très vite lorsqu'on monte en vitesse. Il se dégrade également très rapidement lorsque l'on monte en puissance. Le freinage par injection de courant est donc surtout intéressant aux basses vitesses et pour les petits moteurs (disons jusqu'à 15 kW). Il ne peut être utilisé que pour dé-

célérer une charge mais pas ralentir une charge descendante (où le moteur est en permanence en mode frein). Il ne permet pas non

plus de contrôler précisément l'instant de l'arrêt. Cette technique est utilisée sur les centrifugeuses, les équipements de sciage, les ponceuses et les installations de transport.

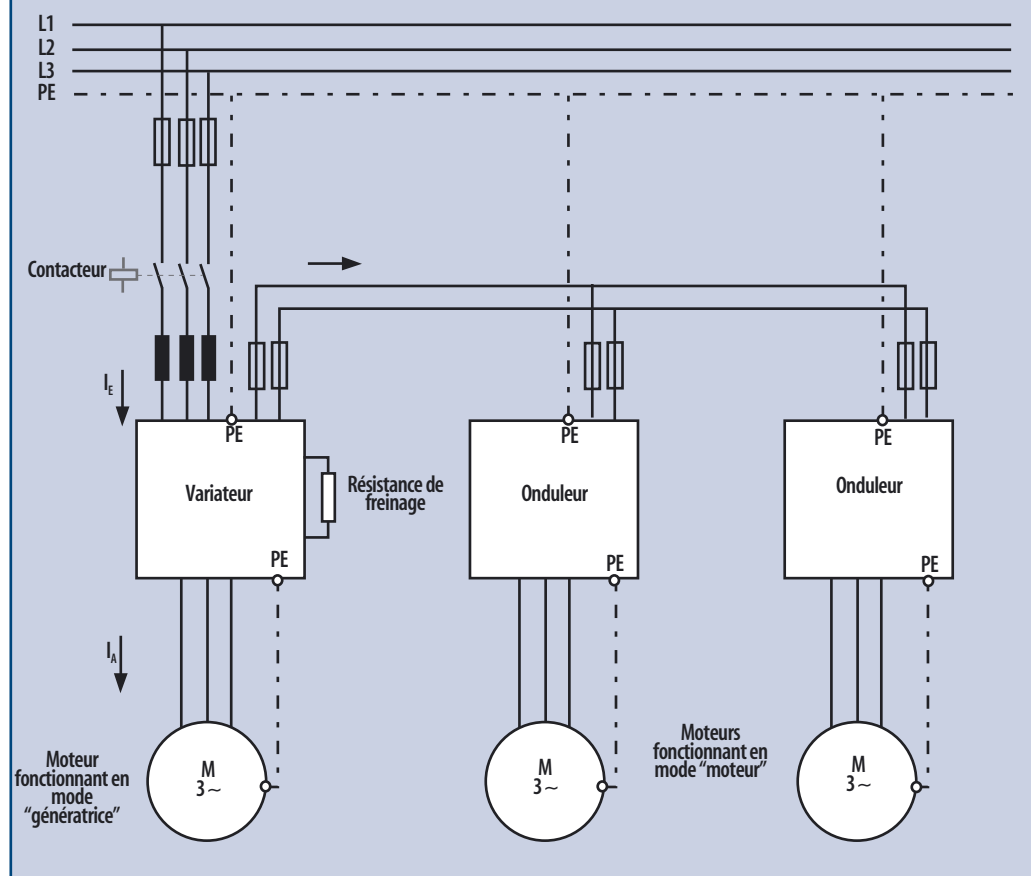


Mais compte tenu de ses limitations, elle ne connaît pas un énorme succès...

Le freinage combiné, pour aller un peu plus loin

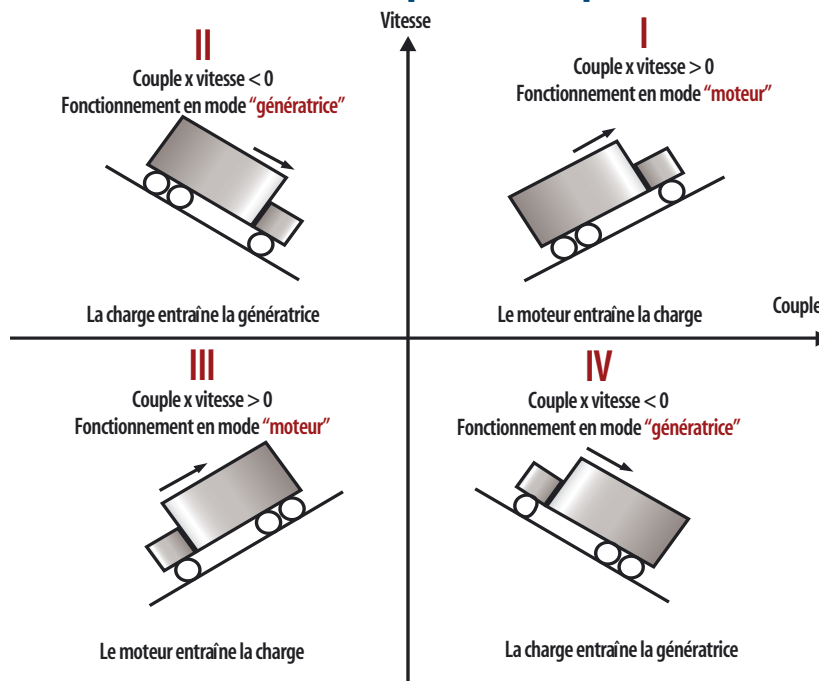
Le freinage par injection de courant "pur et dur" tel qu'on vient de le voir est mis en œuvre après avoir coupé l'alimentation du moteur. En le combinant avec un freinage régénératif (sur rampe de décélération paramétrée), il est possible de retarder son déclenchement le plus tard possible, c'est-à-

Freinage par couplage des variateurs



Un des moyens d'évacuer l'énergie de freinage renvoyée sur le bus continu consiste à raccorder (sur le bus) des onduleurs pilotant des moteurs fonctionnant uniquement en mode "moteur". Il faut trouver le bon compromis entre l'énergie récupérée et l'énergie consommée.

Un fonctionnement sur plusieurs quadrants



Les ensembles variateurs-moteurs peuvent en général fonctionner selon plusieurs modes, qui se distinguent par le sens de la vitesse appliquée au moteur et sa "relation" par rapport à la charge. Pour la vitesse, il y a deux sens possibles (horaire ou antihoraire, positive ou négative, marche avant ou marche arrière). Pour ce qui est de la relation à la charge, il y a là aussi deux cas à considérer, selon que le moteur fournit un couple à la charge ou qu'il reçoit un couple de la charge (le moteur fonctionne alors en frein pour la charge) : dans le premier cas, on parle de fonctionnement en mode "moteur" et dans le second de fonctionnement en mode "génératrice" (ou frein).

En combinant les deux sens de rotation et les deux régimes de fonctionnement ("moteur" ou "génératrice"), on définit 4 quadrants :

- dans le quadrant I, la vitesse et le couple sont positifs
- dans le quadrant II, la vitesse est positive, le couple est négatif
- dans le quadrant III, la vitesse et le couple sont tous deux négatifs

- dans le quadrant IV, la vitesse est négative, le couple est positif

Les variateurs permettent en général de réaliser des fonctionnements dans un, deux ou quatre quadrants. Dans cette notion de quadrants, il faut bien se comprendre. Par exemple, quand on parle de vitesse positive ou négative, il faut que le changement de sens soit effectué électroniquement par le variateur (si ce changement est effectué mécaniquement, par inversion des phases, après que la machine soit passée par une phase d'arrêt, on considère que le variateur n'actionne le moteur que dans un sens et il ne peut donc fonctionner, au mieux, que dans un ou deux quadrants).

Fonctionnement dans un quadrant. Il s'agit en l'occurrence du quadrant I ou du quadrant II.

Dans le quadrant I, la vitesse et le couple sont positifs, c'est-à-dire que le moteur ne tourne que dans un seul sens et qu'il fonctionne uniquement en régime "moteur". Ce mode correspond à toutes les applications où l'on cherche à augmenter la vitesse d'une charge

présentant une inertie. Il n'est pas possible de paramétrer la décélération de la charge (lorsque l'on veut arrêter la machine, on la laisse tourner en roue libre, l'énergie cinétique de rotation est dissipée dans la charge). Les pompes, bon nombre de ventilateurs, les perceuses électriques, les escaliers roulants ou les convoyeurs montants, etc. présentent un mode de fonctionnement dans le quadrant I.

Dans le quadrant II, la vitesse est positive mais le couple est négatif, autrement dit le moteur ne tourne que dans un sens et la charge entraîne le moteur. Les alternateurs de voiture, les éoliennes, les convoyeurs et tapis roulants descendants constituent des exemples de machines fonctionnant dans le quadrant II.

Fonctionnement dans deux quadrants.

C'est le cas des machines fonctionnant dans les quadrants I et II, c'est-à-dire qui tournent uniquement dans un sens mais qui peuvent fonctionner en mode moteur ou en mode "génératrice". Les laminoirs, les roues à inertie, les ventilateurs à décélération contrôlée, les dérouleurs constituent quelques exemples de telles machines.

Il existe également des machines fonctionnant dans les quadrants I et III, c'est-à-dire qui fonctionnent uniquement en mode moteur mais dans les deux sens. Ce sont par exemple les visseuses/dévisseuses électroniques et les portails automatiques.

Il existe aussi des cas de machines fonctionnant dans les quadrants I et IV, comme les applications de levage/descente de charges. Durant l'opération de montée, la vitesse et le couple sont positifs, durant l'opération de descente la vitesse est négative et le couple est positif.

Fonctionnement dans 4 quadrants. C'est le cas des variateurs qui peuvent actionner des moteurs dans les deux sens, et récupérer l'énergie de freinage. Les applications de robotique sont notamment concernées.

dire aux basses vitesses (c'est là qu'il est le plus efficace). Concrètement, lorsque le moteur est dans la phase de décélération, on suit l'évolution de la tension du circuit intermédiaire du variateur, et lorsque celle-ci dépasse un certain seuil (dit "seuil d'activation du freinage combiné"), un courant continu paramétrable est injecté.

Le freinage combiné permet donc de réaliser un freinage avec fréquence de moteur contrôlée et récupération minimale d'énergie. L'optimisation du temps de la rampe de descente et du freinage combiné permet d'obtenir un freinage efficace sans la mise en œuvre de composants supplémentaires (tel qu'une résistance de freinage par exemple).

Dans ce mode de freinage, une partie de l'énergie cinétique du moteur et de la machine de production est récupérée dans le variateur tandis que l'autre est transformée en chaleur dissipée dans le moteur. Si la quantité de chaleur dissipée est trop élevée ou que ce processus dure trop longtemps, il y a risque de surchauffe de l'entraînement !

Le freinage combiné peut convenir pour les mouvements horizontaux (par exemple les mécanismes de translation, les tapis roulants) et les mouvements verticaux (par exemple les mécanismes de levage).

Le freinage dynamique rhéostatique

La technique de freinage la plus utilisée est le freinage par résistance (freinage rhéostatique) : celui-ci consiste à dissiper dans une résistance électrique l'énergie de freinage récupérée dans le circuit intermédiaire du variateur. Cette technique de freinage peut être utilisée dans tous les régimes de fonctionnement du moteur (aussi bien pour ralentir une charge que pour l'arrêter) et dans toutes les applications (aussi bien les charges présentant une énergie cinétique que les charges avec énergie potentielle telles que les charges et les convoyeurs descendants). L'entraînement peut suivre précisément une consigne de décélération, il est possible de garantir un contrôle précis du mouvement dans un temps défini : on parle de "freinage dynamique". Autre avantage, l'énergie est récupérée par le variateur et il



Même logés sur des blocs d'entrées/sorties déportés, les variateurs de vitesse mettent en oeuvre des techniques de freinage.

n'y a donc pas d'échauffement du moteur lors du freinage.

La résistance de freinage est activée via un hacheur (chopper) placé dans le circuit intermédiaire. Comme son nom l'indique, le hacheur fonctionne en mode "tout ou rien" : il découpe la tension continue et envoie des impulsions de courant dans la résistance de freinage. Le temps de cycle du hacheur et son rapport cyclique (rapport entre le temps d'ouverture et la période) peuvent être paramétrés. Il est important de bien calibrer la

résistance de freinage en fonction du besoin : une résistance de freinage ne peut en effet évacuer qu'une quantité d'énergie de freinage limitée dans un laps de temps donné. Si la valeur de la résistance est trop faible, son échauffement trop élevé provoquera le déclenchement d'une protection thermique et sa mise hors circuit, ce qui se traduira par une élévation de la tension du bus courant continu et, passé un certain seuil, entraînera le déclenchement de la sécurité et puis, éventuellement, la coupure de l'alimentation du moteur.

Si la résistance est trop faible, il est possible de connecter 4 résistances de freinage en montage série - parallèle ("circuit H"). Ce faisant, on augmente l'énergie de freinage évacuable.

Le freinage par résistance n'est pas proposé sur les variateurs de petite taille : d'abord parce qu'aux faibles puissances, il n'y a en général pas de gros besoins en freinage et ensuite parce que les surcoûts dus au hacheur et à la résistance ne sont pas négligeables si on le compare au prix du variateur. Lorsqu'on monte en puissance, le hacheur est intégré dans les variateurs (pour les mo-

A chaque variateur son mode de freinage

	Gamme de puissance	Hacheur intégré	Injection de courant continu dans le moteur	Freinage combiné	Réinjection sur le réseau	Maintien cinétique*
Micromaster MM410	0,12 – 0,75 kW		Oui	Oui		
Micromaster MM420	0,12 – 11 kW		Oui	Oui		
Micromaster MM430	7,5 – 250 kW		Oui	Oui		Oui
Micromaster MM440	0,12 à 250 kW	Oui	Oui	Oui		Oui
Sinamics G110	0,12 – 3 kW		Oui			
Sinamics G120	0,37 – 90 kW	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
ET 200S FC	0,75 – 4 kW				Oui	Oui

*Le maintien cinétique est la faculté de maintenir l'électronique interne du variateur en fonctionnement lors d'une brève coupure de l'alimentation du secteur. Ce n'est donc pas une technique de freinage. Nous l'avons mis dans un tableau car il s'agit d'une fonctionnalité rendue possible par la mise en œuvre d'une technique de freinage (basée sur l'utilisation de l'énergie de freinage transmise au variateur par une charge entraînée).

Ce tableau montre les techniques de freinage implémentées sur les variateurs de fréquence basse tension de Siemens.

dèles 75 kW, c'est quasiment systématique) et la résistance de freinage est à l'extérieur. Pour les puissances supérieures, il n'y a pas en général des problèmes d'encombrement et tout (hacheur et résistance) est à l'extérieur.

Le freinage par couplage de variateurs...

Le freinage par résistance est efficace mais il présente l'inconvénient de gaspiller l'énergie de freinage puisque celle-ci est dissipée par effet Joule dans la résistance (on peut toujours essayer de récupérer cette énergie thermique mais ce n'est ni pratique ni économique). Au lieu de gaspiller l'énergie de freinage injectée par le

moteur sur le bus à courant continu du variateur, il est possible de l'utiliser pour d'autres applications, pour par exemple alimenter des onduleurs (qui pilotent des moteurs) ou bien un frein électromécanique. En quelque sorte, l'énergie est distribuée sur le bus à courant continu.

Pour que cette solution soit opérationnelle, il faut que l'on ait affaire à un entraînement qui fonctionne très fréquemment en mode "générateur", comme c'est le cas par exemple des enrouleuses/dérouleuses et des bandes transporteuses. Il est possible de réaliser des montages assez complexes dans lesquels on trouve plusieurs variateurs pilotant des moteurs fonctionnant en mode "génératrice" et

plusieurs onduleurs pilotant des moteurs fonctionnant en mode "moteur". Pour que tout fonctionne efficacement, il faut bien calculer l'installation.

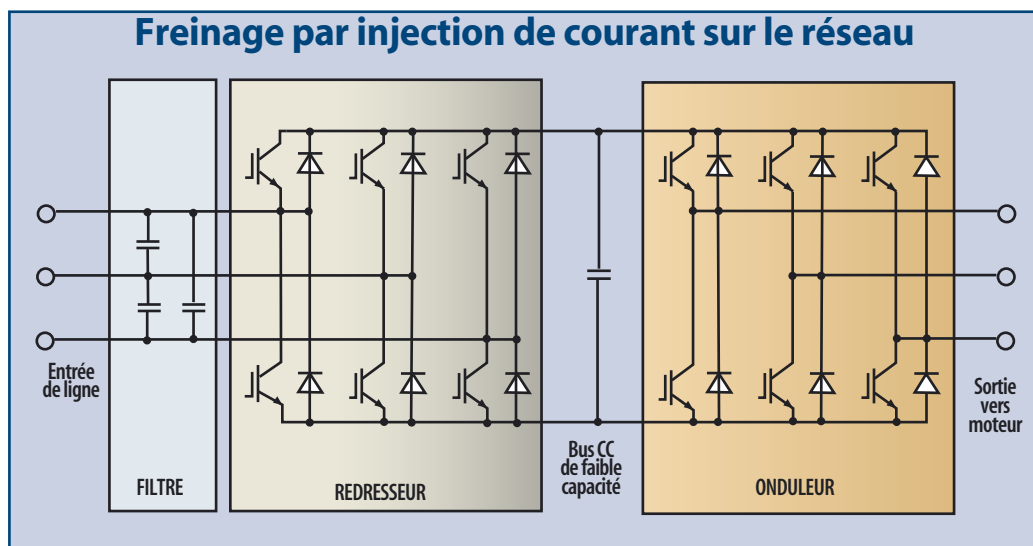
... et par réinjection de courant sur le réseau d'alimentation

Toutes les techniques de freinage électronique ont en commun d'aider le variateur à ralentir une charge et d'utiliser l'énergie électrique renvoyée par le moteur (fonctionnant en mode "génératrice") lors de ce ralentissement. Elles ont également toutes en commun d'éviter que la tension du bus à courant continu du variateur n'atteigne un niveau prohibitif. Il existe une dernière technique pour cela : la réinjection sur le réseau électrique.

Cette technique ne peut pas être mise en œuvre sur les variateurs classiques équipés d'un pont redresseur à diodes. Ces ponts sont en effet unidirectionnels, autrement dit le courant s'écoule du secteur vers l'onduleur du variateur, et uniquement dans ce sens. Sur certains variateurs, on trouve, en plus du pont redresseur, un "pont" avec transistors IGBT, permettant d'obtenir un fonctionnement réversible : si la tension du bus à courant continu dépasse un certain seuil, le courant continu est converti en un courant alternatif qui est réinjecté sur le réseau électrique.

Ce type de freinage suppose un surcoût au niveau du variateur mais offre une grande souplesse d'utilisation.

Sylvain Ouillon et Michel Metzger
Siemens A & D



Le freinage par injection sur le réseau consiste à transformer le courant excédentaire présent sur le bus à courant continu en un courant alternatif. Dans ce cas, on fait appel à des redresseurs réversibles.