



ABB drives

Guide technique No. 4

Guide des entraînements à vitesse variable

Power and productivity
for a better world™



Guide technique No. 4

Guide des entraînements à vitesse variable

Table des matières

Chapitre 1 - Introduction	7
Généralités.....	7
Chapitre 2 - Les procédés et leurs spécificités	8
Pourquoi commander un moteur en vitesse variable?	8
Les secteurs d'activités qui utilisent la variation de vitesse	9
Les variables d'un processus de transformation des matières.....	10
Les machines servent à transformer les matières... ..	11
Produits de forme bien définie	11
Produits de forme indéfinie.....	11
...et à les déplacer	12
Les matières à l'état solide.....	12
Les matières à l'état liquide	12
Les matières gazeuses	12
Chapitre 3 - Le moteur électrique: cheville ouvrière de l'industrie	13
Les moteurs électriques entraînent la plupart des machines	13
Les moteurs convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique .	14
Les convertisseurs de fréquence commandent l'induction électro-magnétique.....	15
Le rendement d'un système d'entraînement	16
Dans certains cas, il faut inverser le sens de rotation ou le sens du couple	17
Le couple de charge, les frottements et l'inertie s'opposent au moteur	18
Le moteur doit vaincre le couple de la charge	19
Le couple de l'entraînement et le couple de la charge sont égaux à vitesse nominale.....	20
Chapitre 4 - A charge variable, vitesse variable	21
Flux variables de matières et grandeurs d'entrée/de sortie.....	21
Les techniques de régulation les plus simples.....	22
La variation électronique de vitesse: technique de commande la plus performante	23
Les entraînements mécaniques, hydrauliques et électriques à vitesse variable.....	24
Couplage hydraulique	24
Variateur c.c.	24
Variateur c.a.	24
Les entraînements électriques à vitesse variable dominant le marché ..	25
Budget de maintenance	25
Productivité	25
Economie d'énergie	25
Des produits de meilleure qualité	26
Les variateurs c.a.: un marché en croissance rapide	26

Chapitre 5 - Variateur c.a.: technologie idéale de variation de vitesse....27

Les fonctions de base d'un variateur c.a.....	27
Courbes de capacité de charge d'un moteur commandé par un variateur c.a.	28
Fonctionnalités d'un variateur c.a. contribuant à une meilleure maîtrise de vos procédés.....	29
Sens de rotation	30
Régulation de couple.....	30
Suppression des vibrations mécaniques	30
Pertes réseau	31
Protection contre le blocage rotor	31
Compensation de glissement	32
Reprise au vol	32
Contraintes d'environnement	32
CEM	33

Chapitre 6 - L'intérêt économique des variateurs c.a.34

Pour bien comprendre la révolution technologique des variateurs c.a..	35
Aucune régulation par action mécanique	36
Les facteurs qui influent sur les coûts.....	37
Coût d'investissement: Composants mécaniques et électriques	38
Le moteur.....	38
Le variateur c.a.....	38
Coût d'installation: Comparatif régulation par étranglement/ variateur c.a.	39
Coût d'exploitation: maintenance et consommation énergétique.....	40
Comparaison du coût global	41

Chapitre 7 - Index42

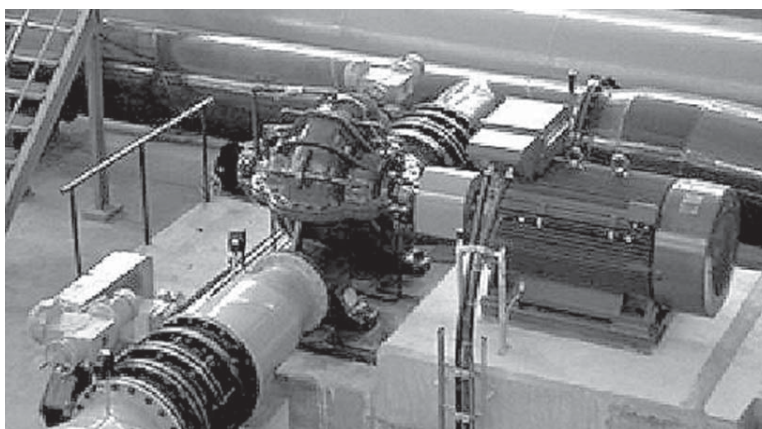
Chapitre 1 - Introduction

Généralités

Ce guide, qui fait partie d'une série de guides techniques réalisés par ABB, est consacré aux entraînements à vitesse variable et à leurs domaines d'application dans le secteur industriel. Il décrit principalement les entraînements électriques à vitesse variable et, plus particulièrement, les entraînements à courant alternatif.

Ce guide tente d'être aussi pratique que possible. Aucune connaissance préalable des entraînements à vitesse variable n'est requise; seules sont indispensables des notions techniques de base pour comprendre les applications et les concepts décrits.

Chapitre 2 - Les procédés et leurs spécificités



Pourquoi commander un moteur en vitesse variable?

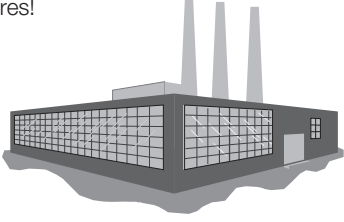
Pour bien comprendre l'intérêt de la variation de vitesse, nous devons, auparavant, comprendre ce qui distingue les différents procédés. Ceux-ci se répartissent en deux grandes catégories: les procédés qui visent la transformation de matières et ceux qui visent le déplacement de matières; ces deux grandes catégories regroupent elles-mêmes de nombreuses sous-catégories.

Toutefois, ces deux catégories principales ont un point commun, à savoir la nécessité de pouvoir intervenir sur le procédé pour mieux le maîtriser. Il s'agit- là du domaine d'application des entraînements à vitesse variable. Ce chapitre décrit les principaux procédés industriels et non industriels qui utilisent les entraînements à vitesse variable.

Quelques exemples parmi d'autres!

Secteurs industriels:

- Industrie chimique
- Pâte, papier, imprimerie
- Agro-alimentaire
- Centrales électriques
- Industrie minière
- Métallurgie
- Ateliers d'usinage
- Plastique
- Textile
- Génie climatique
- Traitement des eaux



Secteurs non-industriels:

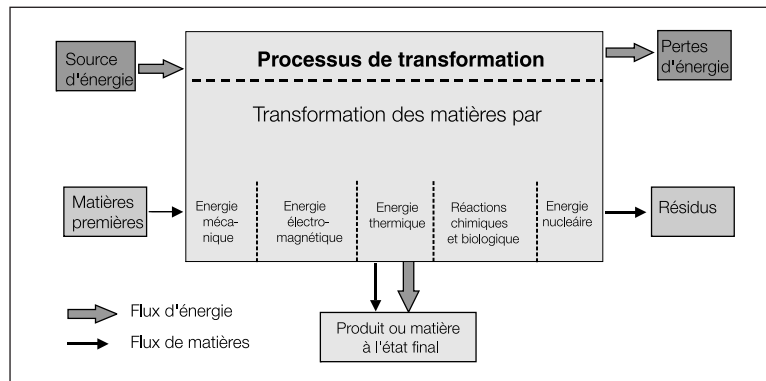
- Génie climatique
- Traitement des eaux

Les secteurs d'activités qui utilisent la variation de vitesse

Les procédés industriels sont nombreux et les exemples cités ne sont que quelques-uns parmi les nombreux secteurs qui font appel à la variation de vitesse. Malgré des contraintes très différentes, tous ces secteurs ont un impératif commun: maîtriser leurs procédés, notamment au moyen des entraînements à vitesse variable.

Par exemple, dans le domaine de la climatisation (une des applications du génie climatique), les contraintes de régulation de débit d'air varient en fonction du taux d'humidité et de la température du local. Ce débit d'air peut ainsi être régulé en agissant sur la vitesse de rotation des ventilateurs d'entrée et de sortie d'air, cette régulation se faisant au moyen d'un entraînement à vitesse variable.

Les ventilateurs sont également utilisés dans les centrales électriques et l'industrie chimique. Dans ces deux cas, le débit d'air des ventilateurs doit être régulé en fonction des contraintes du procédé principal. En production énergétique, le procédé principal est fortement tributaire de la fluctuation de la consommation au cours des différentes périodes de l'année, de la journée ou de la semaine. Il en va de même pour les besoins en variation de vitesse, liés aux spécificités des procédés pilotés.



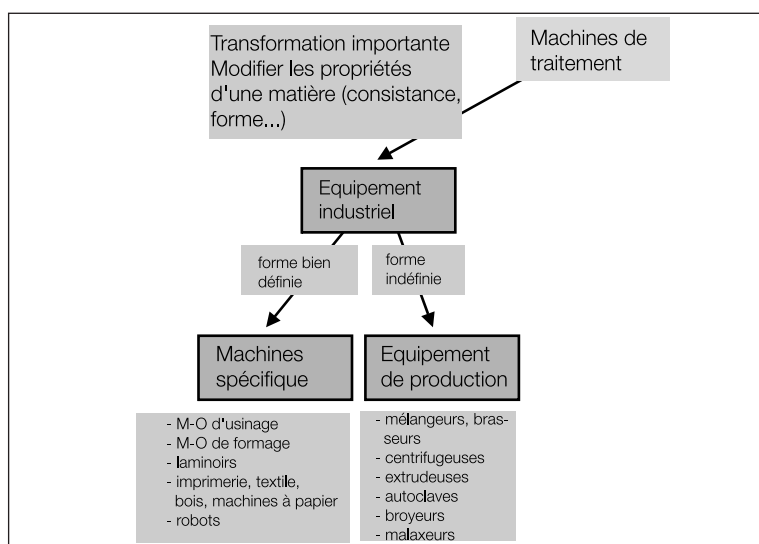
Les variables d'un processus de transformation des matières

Nous avons schématisé ci-dessus les principales variables d'un processus de transformation. Ces variables se répartissent en deux groupes: l'énergie sous différentes formes et les matières. Au cours du processus de transformation, l'énergie ou les matières sont transformées par énergie mécanique, processus électromagnétique, énergie thermique, réactions chimiques et biologiques, ou encore énergie nucléaire.

A chaque étape de ce processus, l'énergie ou les matières subissent une transformation. Le produit ou la matière à l'état final est le résultat de cette transformation. Cependant, à chaque étape du processus, une partie de l'énergie ou des matières n'est pas utilisée et se retrouve sous forme de pertes ou de résidus.

Dans les processus de transformation, les entraînements à vitesse variable servent généralement à réguler l'énergie mécanique des différentes machines intervenant dans le processus.

Mais les entraînements à vitesse variable servent également à d'autres fins. Prenons l'exemple d'une touraille (dans une brasserie, étuve servant à sécher les grains d'orge pour en arrêter la germination), dans laquelle la température de l'air chaud doit être maintenue constante. Ce processus est maîtrisé en régulant la vitesse de rotation des ventilateurs d'air chaud au moyen d'entraînements à vitesse variable.



Les machines servent à transformer les matières...

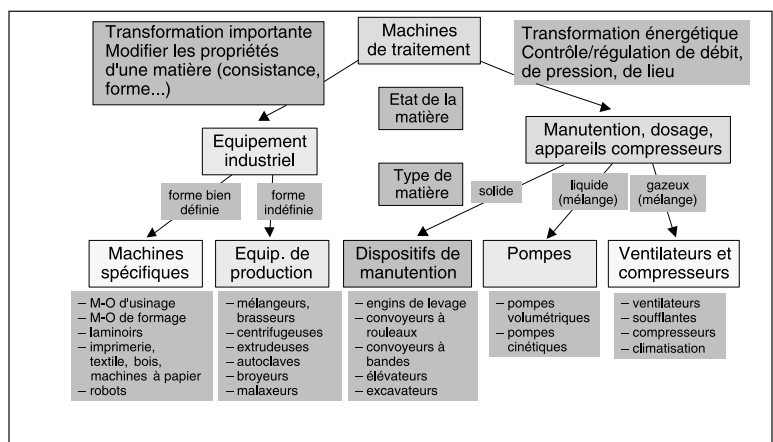
Nous avons vu que les machines de traitement se répartissent en deux catégories. La première catégorie regroupe les équipements industriels servant à transformer les matières et leurs propriétés jusqu'à obtenir la forme désirée.

Produits de forme bien définie

L'équipement industriel peut lui-même être divisé en deux groupes, en fonction de la forme finale de la matière à transformer, cette forme pouvant être définie ou indéfinie. Les produits de forme bien définie, tels que le papier, le métal ou le bois, sont transformés au moyen de machines spécifiques (ex. machines à papier, laminoirs et scieries).

Produits de forme indéfinie

Les matières sans forme définie, telles que les produits alimentaires, les plastiques, etc., sont transformées au moyen d'équipements de production. Citons l'exemple des barattes (margarinerie), ou les différents types de centrifugeuses et d'extrudeuses.



..... et à les déplacer

La deuxième catégorie regroupe les machines servant au déplacement des matières. Ce groupe est constitué des équipements de manutention/levage, de dosage et d'appareils compresseurs. Ces équipements peuvent, eux-mêmes, être répartis en trois sous-groupes en fonction de l'état des matières déplacées: solide, liquide ou gazeux.

Les matières à l'état solide

Les matières à l'état solide, telles que les emballages d'expédition, les métaux, le bois et, bien sûr, les personnes, sont déplacées par des appareils tels qu'engins de levage, convoyeurs et ascenseurs.

Les matières à l'état liquide

Le déplacement des matières à l'état liquide (ex., eau, huile ou produits chimiques liquides) est assuré par des pompes.

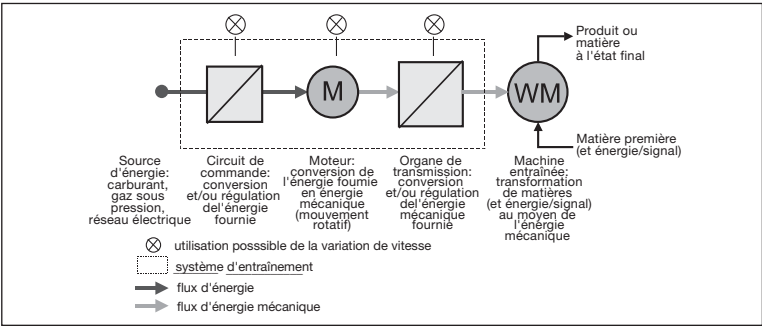
Les matières gazeuses

Le déplacement des matières gazeuses (ex., air) est assuré par des ventilateurs, des compresseurs et des soufflantes. La climatisation est une application mettant en oeuvre ces machines.

Dans le schéma ci-dessus, cinq types différents de machines sont présentés. Elles assurent soit la transformation, soit le déplacement de différents types de matières, et toutes sont susceptibles d'être pilotées par des entraînements à vitesse variable.

Chapitre 3 - Le moteur électrique: cheville ouvrière de l'industrie

Toutes les machines dont nous venons de parler sont, en règle générale, entraînées par des moteurs électriques. On peut ainsi affirmer que le moteur électrique est la cheville ouvrière des procédés industriels. Nous allons donc, dans ce chapitre, nous intéresser de plus près aux moteurs électriques, plus particulièrement les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, certainement le type de moteur le plus répandu dans l'industrie.

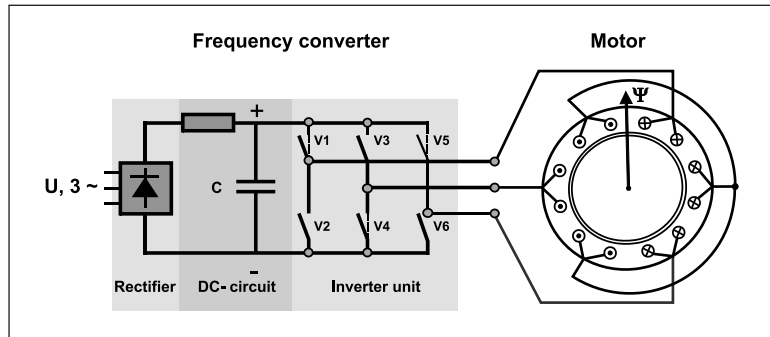


Les moteurs électriques entraînent la plupart des machines

Toute machine est constituée de quatre éléments distincts, à savoir le circuit de commande, le moteur, l'organe de transmission et la machine qui transforme ou déplace la matière. Ensemble, les trois premiers éléments forment ce que l'on appelle le «système d'entraînement» dont la finalité est la conversion d'un type d'énergie donné, en général de l'énergie électrique, en énergie mécanique utilisée par la machine entraînée. Le système d'entraînement est alimenté par la source d'énergie.

La commande à vitesse variable de chacun des trois éléments de base du système d'entraînement est possible. La variation de vitesse peut, par exemple, être réalisée par un convertisseur de fréquence qui assure le rôle de dispositif de commande; elle peut également se faire au niveau de la force motrice par un moteur bivitesse et au niveau des organes de transmission par des réducteurs.

Nous l'avons déjà dit, la plupart des machines sont entraînées par des moteurs électriques. Ceux-ci se répartissent en deux groupes: les moteurs à courant alternatif (c.a.) et les moteurs à courant continu (c.c.). Les moteurs c.a., notamment les moteurs à cage d'écureuil, sont les plus répandus dans les applications industrielles.



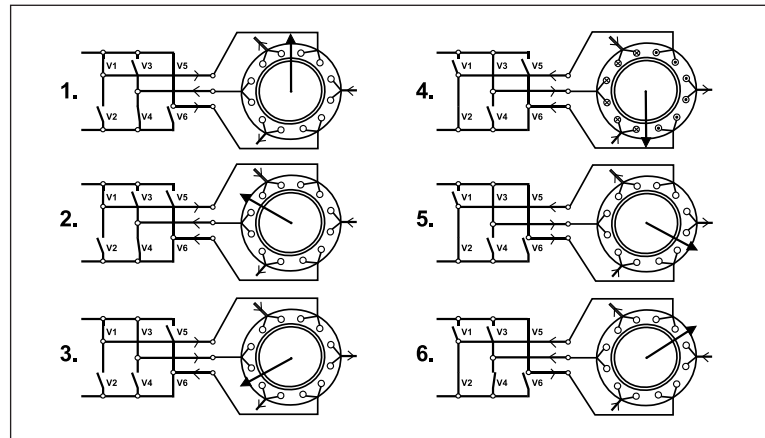
Les moteurs convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique par un moteur c.a. se fait selon le principe de l'induction électromagnétique. La tension dans les enroulements statoriques crée le courant et le flux magnétique. L'orientation de ce flux peut être déterminée en utilisant la règle de la main droite en partant du courant statorique.

En modifiant le sens de la tension dans les enroulements statoriques, on peut également modifier l'orientation du flux. En modifiant le sens de la tension dans les enroulements du moteur triphasé selon une séquence correcte, le flux magnétique du moteur commence à tourner. Le rotor du moteur suivra alors ce flux avec un certain glissement. Il s'agit-là du principe de base de la commande des moteurs c.a.

Cette commande peut être réalisée avec un convertisseur de fréquence. Comme son nom l'indique, un convertisseur de fréquence convertit la fréquence de la tension de courant alternatif. Il est constitué de trois parties. Un courant triphasé régulier en 50 Hz est fourni au redresseur qui le convertit en courant continu. Cette tension c.c. est transmise au bus c.c. qui filtre la tension pulsatoire. Enfin, l'onduleur relie chaque phase moteur au bus c.c. négatif ou positif selon une séquence donnée.

Pour obtenir l'orientation du flux illustrée sur le schéma, les interrupteurs $V1, V4$ et $V5$ doivent être fermés. Pour orienter le flux dans le sens anti-horaire, l'interrupteur $V6$ doit être fermé et l'interrupteur $V5$ ouvert. Si l'interrupteur $V5$ n'est pas ouvert, le circuit court-circuitera. Le flux a tourné de 60° en sens anti-horaire.



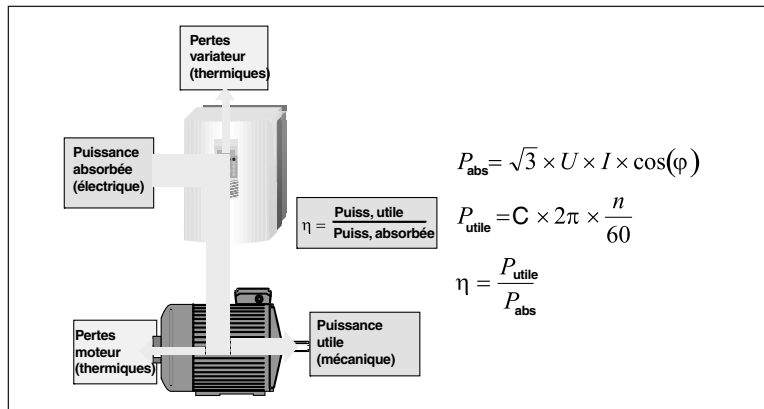
Les convertisseurs de fréquence commandent l'induction électro-magnétique

L'onduleur possède huit positions de commutation différentes. Dans deux de ces positions, la tension est nulle, c'est-à-dire lorsque toutes les phases sont raccordées au même bus c.c., négatif ou positif. Ainsi, dans les six autres positions de commutation, les enroulements du moteur sont alimentés en tension, celle-ci créant un flux magnétique.

Le schéma représente ces six positions de commutation et les différentes orientations du flux, créées, dans chaque cas, par la tension dans les enroulements. La tension crée également un courant dans les enroulements, dont le sens est indiqué par les flèches pour chaque phase.

Dans la pratique, les choses ne sont pas si simples. Le flux magnétique crée des courants dans le rotor, ces courants rotoriques venant compliquer la commande. Des phénomènes perturbateurs d'origine externe, tels que variations de température ou de charge, compliquent encore plus la commande. Cependant, la technologie ainsi que les connaissances actuelles permettent de maîtriser efficacement ces phénomènes perturbateurs.

Les entraînements électriques à vitesse variable offrent, par ailleurs, des avantages non négligeables tels que rationalisation des dépenses énergétiques, les moteurs ne consommant plus que ce qui est strictement nécessaire à l'application. De même, la variation électronique de vitesse (VEV) améliore la précision de la commande car elle supprime les à-coups.



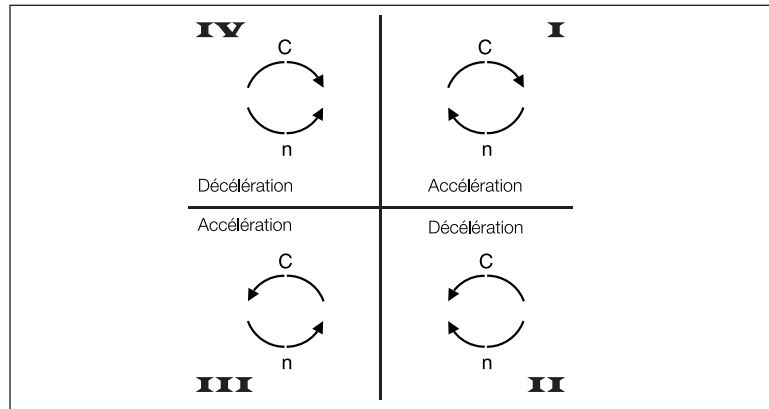
Le rendement d'un système d'entraînement

Le rendement global du système d'entraînement varie en fonction des pertes du moteur et de son dispositif de commande. A la fois les pertes moteur et les pertes variateur sont des pertes thermiques, donc dissipées sous forme de chaleur. L'énergie absorbée par le système d'entraînement est de l'énergie électrique, alors que l'énergie fournie par le moteur est de l'énergie mécanique. C'est la raison pour laquelle le calcul du rendement exige, à la fois, des connaissances en électricité et en mécanique.

La puissance électrique absorbée P_{abs} varie en fonction de la tension (U), du courant (I) et du facteur de puissance ($\cos\phi$). Le facteur de puissance exprime la part de la puissance électrique totale qui est de la puissance active et la part qui est de la puissance réactive. Pour fournir la puissance mécanique requise, il faut de la puissance active. La puissance réactive sert à la magnétisation du moteur.

La puissance utile mécanique P_{utile} varie en fonction du couple (C) et de la vitesse de rotation (n) requis. Plus la vitesse ou le couple requis est élevé, plus la puissance requise est élevée. Ces grandeurs ont ainsi une incidence directe sur la quantité d'énergie prélevée par le système d'entraînement sur le réseau électrique. Comme nous l'avons déjà expliqué, le convertisseur de fréquence régule la tension qu'il fournit au moteur et, de ce fait, agit directement sur l'énergie consommée par le moteur et par l'application commandée.

Les transistors sont des composants de commutation très performants, qui contribuent au rendement très élevé d'un convertisseur de fréquence, entre 0,97 et 0,99. Le rendement des moteurs se situe en général entre 0,82 et 0,97 selon la taille du moteur et sa vitesse nominale. On peut, par conséquent, affirmer que le rendement global d'un système d'entraînement est toujours supérieur à 0,8 lorsqu'il est commandé par un convertisseur de fréquence.



Dans certains cas, il faut inverser le sens de rotation ou le sens du couple

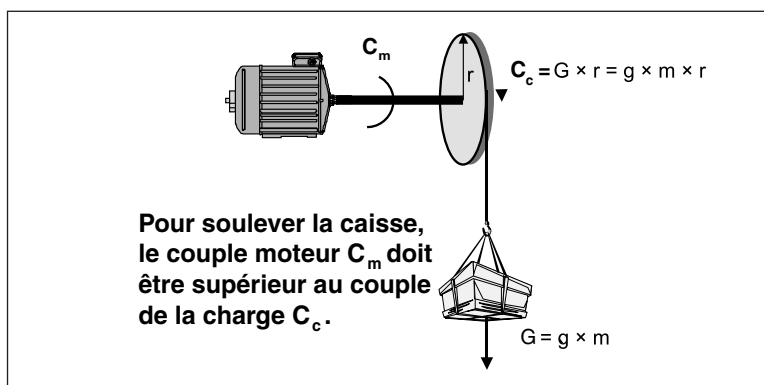
Dans certains cas, il faut inverser le sens de rotation du moteur, voire le sens du couple. Un entraînement fonctionnant dans les quatre quadrants conjugue l'action de ces deux grandeurs, tel qu'illustré à la figure ci-dessus.

Quadrant I : dans le premier quadrant, le moteur tourne dans le sens horaire. Le sens du couple étant également horaire, l'entraînement accélère.

Quadrant II : dans le deuxième quadrant, le moteur tourne également dans le sens horaire, alors que le couple tourne dans le sens inverse. Dans ce cas, l'entraînement décélère.

Quadrants III et IV : dans les troisième et quatrième quadrants, le moteur tourne dans le sens anti-horaire, l'entraînement accélérant ou décélérant en fonction du sens du couple.

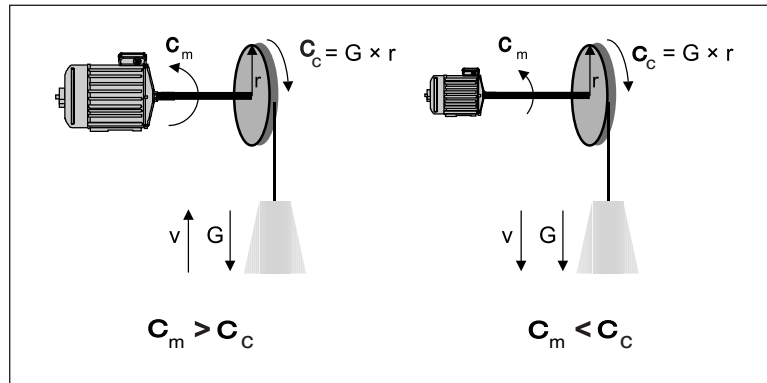
Avec un convertisseur de fréquence, les changements de sens de couple peuvent se faire indépendamment du sens de rotation de l'arbre moteur. Pour qu'un entraînement fonctionne parfaitement dans les quatre quadrants, un dispositif de freinage doit être prévu. Ce mode de contrôle de couple est notamment impératif dans les applications de levage, où le sens de rotation peut changer alors que le sens du couple ne change pas.



Le couple de charge, les frottements et l'inertie s'opposent au moteur

Le moteur doit produire le couple requis pour vaincre le couple de la charge. Cette dernière est le produit des frottements, de l'inertie des pièces en mouvement et de la charge elle-même, qui varie en fonction de l'application. Dans l'exemple illustré, pour soulever la caisse, le couple moteur doit être supérieur au couple de la charge, qui dépend de la masse de la caisse.

Les facteurs de charge varient en fonction de l'application. Par exemple, dans un broyeur, le couple de la charge dépend non seulement des frottements et de l'inertie, mais également de la dureté du matériau à broyer. Dans les ventilateurs et les soufflantes, les variations de pression d'air affectent le couple de la charge, et ainsi de suite.

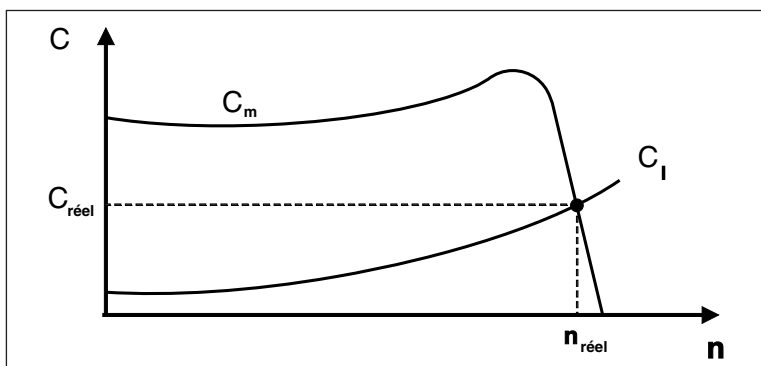


Le moteur doit vaincre le couple de la charge

Dans tous les cas, le couple de la charge doit être connu avant de choisir le moteur pour l'application envisagée. Il en va de même pour la vitesse.

Si le moteur est trop petit, il ne pourra remplir sa fonction avec les risques que cela suppose. Prenons l'exemple des applications de levage où un moteur trop peu puissant sera incapable de soulever la charge requise suffisamment rapidement à la hauteur désirée. Il pourra même laisser retomber la charge complètement, comme illustré sur le schéma, avec les dangers que l'on imagine pour les personnes travaillant sur le site d'utilisation de l'engin de levage. Pour calculer le couple nominal d'un moteur, la formule suivante peut être utilisée:

$$C[Nm] = 9550 \times \frac{P[kW]}{n[1/min]}$$



Le couple de l'entraînement et le couple de la charge sont égaux à vitesse nominale

La courbe couple/vitesse d'un moteur est spécifique à ce moteur et doit être calculée individuellement pour chaque type de moteur. Une courbe couple/vitesse type (C_m) est illustrée ci-dessus. On notera que le couple maxi de la charge est atteint juste sous la vitesse nominale.

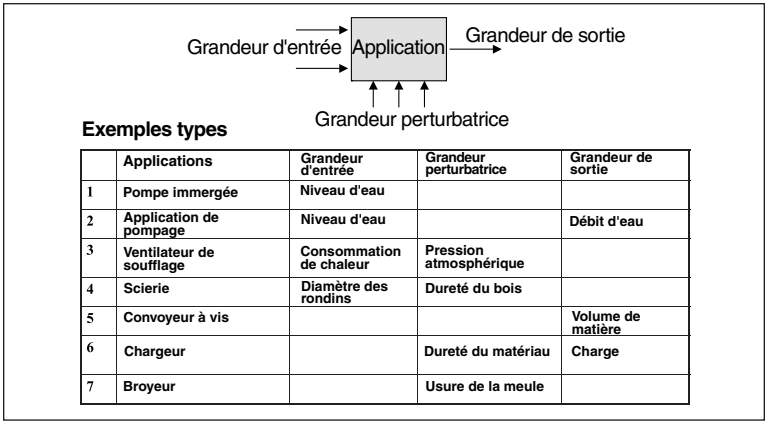
Le couple de la charge C_c augmente généralement avec la vitesse. En fonction de l'application, ce couple peut être linéaire ou quadratique. Le moteur accélérera automatiquement jusqu'à obtenir l'égalité entre le couple de la charge et le couple moteur. C_e point d'égalité correspond sur le graphique au point d'intersection de C_m et C_c . Le couple réel ($C_{réel}$) est sur l'axe des ordonnées et la vitesse réelle ($n_{réel}$) sur l'axe des abscisses.

Tel est le principe de fonctionnement d'un moteur à cage d'écureuil normalisé. Avec un convertisseur de fréquence, on peut optimiser la commande du moteur et du système d'entraînement dans son ensemble. Cette optimisation sera décrite ultérieurement dans ce guide.

Chapitre 4 - A charge variable, vitesse variable

La plupart des applications sont caractérisées par au moins une grandeur variable. Par conséquent, les processus variables et les applications à charges variables imposent l'utilisation d'une technique de commande (régulation de vitesse).

Dans ce chapitre, nous décrivons les applications et leurs variables. Nous verrons également quelles sont les différentes techniques de commande.

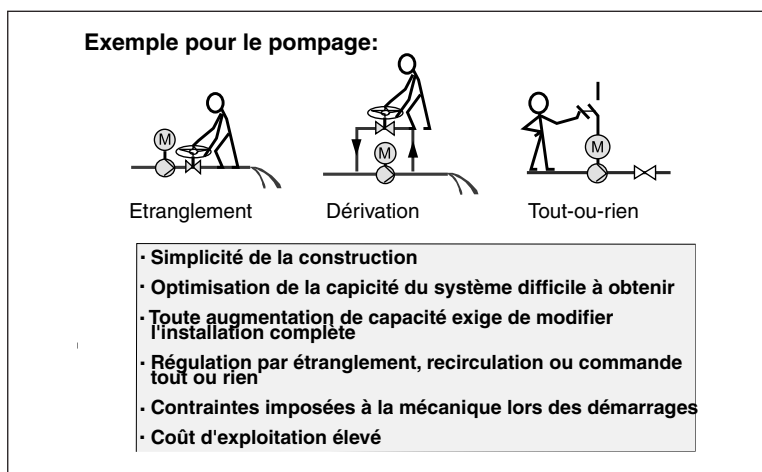


Flux variables de matières et grandeurs d'entrée/de sortie

Une application est caractérisée par de nombreux paramètres et variables, les plus courants étant les grandeurs d'entrée et de sortie, et la grandeur perturbatrice. Les valeurs de ces paramètres doivent soit être maintenues constantes, soit varier en fonction d'un schéma prédéterminé. Comme nous l'avons vu au premier chapitre, toute application est caractérisée par des grandeurs d'entrée et de sortie et, dans la plupart des cas, également par des grandeurs perturbatrices.

Quelques applications ne sont soumises à aucune grandeur perturbatrice et la grandeur d'entrée est constante. Elles n'ont donc aucune raison d'être pilotée en vitesse variable. Cependant, si les grandeurs de sortie doivent varier, si la grandeur d'entrée varie ou si des grandeurs perturbatrices existent, la variation de vitesse peut être envisagée pour optimiser les performances du processus et maîtriser ses contraintes.

Le tableau ci-dessus reprend certaines applications exigeant une régulation à vitesse variable. Il précise également les grandeurs qui imposent le recours à une régulation: grandeur d'entrée, grandeur perturbatrice ou grandeur de sortie.

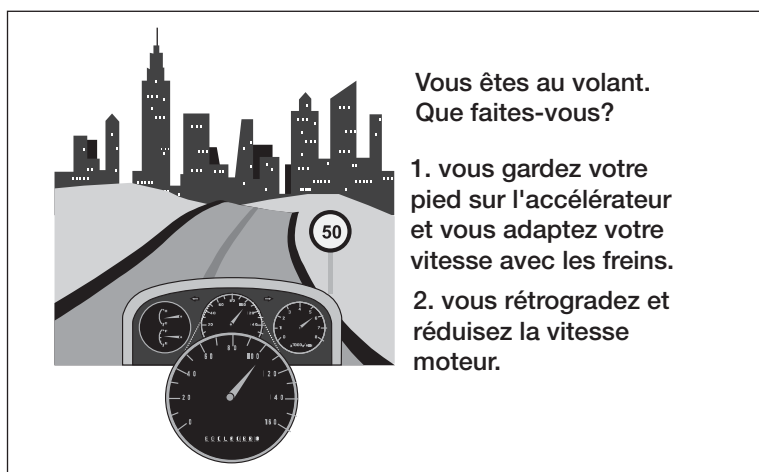


Les techniques de régulation les plus simples

Il existe de nombreuses techniques de régulation simples à mettre en oeuvre (ex., régulation par étranglement ou par dérivation). Ce type d'installation est en général peu complexe et l'investissement semble, à priori, faible.

En y regardant de plus près, on se rend compte que les inconvénients sont nombreux. Par exemple, il est très difficile d'optimiser la capacité de l'installation avec ces techniques simples, alors même que cette optimisation est la clé de la qualité de l'application. En effet, une augmentation de la capacité exige, en général, une modification complète de l'installation et chaque démarrage direct sur le réseau est susceptible d'endommager les constituants mécaniques et/ou électriques.

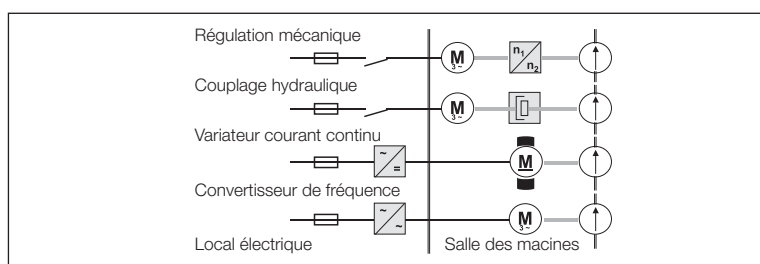
Ces techniques de régulation simples sont également très énergivores, ce qui signifie qu'en plus du coût d'exploitation supérieur à celui de la variation électronique de vitesse (VEV), leurs impacts sur l'environnement (ex. émissions de CO₂ des centrales électriques) sont également supérieurs. Ainsi, le coût global de cycle de vie des investissements en techniques de régulation simples est beaucoup plus élevé que celui de la VEV.



La variation électronique de vitesse: technique de commande la plus performante

La variation électronique de vitesse (VEV) constitue la meilleure technique de régulation de vitesse pour la plupart des systèmes. Pour illustrer notre propos, supposons que vous êtes au volant de votre voiture. Vous êtes sur la nationale et vous approchez d'une agglomération; vous devez réduire votre vitesse pour votre propre sécurité et celle des autres.

La meilleure chose à faire, bien sûr, est de réduire la vitesse de rotation du moteur en relâchant l'accélérateur et, au besoin, en rétrogradant. Une autre solution consiste à ne pas toucher au changement de vitesse, à garder votre pied sur l'accélérateur et à réduire la vitesse en utilisant les freins. Dans ce cas, vous provoquez non seulement l'usure du moteur et des freins, mais vous consommez également beaucoup d'essence et vous maîtrisez mal votre véhicule. Par ailleurs, vous mettez en danger votre vie et celles des autres, ce qui va à l'encontre de l'objectif initial.



Les entraînements mécaniques, hydrauliques et électriques à vitesse variable

Nous illustrons ci-dessus les quatre types d'entraînements à vitesse variable les plus répandus dans le secteur industriel. La variation de vitesse mécanique implique généralement l'utilisation de courroies, la régulation se faisant en déplaçant manuellement des poulies coniques ou au moyen de moteurs de positionnement.

Couplage hydraulique

Dans un couplage hydraulique, c'est le principe de la turbine qui est mis en oeuvre. En faisant varier le volume d'huile dans le couplage, on agit sur l'écart de vitesse entre l'arbre entraînant et l'arbre entraîné. La quantité d'huile est contrôlée et régulée par des pompes et des vannes.

Variateur c.c.

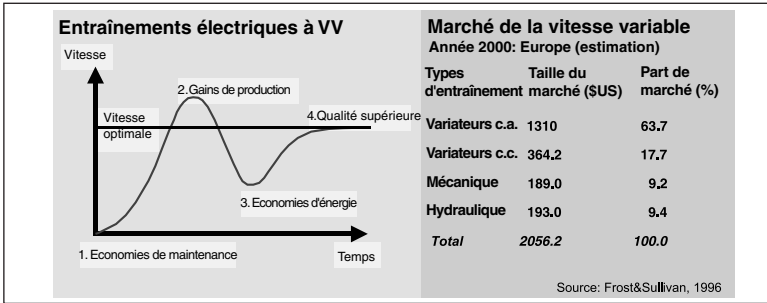
Dans un entraînement c.c., un variateur à courant continu fait varier la tension fournie au moteur c.c. Dans le moteur, un commutateur électromécanique, appelé collecteur, transforme le courant c.c. en courant c.a.

Variateur c.a.

Avec un convertisseur de fréquence ou variateur à courant alternatif, on utilise un moteur à cage d'écureuil standard, sans collecteur. La vitesse de rotation du moteur est régulée par le variateur qui convertit la fréquence de la tension moteur, comme nous l'avons déjà expliqué. Le convertisseur de fréquence est, lui-même, commandé par des signaux électriques.

Dans la figure, nous avons illustré l'emplacement du dispositif de commande de chaque type d'entraînement à vitesse variable. Dans le cas de la régulation mécanique et hydraulique, le dispositif de commande se situe entre le moteur et la machine entraînée, compliquant fortement la maintenance.

Dans le cas des entraînements électriques à vitesse variable, tous les dispositifs de commande sont installés dans un local électrique, seul le moteur étant installé dans la salle des machines. Il s'agit-là d'un des nombreux avantages de la VEV. D'autres avantages sont décrits à la page suivante.



Les entraînements électriques à vitesse variable dominent le marché

Nous présentons ici les avantages majeurs des entraînements électriques à vitesse variable, ainsi que les estimations pour le marché européen en 2000. Ces avantages sont mis en évidence aux points de courbure de la courbe de vitesse.

Budget de maintenance

Le démarrage direct sur le réseau impose des contraintes au moteur de même qu’aux équipements électriques. Avec la VEV, vous démarrez vos moteurs sans à-coups, ce qui a un impact direct sur vos dépenses de maintenance.

Productivité

Un outil industriel est généralement conçu pour permettre à l’entreprise de gagner en productivité. Modifier un équipement tournant à vitesse constante pour augmenter les capacités de production est une opération fastidieuse et coûteuse. Avec un entraînement c.a., augmenter les cadences de 5 à 20% ne pose aucun problème, et l’accroissement de la production est réalisable sans aucun investissement supplémentaire.

Economie d’énergie

Dans de nombreuses applications, les volumes de production varient. Il est, en général, très peu efficace de faire varier les volumes de production avec des moyens mécaniques. Avec la VEV, vous pouvez faire varier le volume de production en faisant varier la vitesse de rotation des moteurs. Cette solution permet d’économiser beaucoup d’énergie dans les applications de pompage et de ventilation notamment, car la puissance à l’arbre évolue proportionnellement au cube du débit.

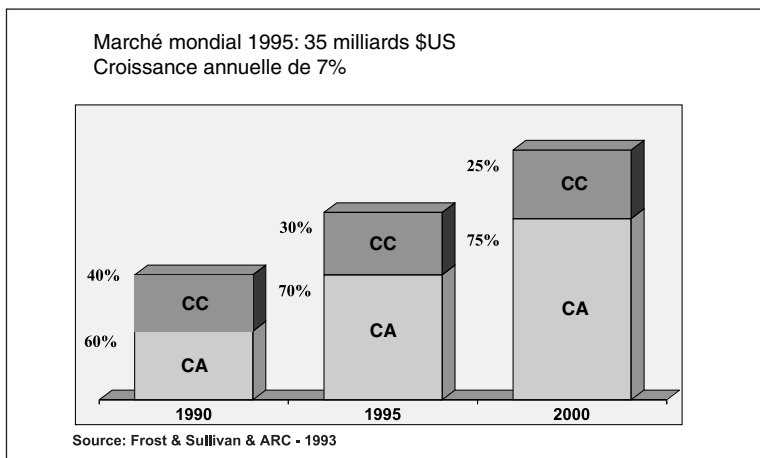
Des produits de meilleure qualité

La précision de régulation exceptionnelle de la VEV contribue à optimiser et à fiabiliser votre process avec, à la clé, des produits de qualité supérieure, pour le plus grand bénéfice du client.

C’est pour tous ces avantages que les entraînements électriques à vitesse variable dominent le marché, comme nous le montre le

tableau ci-dessus. Ensemble, les variateurs c.a. et c.c. couvrent plus de 75% du marché, avec les variateurs c.a. représentant plus de 50% du marché européen de la vitesse variable en 2000.

Les variateurs c.a.: un marché en croissance rapide

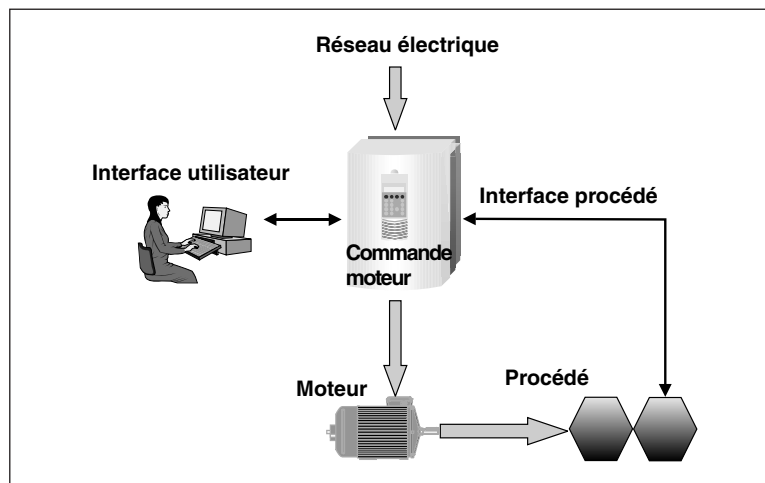


Le graphique illustre les projections à l'an 2000 pour le marché de la VEV. La croissance annuelle du marché des variateurs c.a. atteint pratiquement 10%, ce qui constitue l'essentiel de la croissance du marché des entraînements électriques et de la vitesse variable. La part de marché des variateurs c.c. est en diminution, alors que sa taille reste approximativement constante. Cette évolution est le fait du développement de la technologie des variateurs c.a.

Comme nous l'avons déjà expliqué dans ce guide, la variation de vitesse c.a. présente de nombreux avantages par rapport aux autres techniques de commande de moteur. Le moteur c.c. se distingue du moteur c.a. par la présence d'un collecteur mécanique utilisant des balais de charbon. Ces balais nécessitent une maintenance fréquente et le collecteur lui-même vient compliquer la conception du moteur et augmente sa consommation énergétique. Il s'agit-là de la principale raison de l'accroissement du marché des entraînements c.a. au détriment des entraînements c.c.

Chapitre 5 - Variateur c.a.: technologie idéale de variation de vitesse

En nous basant sur ce que nous avons expliqué jusqu'ici, nous pouvons affirmer que les variateurs à courant alternatif constituent la technologie de variation de vitesse la plus performante. Dans ce chapitre, nous examinerons plus en détails les différentes fonctionnalités du variateur c.a., et analyserons son niveau de performance.

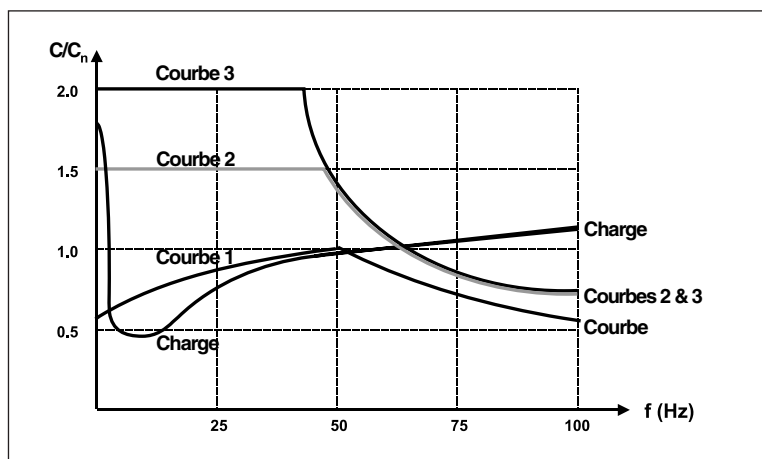


Les fonctions de base d'un variateur c.a.

Ce schéma présente les fonctions de base d'un variateur c.a. La commande d'un moteur par un variateur c.a. associe quatre éléments distincts: l'interface utilisateur, le moteur, le réseau électrique et l'interface procédé.

Le réseau électrique fournit au variateur sa source d'énergie; un des critères de sélection du variateur est la tension d'alimentation et sa fréquence. Le variateur c.a. convertit la fréquence et la tension, et alimente le moteur. Cette conversion est commandée par des signaux issus du procédé ou de l'utilisateur et transmis par les interfaces correspondantes.

L'interface utilisateur permet également de surveiller le fonctionnement du variateur c.a. et de recevoir des données process par l'intermédiaire de l'entraînement. On peut ainsi très facilement intégrer l'entraînement dans les architectures modernes d'automatismes et de contrôle-commande.



Courbes de capacité de charge d'un moteur commandé par un variateur c.a.

Lorsque le moteur n'est pas commandé par un convertisseur de fréquence, ses courbes de capacité de charge ne peuvent être modifiées. Il produit un couple donné à une vitesse donnée, le couple maximum ne pouvant être dépassé.

Avec un convertisseur de fréquence, différentes courbes de charge sont possibles. La courbe standard, courbe 1 du graphique, peut être utilisée en régime continu. Les autres courbes peuvent être utilisées uniquement en régimes transitoires de courte durée, car le système de refroidissement du moteur n'est pas conçu pour ce mode de fonctionnement intensif.

Ces capacités de charge supérieures peuvent s'avérer nécessaires, par exemple, au moment du démarrage. Dans certaines applications, le couple de démarrage peut atteindre deux fois le couple nominal, ce qui est possible avec un convertisseur de fréquence. Le moteur peut alors être dimensionné en fonction de son régime normal, limitant ainsi le coût d'investissement.

Pour pouvoir exploiter ces fonctionnalités, il est impératif de vérifier la compatibilité de la charge entraînée, du variateur c.a. et du moteur. En cas d'incompatibilité, il y aura échauffement anormal du moteur ou du convertisseur de fréquence, avec risque de détérioration.

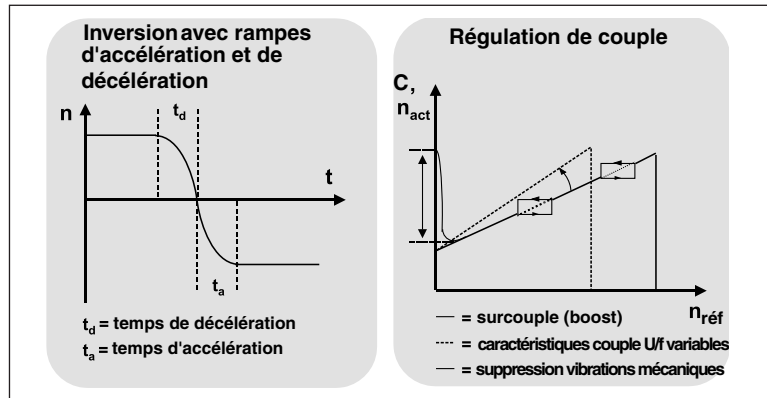
Fonctionnalités importantes:

- entrées et sorties
- inversion du sens de rotation de l'arbre moteur
- temps de rampe d'accélération/de décélération
- caractéristiques couple U/Hz variables
- surcouple (boost)
- suppression des vibrations mécaniques
- limites de charge pour prévenir les déclenchements intempestifs
- gestion des pertes réseau
- protection contre le blocage rotor
- compensation de glissement
- reprise au vol

Fonctionnalités d'un variateur c.a. contribuant à une meilleure maîtrise de vos procédés

Les variateurs c.a. intègrent également des fonctionnalités spécifiques d'optimisation des performances des moteurs commandés et de maîtrise des procédés pilotés. Nous énonçons ci-dessus quelques-unes de ces fonctionnalités. Avec des entrées et des sorties, par exemple, différents types de données process peuvent être fournis au variateur qui pourra ainsi adapter sa commande du moteur. De même, la charge peut être limitée pour prévenir tout déclenchement intempestif et protéger la machine entraînée ainsi que le système d'entraînement.

Dans les sections suivantes, nous présentons plus en détails chacune de ces fonctionnalités.



Sens de rotation

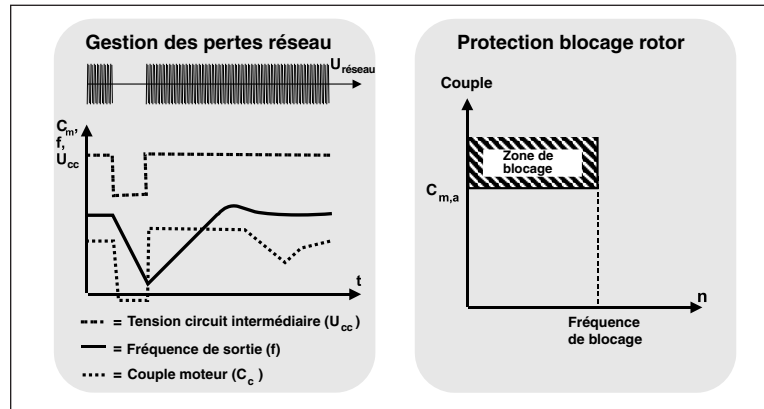
Inverser le sens de rotation d'un moteur est une opération simple à réaliser avec un variateur c.a. Dans le cas des convertisseurs de fréquence ABB, cette inversion peut se faire par simple appui sur une touche. Par ailleurs, vous pouvez définir différents temps de rampe d'accélération et de décélération. La forme de chaque rampe peut également être adaptée en fonction des besoins de l'utilisateur. Le graphique de gauche illustre une rampe en S, mais vous pouvez également définir une rampe linéaire.

Régulation de couple

Le contrôle de couple est relativement simple avec un variateur c.a. Un surcouple (boost) est nécessaire lorsqu'un couple de démarrage très élevé s'impose. Les caractéristiques couple U/f variables signifient que le couple maximum peut être obtenu à une vitesse de rotation inférieure à la normale.

Suppression des vibrations mécaniques

Les vibrations peuvent être supprimées en évitant les vitesses critiques. Dans ce cas, lorsqu'un moteur en accélération est proche de sa vitesse critique, le variateur empêche le moteur de suivre la vitesse de consigne. Une fois le point critique passé, le moteur revient très rapidement à sa courbe normale au-delà de sa vitesse critique.



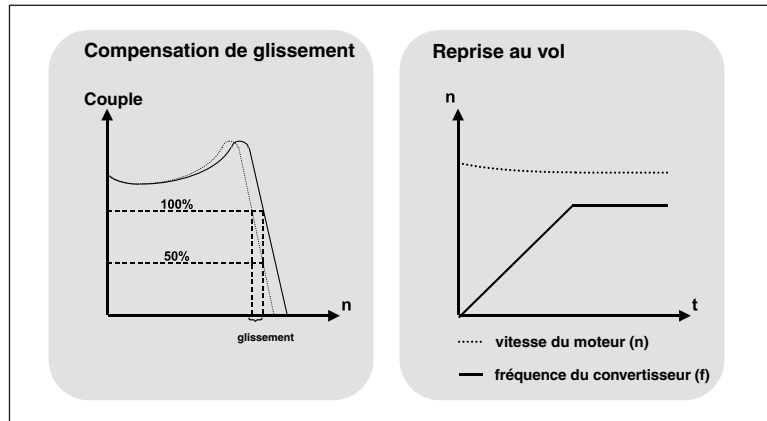
Pertes réseau

La fonction de gestion des pertes réseau agit en cas de coupure de la tension d'alimentation. Dans ce cas, le variateur continue de fonctionner en utilisant l'énergie cinétique du moteur en rotation. L'entraînement reste totalement opérationnel tant que le moteur tourne et qu'il produit de l'énergie pour l'entraînement.

Protection contre le blocage rotor

Avec un variateur c.a., le moteur peut être protégé en cas de blocage de son rotor. En effet, vous pouvez ajuster les limites de supervision et choisir le mode de fonctionnement de l'entraînement en cas de blocage mécanique du rotor. Cette protection est activée lorsque les trois conditions suivantes sont remplies simultanément.

1. La fréquence du variateur est inférieure à la fréquence de blocage définie.
2. Le couple moteur doit franchir la valeur maximale autorisée, calculée par le logiciel du variateur. Cette valeur calculée varie en permanence en fonction de facteurs divers tels que température du moteur. Si les conditions 1 et 2 sont remplies, le moteur se trouve dans la zone de blocage illustrée sur le graphique.
3. Dernière condition: le moteur se trouve dans sa zone de blocage depuis un temps supérieur au temps défini par l'utilisateur.

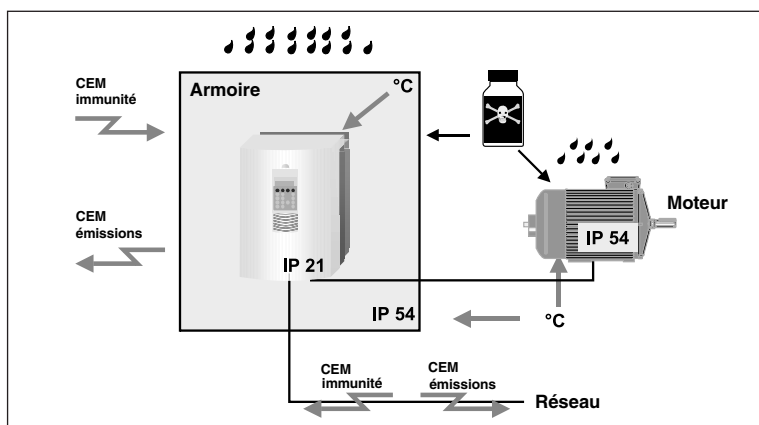


Compensation de glissement

Lorsque le couple de la charge moteur augmente, la vitesse du moteur diminue, tel qu'illustré sur le graphique de gauche. Pour compenser ce glissement, la courbe couple/vitesse peut être modifiée par le convertisseur de fréquence de telle sorte que le supplément de couple peut être obtenu à la même vitesse que précédemment.

Reprise au vol

La fonction de reprise au vol est utilisée si un moteur est couplé à un volant ou à une charge de forte inertie. Lorsqu'on branche l'alimentation sur un moteur et un volant en rotation, le convertisseur de fréquence fournit très exactement la tension et la fréquence requises. Si vous tentez la même opération sur un moteur en rotation avec un variateur c.a. sans fonction de reprise au vol, vous aurez des problèmes.



Contraintes d'environnement

Tout système d'entraînement doit offrir une bonne tenue aux contraintes d'origine externe telles qu'humidité ou perturbations électriques. Le moteur à cage d'écureuil est très compact et sa robustesse permet de l'utiliser dans les environnements les plus difficiles. Le degré de protection IP54 garantit son bon fonctionnement dans un environnement poussiéreux et une étanchéité aux projections d'eau de toutes directions.

Le convertisseur de fréquence offre, en général, un degré de protection IP 21. Cela signifie pas de contact direct avec les pièces sous tension et une protection contre les chutes verticales de gouttes d'eau. Si une protection renforcée s'avère nécessaire, elle peut être obtenue, par exemple, en installant le variateur dans une armoire offrant le degré de protection requis. Dans ce cas, vous devez vous assurer que la température à l'intérieur de l'armoire ne dépassera pas les limites autorisées.

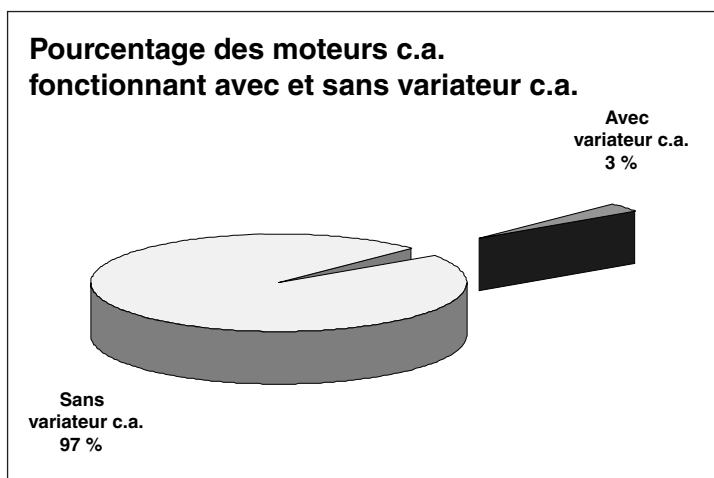
CEM

Une autre caractéristique très importante liée à l'environnement concerne la compatibilité électromagnétique (CEM). Un système d'entraînement doit être conforme aux exigences de la directive européenne CEM. Cela implique l'immunité du système d'entraînement aux perturbations conduites et rayonnées, et la non-émission de perturbations conductrices ou rayonnées sur le réseau électrique ou dans son environnement immédiat.

Si vous désirez des informations complémentaires sur les directives CEM et leurs exigences applicables aux variateurs de vitesse, nous vous invitons à consulter le Guide Technique n° 2 d'ABB consacré à la CEM.

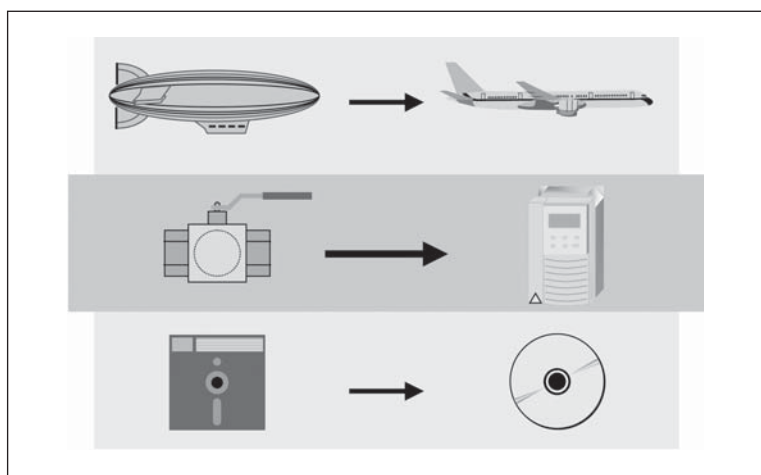
Chapitre 6 - L'intérêt économique des variateurs c.a.

Outre leur intérêt technique, les variateurs c.a. présentent également un intérêt économique, que nous développons dans ce chapitre. Dans cette optique, le coût global d'un entraînement c.a. a été décomposé en coût d'investissement, coût d'installation et coût d'exploitation.



Aujourd'hui, la très grande majorité des moteurs est vendue sans variateurs de vitesse c.a. Le camembert ci-dessus concerne les moteurs de puissance inférieure à 2,2 kW. Ainsi, seuls 3% des moteurs de cette gamme de puissance sont vendus chaque année avec un convertisseur de fréquence; 97% sont vendus sans variateur c.a.

Cette situation est plus que surprenante quand on connaît les avantages de la vitesse variable. Vous en conviendrez encore plus après avoir comparé les différents coûts de la technique de régulation par variateur c.a. et des techniques de régulation traditionnelles. Mais comparons d'abord la technique des variateurs c.a. aux autres techniques de régulation de vitesse.

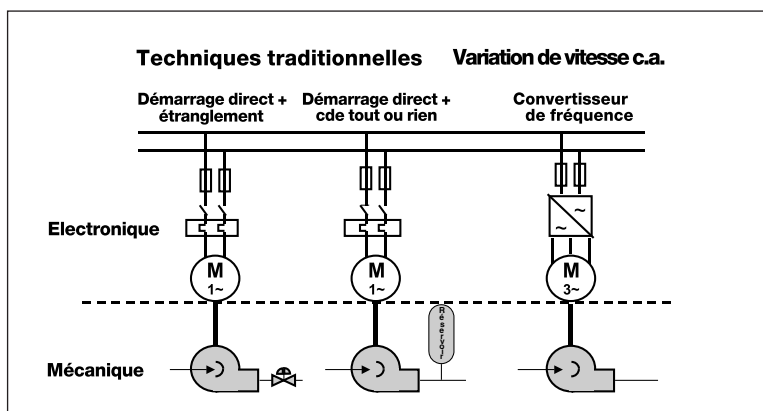


Pour bien comprendre la révolution technologique des variateurs c.a.

La technologie des variateurs c.a. se démarque totalement des autres techniques plus simples de régulation. A titre de comparaison, ces deux technologies sont aussi différentes l'une de l'autre que l'est un dirigeable d'un avion moderne.

On pourrait également comparer la technologie des variateurs c.a. à l'évolution récente en informatique entre la disquette et le CD-Rom. Même s'il s'agit d'un support de stockage d'informations plus simple, une disquette ne peut contenir qu'une infime partie de ce que peut contenir un CD-Rom.

L'intérêt de ces deux innovations est en général connu et reconnu. Il en va de même pour les variateurs c.a. qui mettent en oeuvre une technologie qui se distingue complètement des techniques de régulation traditionnelles. Dans ce guide, nous avons démontré l'intérêt technique des variateurs c.a. par rapport aux méthodes de régulation plus simples.



Aucune régulation par action mécanique

Pour une comparaison précise des éléments de coût, nous devons au préalable étudier la configuration de différentes techniques de régulation. Pour ce faire, prenons l'exemple d'une installation de pompage. Les techniques traditionnelles exigent toujours une partie mécanique et une partie électrique.

La technique de l'étranglement impose l'utilisation de fusibles, de contacteurs et de réactances dans la partie électronique et de vannes dans la partie mécanique. Avec la commande tout ou rien, vous aurez les mêmes composants électriques auxquels il faut ajouter un réservoir d'eau sous pression dans la partie mécanique. La régulation par variateur c.a. constitue, à ce titre, une toute nouvelle solution, car elle fait l'économie de composants mécaniques, toutes les fonctions de régulation étant assurées par les composants électriques.

Autre intérêt, en terme de coût: le variateur c.a. est associé à un moteur triphasé standard, beaucoup moins cher que les moteurs monophasés utilisés dans les autres cas. On peut continuer d'utiliser un réseau monophasé en 220 V, dans le cas des puissances inférieures à 2,2 kW.

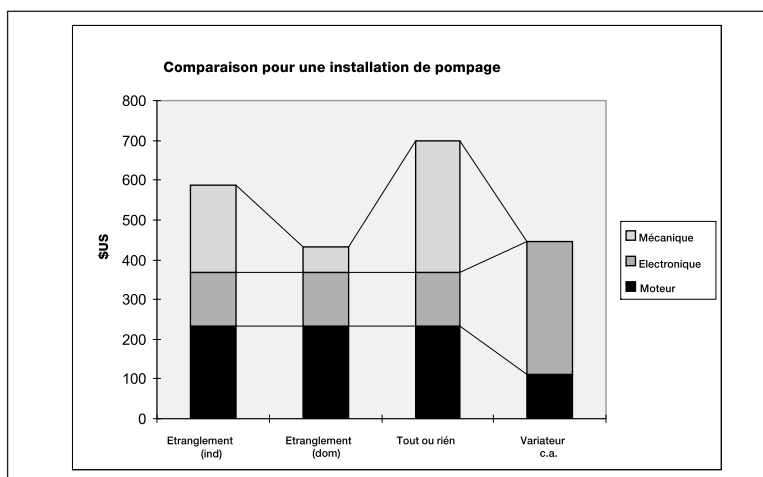
Techniques traditionnelles:	Variateur c.a.:
organes électriques ET mécaniques	tout en un
nombreux composants électriques	un dispositif électrique unique
maintenance fréquente des organes mécaniques	aucune pièce mécanique, pas d'usure, ni remplacement
la régulation par action mécanique est très énergivore	économies d'énergie

Les facteurs qui influent sur les coûts

Le tableau compare les spécificités des techniques de régulation traditionnelles à celles des variateurs c.a., ainsi que leurs impacts en terme de coût. Les techniques traditionnelles imposent la multiplicité des composants électriques et mécaniques qu'il faut se procurer séparément, solution plus coûteuse que si l'ensemble des composants pouvait être acheté en une seule fois.

De plus, les pièces mécaniques s'usent rapidement, avec un impact direct sur les coûts de maintenance, ce dernier poste pouvant, à long terme, générer des coûts très importants. Les techniques traditionnelles exigent également de nombreux composants électriques. Le coût d'installation fait plus que doubler lorsque plusieurs types différents de composants sont mis en oeuvre au lieu d'un seul.

Et «last but not least», la régulation par action mécanique est très énergivore, alors que les variateurs c.a., au contraire, peuvent être source d'économie d'énergie. Au-delà de l'intérêt économique, les variateurs c.a. contribuent également à la protection de l'environnement en réduisant les émissions polluantes des centrales de production d'énergie.



Coût d'investissement: Composants mécaniques et électriques

Ce graphique illustre la répartition du coût d'investissement ainsi que l'investissement total pour chaque technique de commande de pompes. Le coût d'achat de la pompe n'a pas été pris en compte car il est le même quelle que soit la technique mise en oeuvre (VEV ou vannes). Le coût de la régulation par étranglement varie selon qu'il s'agit d'une application de pompage industrielle ou domestique. En effet, en environnement industriel, les contraintes pour les vannes sont plus sévères, ce qui engendre un surcoût.

Le moteur

Comme vous pouvez le voir, les techniques de régulation traditionnelles imposent l'utilisation d'un moteur beaucoup plus cher que la VEV. En effet, celle-ci utilise un moteur triphasé alors que les techniques traditionnelles font appel à des moteurs monophasés.

Le variateur c.a.

Le variateur c.a. s'affranchit de tout organe mécanique, ce qui réduit le coût de manière significative. Les composants mécaniques eux-mêmes sont quasiment toujours moins chers à l'achat qu'un convertisseur de fréquence, mais il faut alors ajouter le coût des composants électriques.

Après avoir pris en compte tous ces éléments de coût, un variateur c.a. constitue pratiquement toujours l'investissement le plus rentable, comparé aux autres techniques de commande. Seule la technique de l'étranglement en application domestique peut être aussi peu chère que la VEV. Cependant, il ne faut pas oublier qu'il s'agit-là uniquement du coût d'investissement, auquel il faut ajouter les coûts d'installation et d'exploitation.

	Etranglement	Variateur c.a.
Matériel d'installation	20 \$US	10 \$US
Travaux d'installation	5h x 65 \$US = 325 \$US	1h x 65 \$US = 65 \$US
Travaux de mise en service	1h x 65 \$US = 65 \$US	1h x 65 \$US = 65 \$US
Total	410 \$US	140 \$US
Economies sur l'installation: 270 \$US !		

Coût d'installation: Comparatif régulation par étranglement / variateur c.a.

Pour les coûts d'installation et d'exploitation, nous comparerons ceux des variateurs c.a. à ceux de la régulation par étranglement, car ces deux techniques sont les plus proches en terme de coût d'investissement. Comme nous l'avons déjà précisé, la régulation par étranglement met en oeuvre des composants mécaniques et électriques, ce qui exige un matériel d'installation deux fois plus important.

De même, les travaux d'installation représentent au moins le double pour la régulation par étranglement par rapport au variateur c.a. Mais monter une vanne mécanique sur une tuyauterie n'est pas simple et peut rallonger le temps d'installation. Celui-ci atteint généralement cinq heures à comparer à une heure pour le variateur c.a. Vous multipliez ce temps par le taux horaire facturé par un installateur professionnel pour obtenir le coût total d'installation.

Le temps de mise en service d'un système de régulation par étranglement n'est, en général, pas plus long que le temps de mise en service d'un système de régulation par variateur c.a. Une heure suffit en moyenne dans les deux cas. Nous pouvons maintenant calculer le coût total d'installation et conclure qu'avec les variateurs c.a., nous économisons 270 \$US par installation. Ainsi, même si le coût d'investissement pour un système de régulation par étranglement était inférieur au prix d'achat d'un moteur monophasé (environ 200 \$US), le variateur c.a. est plus intéressant avant même qu'il n'ait commencé à fonctionner.

	Etranglement	Variateur c.a.: 50% d'économie
Puissance absorbée	0,75 kW	0,37 kW
Consommation annuelle pour 4000 heures/an	3000 kWh	1500 kWh
Coût énergétique annuel 0,1 \$US/kWh	300 \$US	150 \$US
Maintenance/an	40 \$US	5 \$US
Coût total/an	340 \$US	155 \$US
Economies sur une année: 185 \$US !		

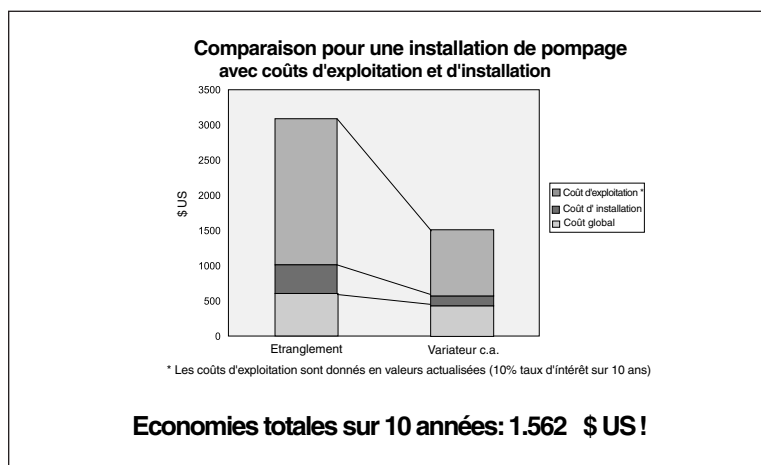
Coût d'exploitation: maintenance et consommation énergétique

De nombreuses études et expériences ont prouvé que les variateurs c.a. peuvent induire jusqu'à 50% d'économies d'énergie. Cela signifie que si la puissance absorbée par un système par étranglement est de 0,75 kW, celle d'un système à variateur c.a. est de 0,37 kW. Lorsqu'une pompe fonctionne 4.000 heures par an, la consommation annuelle du système par étranglement est de 3.000 kWh alors que celle du système à variateur c.a. est de 1.500 kWh.

Pour calculer les économies, nous multiplierons les kW consommés par le coût du kWh, qui varie d'un pays à l'autre. Pour les besoins de notre exemple, nous avons pris un coût de 0,1 \$US/kWh.

Comme nous l'avons déjà précisé, les pièces mécaniques s'usent vite et exigent, par conséquent, une maintenance fréquente. Pour nos calculs, nous avons retenu un coût de maintenance de 40 \$US/an pour un système par étranglement, et de 5 \$US pour un système à variateur c.a., même si dans de nombreux cas, un convertisseur de fréquence n'exige aucune maintenance.

Par conséquent, les économies totales en coût d'exploitation atteignent 185 \$US, ce qui correspond approximativement à la moitié du coût d'achat d'un convertisseur de fréquence pour cette gamme de puissance. Cela signifie que le retour sur investissement du convertisseur de fréquence est de deux ans. Ainsi, ne serait-il pas préférable d'envisager le remplacement d'une installation complète, avec une vieille vanne qui exige un entretien annuel, par un entraînement c.a. à vitesse variable, ce remplacement étant rentabilisé en deux ans.



Comparaison du coût global

Le graphique ci-dessus récapitule tous les éléments de coût. Le délai normal pour le calcul du coût d'exploitation pour ce type d'investissement est de 10 années. Dans ce cas précis, le coût d'exploitation est actualisé avec un taux d'intérêt de 10%.

A long terme, la technique de régulation traditionnelle coûtera au moins deux fois plus que la régulation par convertisseur de fréquence. La plupart des économies obtenues par la VEV provient du coût d'exploitation, et plus particulièrement des économies d'énergie. C'est lors de la phase d'installation que les économies individuelles sont les plus élevées, ces économies étant réalisées dès que le variateur est installé.

Sur la base de ces chiffres comparatifs, nous comprenons difficilement pourquoi seulement 3% des moteurs sont vendus avec un convertisseur de fréquence. Dans ce guide, nous avons essayé de décrire l'apport de la variation de vitesse par conversion de fréquence et d'expliquer pourquoi chez ABB nous pensons qu'il s'agit de la solution idéale de pilotage de votre procédé.

Chapitre 7 - Index

A

ABB 7, 30, 32, 41, 46
à-coups 15
alimentation électrique 16, 27, 33
ascenseurs 12

B

barattes 11
blocage moteur 31
broyeur 18
bus c.c. 14, 15

C

CD-ROM 35
CEM 33
centrales électriques 9, 22, 37
centrifugeuses 11
charge moteur 32
climatisation 9, 12
coefficient de rendement 16
collecteur 24, 26
compatibilité électromagnétique 33
compresseurs 12
conduite de procédé
25, 26, 27, 29
contacteurs 36
convertisseur c.c. 24
convertisseur de fréquence 12, 14,
16, 17, 20, 24, 28, 32, 33, 34, 38,
40, 41
convoyeurs 12
couplage hydraulique 24
couple 16, 17, 18, 19, 20, 28, 29,
30, 31, 32
courant 14, 15, 16, 24
courbe de capacité de charge 28

D

déclenchement intempestif 29
démarrage direct 25
démarrage par reprise au vol
29, 32
déplacement de matières 8
dimensionnement moteur 16
directives CEM 33
disquette 35
dosage 12

E

emballages d'expédition 12
énergie 10, 13, 14, 15, 22, 25, 26,
31, 37, 40, 41
énergie nucléaire 10
énergie thermique 10
engin de levage 12, 17, 19
enroulements moteur 14, 15
entraînements à courroies 24

entraînements à vitesse va-
riable 7, 12, 41
entraînement quatre quadrants 17
équipements de manutention 12
étranglement 22, 36, 38, 39, 40
extrudeuses 11

F

facteur de puissance 16
flux 14, 15
flux magnétique 14, 15
fonction de blocage moteur 29, 30
freinage 17, 23
fréquence de blocage 31
fréquence du variateur 31
frottement 18
fusibles 36

G

génie climatique 9
gestion des pertes réseau 29, 31
glissement 14, 29, 32

H

humidité 9

I

induction électromagnétique 14,15
industrie chimique 9
inertie 18, 32
inversion du sens de rotation 29
IP 21 33
IP 54 33

L

laminoirs 11
local électrique 24
logiciel du variateur 31

M

machine 10, 11, 12, 13, 24, 29
machines à papier 11
maintenance 24, 25, 26, 37, 40
marché des variateurs c.a. 5, 26
mise en service 39
moteur à cage d'écureuil 13, 20,
24, 33
moteur c.a. 13, 14
moteur c.c. 13, 24, 26

O

onduleur 14, 15, 24

P

pertes moteur 16
perturbations 15, 21
perturbations électriques 33
phase moteur 14

pompe 12, 24, 25, 36, 38, 40
procédés industriels 7, 8, 9, 13
processus de transformation 10
processus électromagnétique 10
puissance absorbée 16
puissance active 16
puissance mécanique 10, 16
puissance réactive 16
puissance utile 16

R

rampe en S 30
rampe linéaire 30
réactances 36
redresseur 14
réducteurs 13
règle de la main droite 14
régulation par dérivation 22
rendement moteur 16
réseau électrique 13

S

scierie 11
site d'exploitation 19
soufflantes 12, 18
stator 14
système d'entraînement
13, 16, 20, 29, 33

T

température 9, 10, 15, 31, 33
tension 14, 15, 16, 24, 27, 31, 32
touraille 10
transformation de matières 8, 10, 11
transistors 16

V

vannes 24, 36, 38, 39, 40
variateur c.a. 7, 24, 25, 26, 27, 28,
29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
38, 39, 40, 41
variateur c.c. 24, 25, 26
ventilateurs 9, 10, 12, 18
VEV 7, 8, 9, 10, 15, 22, 23, 24, 25
vibrations mécaniques 6, 29, 30
vitesse critique 30
vitesse de référence 30
vitesse nominale 16
vitesse variable 13, 21, 24, 38
volant 32

Z

zeppelin 35

Contactez-nous

Pour information plus détaillée, veuillez contacter
votre représentant ABB local, ou visiter:

www.abb.com/drives

www.abb.com/drivespartners

© Copyright 2012 ABB. Toutes les dispositions,
indications et caractéristiques sont susceptibles de
modification sansr  avis.

3BFE64293486 REV C FR 23.2.2012 #16114

Power and productivity
for a better world™

