



Variateurs de vitesse

Erik Mertens, Laborelec

Décembre 2006

1	Introduction.....	3
2	Aspects techniques.....	3
2.1	Les différents types de moteurs	3
2.1.1	Moteurs à courant continu (MCC).....	3
2.1.2	Moteurs à courant alternatif	4
2.2	Rendement du moteur	5
2.3	Facteur de déplacement.....	6
3	Techniques d'économie d'énergie.....	6
3.1	Choisir l'installation adaptée	6
3.2	Variateurs de vitesse.....	8
3.2.1	Rotor bobiné à résistance variable ou changement du nombre de paires de pôles ..	11
3.2.2	Transmission par courroie trapézoïdale	11
3.2.3	Moteur à courant continu	11
3.2.4	Couplage par glissement (limiteur de couple par friction).....	12
3.2.5	Variateur de vitesse électronique	12
4	Aspects techniques des variateurs de vitesse électroniques	13
4.1	Taux de distorsion harmonique du variateur	13
4.2	Pics de tension	13
4.3	Ratio U/f	13
4.4	Choix du courant de vitesse électronique	14
4.4.1	Les cyclo-convertisseurs.....	15
4.4.2	Les convertisseurs à ondes carrées.....	15
4.4.3	Modulation de largeur d'impulsions (MLI).....	15
4.5	Paramètres systèmes	16
5	Conclusions.....	16
6	Références et bibliographies	16



European Copper Institute

L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux



Centre d'Information du Cuivre
Laiton et Alliages

COPPER BENELUX
a member of the European Copper Institute

Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Introduction

Ce document constitue une introduction aux principes de base du fonctionnement des moteurs électriques et des différentes techniques de variation de vitesse pour ce type de moteurs.

Les équipements liés à la variation de vitesse sur un site industriel type sont responsables de plus des 2/3 de la consommation énergétique totale. De ce fait, il est évident que toutes les mesures mises en place visant à réduire la consommation énergétique de ces équipements permettront de réaliser des économies conséquentes.

2 Aspects techniques

2.1 Les différents types de moteurs

Les critères de choix d'un moteur électrique pour une application particulière sont : la ou les vitesses de fonctionnement, la puissance nécessaire et le type d'alimentation réseau disponible, tandis que sa technologie dépendra de l'environnement d'installation et des moyens de refroidissement disponibles.

On distingue deux grandes classes de moteurs électriques : les moteurs à courant continu (MCC) et les moteurs à courant alternatif (AC).

2.1.1 MOTEURS A COURANT CONTINU (MCC)

Le moteur à courant continu est constitué d'un enroulement dit statorique qui, une fois alimenté, génère un champ magnétique statorique fixe, et d'un enroulement rotorique alimenté via un système de collecteur et de balais permettant de commuter le champ magnétique rotorique à chaque $\frac{1}{2}$ tour effectué par le rotor. C'est l'interaction entre ces deux champs magnétiques qui génère le couple en bout d'arbre.

Les avantages des moteurs à courant continu sont :

- un couple de démarrage élevé sans surintensité ;
- une vitesse de rotation et couple faciles à réguler ;
- un surcouple transitoire important admissible pendant des temps très courts
- un excellent comportement dynamique ;
- une facilité de récupération d'énergie (fonctionnement dans les 4 quadrants).

Les désavantages des moteurs à courant continu sont :

- une alimentation statorique et rotorique par courant continu (pont redresseur) ;
- un mauvais facteur de puissance à basse vitesse ;

- nécessite beaucoup de maintenance, notamment pour le remplacement des balais et du collecteur ;
- ne peut pas être utilisé dans des environnements explosifs (le frottement des balais sur le collecteur engendre des étincelles).

2.1.2 MOTEURS A COURANT ALTERNATIF

Il existe deux types de moteurs à courant alternatif : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

2.1.2.1 moteurs asynchrones

Les **moteurs asynchrones**, ou encore appelés moteurs à induction, sont des moteurs pour lesquels la vitesse de rotation du rotor n'est pas égale à la vitesse de rotation du champ magnétique statorique. Les enroulements statoriques sont alimentés par une tension alternative triphasée. Ils génèrent un champ magnétique tournant à vitesse constante autour de l'axe du stator. Les enroulements rotoriques, à l'opposé, ne sont pas connectés à une alimentation en tension.

Les courants électriques sont induits dans le rotor car, durant la rotation, le rotor est toujours en arrière du champ magnétique tournant (et de fait le coupe). Ce courant crée alors un champ magnétique égal et opposé qui fait tourner le rotor. Tout se passe comme s'il y avait un glissement entre le champ magnétique tournant.

2.1.2.2 moteurs synchrones

Dans le cas des moteurs synchrones, la vitesse du rotor est égale à la vitesse du champ magnétique statorique tournant. Comme pour le moteur asynchrone, le champ magnétique tournant est créé par trois bobines positionnées à 120° les unes des autres et alimentées par un système de tension triphasé. Mais contrairement aux moteurs asynchrones, le rotor du moteur synchrone est constitué d'un aimant permanent ou d'un électroaimant alimenté par un courant permanent via un système de balais et de collecteur.

Les **moteurs synchrones** ne peuvent pas démarrer seuls. Le démarrage est assuré par la mise en court circuit des enroulements rotoriques afin de démarrer en asynchrone, ou par entraînement grâce à un moteur auxiliaire. Dans ce cas, le moteur synchrone est connecté au réseau comme un alternateur, et se synchronise avec le réseau (« pony motor »).

Pour les moteurs synchrones, le couple en bout d'arbre est proportionnel à la tension réseau. Pour les moteurs asynchrones le couple est proportionnel au carré de la tension réseau. Le comportement des moteurs synchrones est donc moins sensible (plus stable) aux fluctuations du réseau que celui des moteurs asynchrones.

Les inconvénients des moteurs à induction sont :

- régulation de vitesse difficile ;
- faible couple au démarrage ;

- diminution du rendement à faible charge ;
- fort courant d'appel au démarrage ;
- diminution du facteur de puissance à faible charge ;
- possibilités de blocage du moteur en cas de fortes chutes de tension.

2.2 Rendement du moteur

Il existe plusieurs standards sur la base desquels on peut calculer le rendement d'un moteur électrique. La norme IEEE 112-B préconise de prendre en compte toutes les pertes dans le moteur. Soit :

- les pertes joules dans le rotor et dans le stator ;
- les pertes fer ;
- les pertes dues aux divers frottements et à la ventilation ;
- toutes les autres pertes.

Les pertes fer et les pertes joules dans le stator et le rotor décroissent avec la puissance du moteur. Les pertes de frottement et de ventilation augmentent avec la vitesse de rotation (exprimée en tours/minutes).

Les autres pertes varient fortement avec le type de moteur utilisé et sont de l'ordre de 0,4% à 3% de la puissance nominale du moteur.

La figure ci-dessous représente les courbes de rendement de plusieurs moteurs de différentes marques en fonction du taux de charge. 'P' est la puissance, 'nom' pour nominale.

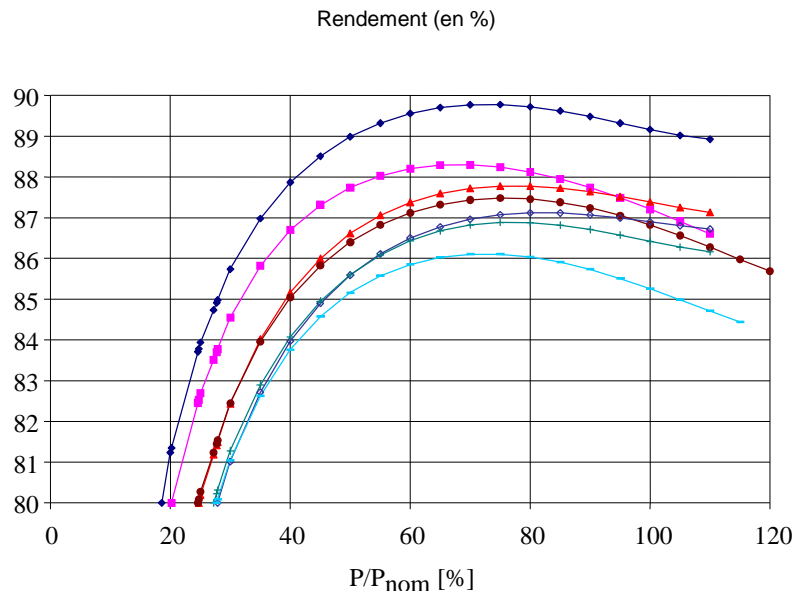


Figure 1 : Courbes de rendement de moteur de 11kW

En conclusion de la figure 1, il apparaît que le rendement est amélioré dans les conditions suivantes :

- diminution des pertes joules dans le rotor et le stator par augmentation des sections de cuivre ;
- diminution des pertes fer par augmentation de la qualité du noyau magnétique ;
- diminution des pertes mécaniques par amélioration du système de ventilation (pales, roulements à billes).

Le rendement dépend aussi d'autres facteurs tels que :

- la puissance : plus la puissance est élevée et meilleur est le rendement ;
- le nombre de paires de pôles : plus ce nombre est élevé et plus faible est le rendement ;
- le taux de charge : plus le taux de charge est élevé et meilleur est le rendement.

Dans un souci de transparence, la commission européenne *Eurodeem* a mis en place une base de données (voir référence [5]) regroupant les caractéristiques de plusieurs milliers de moteurs de constructeurs différents

2.3 Facteur de déplacement

De même que le rendement, le facteur de déplacement est l'un des critères clés dans le choix d'un moteur électrique, tant sur le plan de l'investissement que sur celui des coûts opérationnels.

En effet, la plupart des contrats de distribution d'énergie électrique spécifient une valeur minimale de facteur de déplacement en deçà de laquelle une pénalité financière est appliquée. Par définition, le facteur de déplacement ($\cos\phi$) est compris entre 0 et 1 et représente la part d'énergie réactive consommée.

3 Techniques d'économie d'énergie

3.1 Choisir l'installation adaptée

Afin d'améliorer le rendement d'un système piloté par moteur, il convient :

- de diminuer autant que faire se peut la charge entraînée par le moteur (la charge symbolise l'ensemble entraîné par l'arbre moteur).
- d'adapter le point de fonctionnement de l'installation au point de meilleur rendement du moteur.

A titre indicatif, les mesures suivantes peuvent être prises pour améliorer le rendement :

- pompes et ventilateurs : réduction du diamètre du rotor ou du ventilateur, nettoyage des filtres pour réduire les pertes, choix d'une pompe à meilleur rendement, ...
- compresseurs : réduction de la pression d'admission, réduction de la température de réfrigération du système de climatisation, ...

Par exemple, pour une installation de pompage, il est important de dimensionner l'installation à partir des besoins en terme de débit. Une fois les contraintes maximales de fonctionnement de l'unité connues, il est plus facile de déterminer les maximum de puissance et la gamme des vitesses de fonctionnement.

Le surdimensionnement des installations est à éviter. Cette pratique, bien que fréquente, conduit à une forte diminution du rendement de l'installation.

Toutes les configurations de fonctionnement doivent être prises en compte dans la conception de l'installation. Certains profils de fonctionnement peuvent être obtenus par la mise en place d'unités multiples en fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable (variation de vitesse).

Les besoins énergétiques spécifiques doivent être calculés pour qu'une solution optimale soit définie du point de vue de la consommation énergétique et des coûts de maintenance.

Une fois les plages de fonctionnement définies et les puissances mises en jeu calculées, il est possible de dimensionner le moteur et le variateur de vitesse.

Depuis l'an 2000, la législation européenne a introduit un système de label pour le rendement des moteurs à 2 et 4 pôles TENV (totalement clos non ventilé) dans la gamme de 1 à 90 kW. La classe de meilleur rendement est appelée EFF1 et la classe de moindre rendement EFF3.

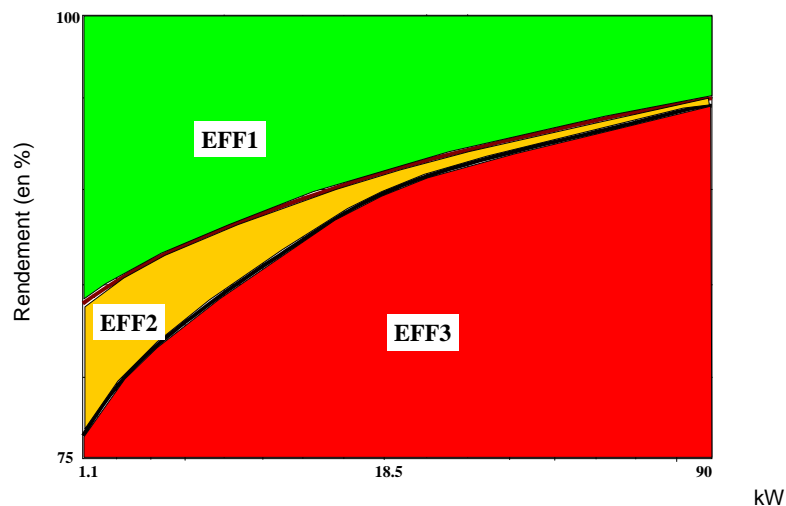


Figure 2 : Système de classification des rendements moteurs (rendement à pleine charge en fonction de la puissance)

3.2 Variateurs de vitesse

Pour les systèmes nécessitant un contrôle de débit ou de pression, et plus particulièrement pour les systèmes à fortes pertes par frottement, la méthode permettant les plus fortes économies d'énergie est le contrôle de la vitesse par variateur de vitesse.

Rappelons que pour ce type d'applications, la puissance consommée est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation de l'arbre moteur.

Ce raisonnement n'est toutefois pas valable pour des systèmes avec des forces de frottement statiques élevées. Par forces statiques, nous entendons les pertes statiques ou de frottement du système, c'est-à-dire l'ensemble des forces à vaincre pour mettre un fluide en mouvement. Ces forces ne dépendent pas de la vitesse du flux et sont exprimées comme des constantes de pression à dépasser.

Il n'est, en règle générale, pas utile d'implémenter des variateurs de vitesse dans de tels systèmes.

La figure 3 représente les deux types de situation (H indique les frottements statiques, S la courbe du système, N le pourcentage de la vitesse par rapport à la vitesse nominale, Q la vitesse du flux, et η le rendement du moteur).

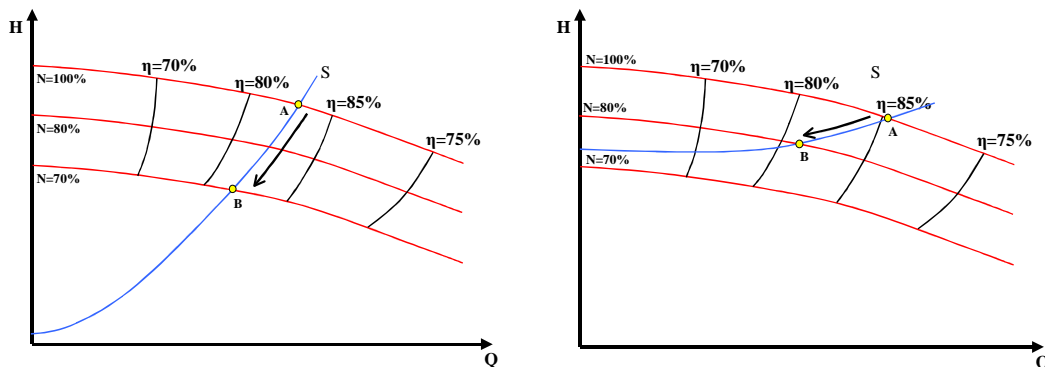


Figure 3 : influence de la vitesse variable sur le rendement, (a) forces de frottement statique faibles, (b) forces de frottement statique fortes.

Pour un système avec des pertes sous forme de forces de frottement statiques faibles, lorsque la vitesse ralentit le point de fonctionnement se déplace de A vers B selon un chemin de rendement machine quasi constant (η). Les lois de similitude sont dans ce cas respectées et la puissance absorbée est fortement réduite si le flux et la pression diminuent, ce qui montre bien que la variation de vitesse est la méthode idéale pour les systèmes à forces de frottement prédominantes.

Par contre, pour les systèmes avec des forces de frottement statiques élevées, le système de courbes ne commence pas à l'origine, mais à partir d'une ordonnée (axe H) à l'origine correspondant aux forces de frottement statiques du système. La courbe ne suit donc plus les courbes de rendement constant de la machine, mais les croise. La réduction de flux n'est alors plus proportionnelle à la réduction de vitesse : une petite diminution de la vitesse de rotation engendrera une forte diminution du flux et du rendement la machine.

Réduire la vitesse entraîne l'augmentation des caractéristiques de fonctionnement de la machine. Au-delà du point de fonctionnement nominal, le régime permanent ne peut plus être assuré sans risquer d'endommager le moteur.

Pour les moteurs travaillant en-dessous des conditions nominales, la solution consiste à y associer des variateurs de vitesse.

Il existe plusieurs technologies de variation de vitesse, mécaniques ou électroniques, dont les plus courantes sont listées ci-dessous :

1. onduleur de fréquence électronique,
2. moteur à induction avec rotor bobiné à résistance variable,
3. couplage par glissement (limiteur de couple par friction),
4. moteurs à courant continu,
5. entraînement par courroie trapézoïdale,
6. turbine à vapeur et moteurs alternatifs (les éléments de travail du moteur évoluent alternativement),
7. rotor bobiné à résistance variable ou à variation du nombre de paires de pôles.

Les caractéristiques de chacune de ces technologies sont :

Technologie du variateur de vitesse	Plage d'utilisation	Type d'utilisation	Rendement approximatif pour une vitesse donnée			
			25 %	50 %	75 %	100 %
Moteur asynchrone à cage d'écureuil	Vitesse et couple ajustable sur toute la plage d'utilisation	Couple nominal à basse vitesse	70	80	88	90
Moteur à courant continu	Vitesse et couple ajustable sur toute la plage d'utilisation	Couple nominal à basse vitesse	70	86	88	89
Courroie trapézoïdale	Rapport de transmission allant jusqu'à 1/11. Le couple augmente lorsque la vitesse décroît.	Ajustement permanent en fonction du couple et de la vitesse nécessaire	70	80	83	85
Moteur à induction avec onduleur de tension et de fréquence	Vitesse ajustable au 1/12	Réduction substantielle du couple en fonction de la vitesse	50	60	77	85
Moteur à induction avec rotor bobiné à résistance variable	Contrôle de la vitesse efficace seulement jusqu'à 50%	Ajustement réduit de vitesse ou de démarrage rapide car les pertes sont substantielles	22	45	67	89
Couplage par glissement (courants de Foucault)	Vitesse ajustable sur l'ensemble de la gamme	Possibilités de réduction de vitesse limitées, démarrage facilité	20	41	62	82
Turbine à vapeur (à alimentation variable) associée à une boîte de vitesse	Vitesse ajustable sur l'ensemble de la gamme, à condition de bénéficier d'une alimentation en vapeur adaptée	Bonne réduction de vitesse, mais nécessite d'être couplé à une boîte de vitesse pour fonctionner sur les vitesses optimales des turbines	70	86	88	90
Moteurs à vitesses multiples	Gamme de vitesses disponibles (hautes et basses) limitée	Couple nominal aux différentes vitesses	Approximativement 88% à hautes vitesses et 79% à basses vitesses			

Le tableau ci-dessus représente le rendement pour un variateur de 15kW

3.2.1 ROTOR BOBINE A RESISTANCE VARIABLE OU CHANGEMENT DU NOMBRE DE PAIRES DE POLES

Pour des applications pour lesquelles les besoins sont parfaitement définis, des moteurs à vitesses multiples (vitesses présélectionnées) peuvent être utilisés.

Ces moteurs bénéficient d'une plage d'utilisation importante. Les rendements des moteurs à vitesses multiples sont au moins comparables au rendement des onduleurs de fréquences et ne nécessitent pas de dispositifs de variation de vitesse annexe. Il convient de vérifier si le fonctionnement à vitesses présélectionnées permet d'exploiter au mieux les potentiels d'économie d'énergie de l'application. Les combinaisons à deux vitesses les plus classiques sont : 3000 & 1500 tr/min, 1500 & 750 tr/min, 1500 & 1000 tr/min, 1000 & 750 tr/min.

3.2.2 TRANSMISSION PAR COURROIE TRAPEZOÏDALE

Les transmissions par courroie permettent à une installation déportée de fonctionner grâce à un petit moteur électrique mis en liaison avec une vis de commande.

Différentes conceptions de courroies existent afin de pouvoir faire varier le ratio de transmission en fonction des changements de vitesse ou de couple.

Le rendement des transmissions par courroies est de l'ordre de 95%. Les courroies permettent de se protéger efficacement contre des surcharges ou des blocages moteur par contrôle du glissement de la courroie sur la poulie d'entraînement. Toutefois si le glissement dure trop longtemps, cela peut provoquer un échauffement, voire une rupture de la courroie.

L'échauffement est la première cause de détérioration des courroies. C'est la raison pour laquelle un système de refroidissement par ventilation doit systématiquement être prévu pour dissiper l'énergie calorifique accumulée dans la courroie. La chaleur et l'usure de la courroie peuvent provoquer des changements de 5 à 10% du rapport de transmission.

La précision du contrôle de vitesse est relativement faible pour de nombreux modèles de courroie.

Des conceptions industrielles récentes ont permis de passer la barre des 37 kW de puissance transmise. Il existe maintenant des courroies permettant de transmettre jusqu'à 75kW. Des rapports de transmission allant jusqu'à 11:1 sont aujourd'hui disponibles.

3.2.3 MOTEUR A COURANT CONTINU

Les moteurs à courant continu ont longtemps été utilisés pour des applications nécessitant de très fortes puissances. Un dispositif de redressement de la tension alternative du réseau est nécessaire pour assurer l'alimentation des moteurs à courant continu. Rappelons que le champ magnétique statorique est stationnaire et que les enroulements du rotor sont alimentés par le biais de collecteurs et de balais.

Les balais demandent beaucoup de maintenance et sont difficilement protégeables des environnements agressifs et poussiéreux.

Pour

Large plage de vitesse,
 Contrôle de la vitesse simple,
 Bon rendement à vitesse élevée,
 Possibilité de vitesses plus élevées que la vitesse nominale.

Contre

Mauvais facteur de puissance à basse vitesse, augmentation des pertes,
 Sensible aux environnements agressifs,
 Coûts de maintenance élevés,
 Moteur coûteux.

3.2.4 COUPLAGE PAR GLISSEMENT (LIMITEUR DE COUPLE PAR FRICTION)

Les coupleurs à courant de Foucault sont des dispositifs de transmission électromagnétique installés entre un moteur fonctionnant à vitesse constante et l'arbre d'une pompe pour en faire varier la vitesse. Une bobine stationnaire (excitation) est alimentée afin de faire varier le glissement entre le tambour et le rotor. La puissance nécessaire à l'alimentation de l'excitation est de l'ordre de 2% de la puissance totale du variateur.

Pour

Peu cher,
 Le couple est transmis via le champ magnétique.

Contre

Refroidissement liquide nécessaire pour dissiper la chaleur,
 Faible rendement à faible vitesse

Les coupleurs hydrauliques utilisent un fluide pour établir la liaison entre le moteur et la charge. Des coupleurs hydrauliques sophistiqués sont disponibles pour des rendements élevés.

3.2.5 VARIATEUR DE VITESSE ELECTRONIQUE

Parmi toutes les technologies existantes pour varier la vitesse des moteurs électriques, les variateurs de vitesse électroniques présentent le plus d'avantages.

En effet, grâce à ce type de variateur, il est possible de contrôler parfaitement les phases de mise en rotation et d'arrêt de l'application, mais aussi d'effectuer un contrôle indépendant de la vitesse et du couple. De plus les variateurs de vitesse électroniques assurent toutes les fonctionnalités de protection du variateur et du moteur.

Bien que de plus en plus d'installations soient conçues ou retrofitées avec des variateurs de vitesse électroniques pour des puissances allant de 0,1 KW à 100 MW, cette solution ne présente pas que des avantages et de nombreuses précautions doivent être prises avant leur mise en service. Ainsi, les variateurs de vitesse électroniques ne sont pas la panacée.

Pour

Haut rendement pour les systèmes à faible frottement,
 Contrôle précis et direct de la vitesse, du couple et du courant dans le moteur..

Contre

Sensible aux creux de tension,
 Générateur d'harmonique,
 Coûts d'installations élevés.

4 Aspects techniques des variateurs de vitesse électroniques (VVE)

Outre les critères habituels de choix d'un variateur de vitesse, comme la charge, le couple, une attention particulière doit être portée aux systèmes équipés de variateurs de vitesse électronique. L'ajout d'un variateur de vitesse électronique doit tenir compte de la compatibilité entre les caractéristiques électriques du moteur et du VVE, afin de prévenir de tout risque de panne prématurée.

Les paramètres listés ci-dessous varient en fonction des différents types de variateurs et jouent un rôle important dans les performances du système.

4.1 Taux de distorsion harmonique du variateur

Tous les variateurs sont générateurs d'harmoniques. Les courants harmoniques constituent un accroissement de l'intensité dans les enroulements du moteur et des risques d'échauffement sont à craindre.

Il convient d'être particulièrement vigilant dans le cas de retrofitages d'installations, notamment en ce qui concerne un éventuel déclassement du moteur. Il n'est en effet pas rare de devoir appliquer des déclassements de l'ordre de 10% pour des moteurs d'ancienne génération alimentés par des variateurs de vitesse récents.

Les moteurs récents ne sont, quant à eux, pas soumis à un facteur de déclassement et sont bien adaptés pour être alimentés par variateur de vitesse.

4.2 Pics de tension

Les moteurs électriques sont conçus pour fonctionner à partir d'une tension nominale. Il convient de vérifier que ces pics restent toujours inférieurs au maximum de tension admissible pour les enroulements du moteur sous peine d'endommager les isolants.

4.3 Ratio U/f

En général, même si cela dépend du fabricant du variateur, le VVE génère une ratio U/f qui est constant jusqu'à une certaine fréquence F1 (voir figure 4). De ce point à une fréquence maximale, le variateur régule sa fréquence de manière à afficher une tension de sortie constante. Cette méthode présente néanmoins des risques intrinsèques. A basses fréquences, le variateur maintient le moteur en état de sursaturation en imposant en sortie du variateur une tension plus élevée que celle calculée à partir de la loi $U/f = \text{constante}$. La sursaturation a pour effet d'augmenter le couple sans changer la vitesse de rotation. Un fonctionnement trop long à hautes ou à basses fréquences peut donc entraîner une détérioration du moteur par sur-échauffement. Il existe des moteurs dits « moto ventilés » pour lesquels la vitesse de ventilation n'est pas égale à la vitesse de l'arbre moteur (alimentation externe nécessaire pour le ventilateur de dissipation d'énergie).

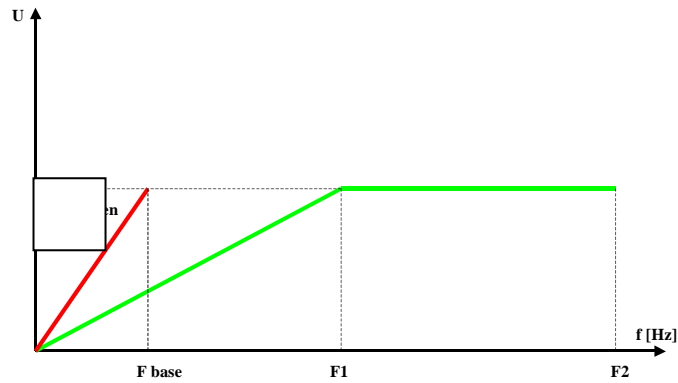


Figure 4 : Tension de sortie en fonction de la fréquence

Au-dessus de la fréquence nominale, le variateur produit une tension constante qui crée un couple plus faible et le moteur peut au mieux fournir une puissance constante. Pour des fréquences très supérieures à la fréquence nominale (2 fois et plus), il est possible que le moteur subisse des contraintes mécaniques (vibrations, déséquilibre du rotor, force centrifuge imposée à la cage d'écureuil, roulements, ...) trop importantes par rapport aux caractéristiques moteur et réduise la durée de vie de ce dernier. Les variateurs peuvent aussi opérer à des vitesses trop basses pour permettre à des moteurs auto-ventilés de produire suffisamment d'air en vue de leur refroidissement. Des mesures spécifiques doivent être prises pour se protéger d'un fonctionnement permanent au-dessus d'un certain ratio U/f . Ainsi, les variateurs de vitesse électroniques disposent souvent de fonction « Boost » qui permettent de tenir des surcouples transitoires à basses vitesses. Par ailleurs, et ce pour certaines applications spécifiques, l'utilisation d'un codeur est préconisée afin de mesurer en temps réel la vitesse vraie de rotation de l'arbre moteur. Il est recommandé de se renseigner sur les caractéristiques spécifiques moteur auprès des fabricants.

4.4 Choix du courant de vitesse électronique

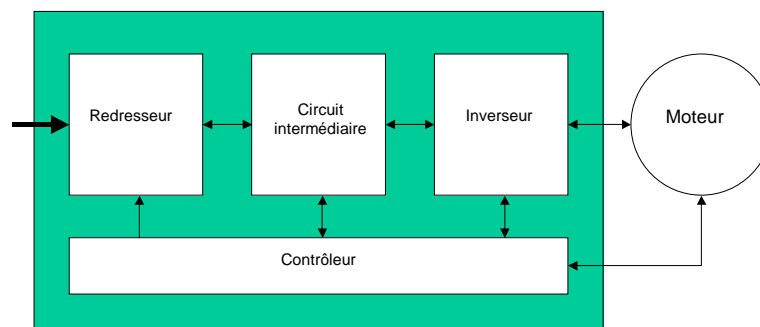


Figure 5 : Schéma de principe d'un variateur de vitesse électronique

Les variateurs de vitesse se déclinent selon une large gamme de puissance et de dimensions. Tous les variateurs de vitesse ont pour principe de faire varier la vitesse du moteur en agissant sur le glissement et/ou sur la fréquence d'alimentation. Selon les différentes techniques utilisées, les variateurs peuvent être classés en 3 catégories :

4.4.1 LES CYCLO-CONVERTISSEURS

Les cyclo-convertisseurs sont des convertisseurs de type AC/AC pour moteurs synchrones et asynchrones. Cette technologie est principalement utilisée pour les applications de type laminage à basse ou moyenne vitesse, les machines d'extraction, les propulsions de navires et les broyeurs à ciment.

Une application type des cyclo-convertisseurs est le contrôle de la vitesse d'un moteur de traction AC et le démarrage d'un moteur synchrone.

La plupart des cyclo-convertisseurs ont des puissances de sortie élevées allant de 3 à 25 MW, et travaillent sous une gamme de tension moyenne, pour des vitesses de fonctionnement relativement réduites allant de 0 à 50% de la fréquence d'entrée.

4.4.2 LES CONVERTISSEURS A ONDES CARREES

Les convertisseurs à ondes carrées sont constitués d'un pont redresseur, d'un bus continu à tension variable et d'un onduleur. L'amplitude de la tension du bus continu est obtenue par variation de l'angle d'ouverture des thyristors du pont redresseur, le signal est ensuite réondulé à fréquence variable grâce à l'onduleur. Il existe différents types de convertisseurs à ondes carrées (Chopper, PAM) afin d'obtenir un taux ajustable du ratio U/f.

Le convertisseur à ondes carrées est le plus simple et le moins coûteux des convertisseurs et fournit une qualité d'énergie médiocre.

Le contenu harmonique du signal de sortie est très élevé et engendre de l'échauffement et un facteur de puissance dégradé.

4.4.3 MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSIONS (MLI)

Les variateurs de vitesse récents utilisent des ponts redresseurs afin d'obtenir une tension continue sur un bus continu. Plusieurs techniques sont alors utilisées basées sur de la MLI synchrone ou sur de la modulation vectorielle asynchrone pour contrôler le convertisseur en termes d'amplitude et de fréquence.

Les avantages sont : un facteur de puissance acceptable, un taux de distorsion harmonique faible dû à la fréquence de commutation élevée des IGBT et la possibilité de récupérer l'énergie sur les phases de freinage.

4.5 Paramètres systèmes

Des perturbations de type CEM dues à la haute fréquence produite par une grande majorité des variateurs de vitesse électroniques peuvent résulter en des comportements anormaux erratiques. La seule solution pour se protéger des perturbations hautes fréquences et d'éviter leur propagation sur l'ensemble du réseau est d'utiliser des filtres passifs de type LC ou des filtres actifs et des selfs de filtrage en entrée. Les perturbations hautes fréquences entre le moteur et le variateur peuvent être éliminées par utilisation de câbles blindés et de filtres spécifiques. Les harmoniques de tension présentes dans le signal de sortie engendrent des harmoniques de courant entre le moteur et le variateur. Ces harmoniques de courant réduisent la puissance transférée dans les câbles et doivent donc être prises en compte dans le dimensionnement de l'installation (NDT voir, à ce sujet, la section 3 du Guide Power Quality [6]).

5 Conclusions

Le choix d'un moteur à meilleur rendement peut engendrer de fortes économies d'énergie. A première vue, cela peut sembler improbable : le coût des moteurs à haut rendement est de 25% plus élevée que celui d'un moteur standard. Les rendements de ce type de moteur ne sont « que » de 2 à 4% meilleurs que ceux des moteurs standards. Toutefois, pour des applications fonctionnant de façon continue, le coût complet du cycle de vie sera de plus de 10 fois supérieurs au coût du moteur. Des études montrent que l'énergie consommée par les moteurs électriques dans l'Union européenne représente plus de 400TWh chaque année (1TWh=1million de KWh). Les moteurs à haut rendement permettent donc des économies d'énergie significatives pour le domaine industriel. L'utilisation de variateurs de vitesse doit être considérée dans de nombreux cas. Particulièrement pour les systèmes de régulation de débit pour lesquels la puissance appelée et la vitesse de rotation sont corrélées ($P \sim n^3$) et des économies d'énergie importantes peuvent être réalisées.

Il y a plusieurs techniques pour atteindre cet objectif, chacune avec ses désavantages.

6 Références et bibliographies

- [1] P. Bertoldi, A. de Almeida, h. Falkner, Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives, Springer, Berlin (Germany), 2000
- [2] Europump and hydraulic Institute, Variable Speed Pumping, Elsevier Advanced Technology, Oxford (UK), 2004
- [3] Energy Efficiency Enquiries Bureau ETSU, Good Practice Guide 2: Energy savings with motors and drives, Oxfordshire (UK), 1998
- [4] <http://www.seeem.org/news.php>, accessed in December 2006
- [5] <http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int/eurodeem/>, accessed in December 2006
- [6] Bibliothèque du guide Power Quality sur www.leonardo-energy.org/France