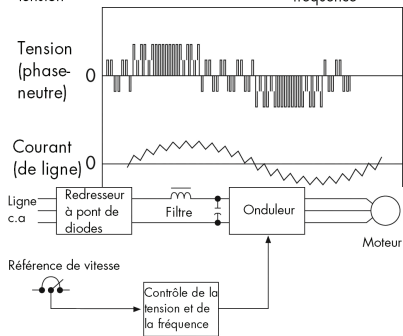
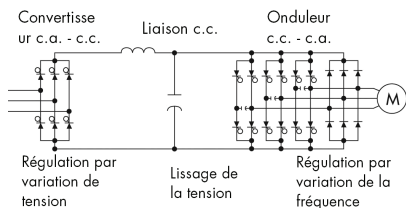


Guide de référence sur l'efficacité énergétique des ENTRAÎNEMENTS À FRÉQUENCE VARIABLE



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ : Ni CEATI International Inc., ni les auteurs ni tout autre organisme ayant participé au financement de ce guide (y compris toute personne agissant en leur nom), ne seront tenus responsables quant aux dommages causés par, ou résultant de l'utilisation des informations, matériels, équipements, produits, méthodes ou procédés, quels qu'ils soient, décrits dans le présent guide.

Il est conseillé de faire appel à des professionnels accrédités pour la mise en application des informations contenues dans le présent guide.

Ce guide a été préparé par Scott Rouse de Energy @ Work – la révision technique et l'expertise sur les entraînements à fréquence variable étant assurées par Dan Dederer de Enertech Solutions Inc. – à l'intention du Groupe d'intérêt sur les Solutions énergétiques pour les clients (GISEC) de CEATI International avec le parrainage des entreprises d'électricité suivantes, membres du consortium :

BCHydro 
powerSMART

hydro 
one

 **Hydro Québec**

 **Manitoba Hydro**

CEATI 
INTERNATIONAL

OPA
Ontario Power Authority

 **SaskPower**
eneraction



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

© 2009 CEATI International. Tous droits réservés.

Des remerciements vont à Ontario Hydro, Ontario Power Generation et à tous les autres organismes qui ont fourni les matériels employés dans la préparation de ce guide

TABLE DES MATIÈRES

Section	Page	
1	Introduction	5
a.	Domaine d'application de l'entraînement à fréquence variable	5
b.	Aperçu des entraînements à fréquence variable	6
c.	Aspects économiques	8
2	Classification des entraînements	21
a.	Entraînements à c.a.	21
b.	Autres entraînements c.a.	22
c.	Entraînements à c.c.	25
d.	Embrayages à courants de Foucault	26
e.	Moteurs perfectionnés	26
f.	Commande mécanique de la vitesse	27
3	Principes de fonctionnement – EFV à c.a.	29
a.	Moteurs c.a. à induction	29
b.	Moteurs c.a. à induction à cage d'écuréuil	30
c.	Entraînements à fréquence variable à modulation d'impulsions en durée	31
4	Choix des EFV	35
a.	Aspects électriques de l'application d'EFV à des moteurs c.a.	35
b.	Critères des moteurs	42

5	Critères d'application des EFV et estimation des économies	55
a.	Caractéristiques de la charge entraînée et puissance nécessaire	55
b.	Comparaison avec les méthodes de contrôle conventionnelles	62
c.	Surveillance et vérification	75
d.	Rendement du système	78
e.	Rendement électrique	78
f.	Coût par unité de produit	79
g.	Fiabilité et entretien	79
6	Études de cas	81
a.	Étude de cas : remplacement d'un entraînement à courants de Foucault par un EFV	81
b.	Étude de cas : remplacement des commandes de registres par des EFV dans un système CVCA	85
c.	Étude de cas : remplacement des commandes de pompes à vide par un EFV dans une exploitation laitière	89
	Annexe A : Bibliographie	93
	Annexe B : Sites Web utiles	95
	Annexe C : Acronymes en usage dans l'industrie et glossaire	99
	Annexe D : Formules pratiques	105
	Annexe E : Facteurs de conversion	111

1 INTRODUCTION

a. Domaine d'application de l'entraînement à fréquence variable

Le présent guide a été élaboré pour offrir une vue d'ensemble de la technologie des entraînements à fréquence variable (EFV) dans le but de faciliter la compréhension, le choix, l'application et l'exploitation des EFV. Dans ce guide, le terme "entraînement" désigne l'EFV électronique.

Ce guide ne traite PAS des autres entraînements à vitesse variable ou variateurs de vitesse (VV) qui sont commandés par des dispositifs mécaniques ou hydrauliques.

Ce guide est principalement consacré aux EFV à basse tension, disponibles dans le commerce et employés avec des moteurs c.a. polyphasés à induction dans la gamme comprise entre les puissances fractionnaires et 500 hp et qui sont :

- D'une tension inférieure ou égale à 600 V
- Du type IGBT PWM (à modulation d'impulsions en durée employant des transistors bipolaires à grille isolée)
- Disponibles dans le commerce

Les produits hors série applicables à des moteurs spéciaux ou de grande puissance ne figurent pas dans ce guide.

Afin de bien choisir l'EFV qui convient à votre application, il serait avantageux de comprendre la technologie, de connaître les

1 Introduction

besoins spécifiques de votre charge et de vous posez, au départ, la bonne question. Ce pourrait être :

“Le profil de ma charge varie-t-il de façon suffisante pour justifier un EFV ?”

Note : il est fortement recommandé que les personnes ou les compagnies qui souhaitent installer des EFV s'assurent les services d'un spécialiste expert en EFV afin de comprendre et d'optimiser les avantages pouvant en découler.

Les gestionnaires de projets d'EFV qui ne sont pas habitués à cette technologie sous-estiment souvent l'importance de disposer des données adéquates, de l'analyse et de l'ingénierie initiale, qui sont indispensables pour avoir une compréhension approfondie du système.

6

b. Aperçu des entraînements à fréquence variable

Un **entraînement à fréquence variable (EFV)** est un appareil qui fait varier la tension et la fréquence d'alimentation d'un moteur, permettant ainsi de réguler la vitesse de ce moteur et du système qu'il entraîne. En répondant aux exigences du procédé, on améliore le rendement énergétique du système.

Un EFV est en mesure de régler à la fois la vitesse et le couple d'un moteur à induction.

Un EFV assure donc une gamme de régulation continue de la vitesse d'un procédé (par comparaison à la commande de vitesses discrètes que procurent les boîtes de vitesses ou les moteurs à plusieurs vitesses).

On désigne parfois les EFV par divers autres noms tels que : variateurs de vitesse, entraînements à vitesse réglable, ou onduleurs.

Commande de vitesse d'un moteur

Les moteurs à induction c.a. (à courant alternatif) sont par essence des machines à vitesse constante, leur variation de vitesse entre marche à vide et marche à pleine charge étant de l'ordre de 2 à 5 %, correspondant au "glissement" du moteur.

La vitesse de la machine est déterminée par la fréquence de la tension d'alimentation et par le nombre de pôles magnétiques du stator.

Dans leur majorité, les applications font appel à des moteurs à vitesse fixe. Dans ces applications ou systèmes, on utilise des organes de commande tels que registres et vannes pour réguler le débit et la pression. Ces dispositifs se traduisent en général par un fonctionnement peu efficace et des pertes d'énergie, du fait de leur action d'étranglement.

Par contre, il est souvent souhaitable d'avoir un moteur qui fonctionne à deux vitesses déterminées (ou plus), ou à une vitesse variant de façon continue. On peut souvent remplacer les organes de commande conventionnels en intégrant un fonctionnement à vitesse variable assuré par un EFV.

Dans la plupart de ces applications, des économies d'énergie considérables sont réalisables en faisant varier la vitesse des moteurs et des charges entraînées à l'aide d'un EFV disponible sur le marché. Les économies englobent les coûts d'investissement et les coûts d'entretien associés à ces organes de commande.

1 Introduction

Le tableau ci-après présente des exemples de charges types et de leurs possibilités d'économie d'énergie.

Type de charge	Applications	Aspects énergétiques
Charge à couple variable - la puissance en hp varie comme le cube de la vitesse. - le couple varie comme le carré de la vitesse.	<ul style="list-style-type: none">- Ventilateurs centrifuges- Pompes centrifuges- Soufflantes- Systèmes CVCA	Une vitesse de fonctionnement plus faible entraîne des économies d'énergie considérables vu que la puissance absorbée par le moteur diminue proportionnellement au cube de la vitesse.
Charge à couple constant - le couple reste le même quelle que soit la vitesse - la puissance en HP varie de façon directement proportionnelle à la vitesse.	<ul style="list-style-type: none">- Mélangeurs- Convoyeurs- Compresseurs- Presses à imprimer	Une vitesse de fonctionnement plus faible économise l'énergie de façon directement proportionnelle à la réduction de la vitesse.
Charge à puissance constante - Fournit la même puissance à toutes les vitesses. - Le couple varie de façon inversement proportionnelle à la vitesse.	<ul style="list-style-type: none">- Machines-outils- Tours- Fraiseuses- Presses à poinçonner	Aucune économie d'énergie aux vitesses réduites; des économies d'énergie sont toutefois réalisables si l'on parvient aux vitesses optimales de coupe et d'usinage pour la pièce produite.

c. Aspects économiques

Les aspects économiques constituent généralement l'un des facteurs les plus importants à prendre en compte pour le choix des équipements industriels, mais la méthode d'évaluation n'est pas si simple. De nombreuses questions d'ordre économique sont souvent ignorées dans les évaluations d'EFV

Économies d'énergie possibles découlant du remplacement d'un registre par un mécanisme d'entraînement à fréquence variable (EFV)				
Débit d'air (pourcentage du maximum)	Durée de fonctionnement quotidien (heures)	Énergie consommée par un registre (kWh/an)	Énergie consommée par un EFV (kWh/an)	Différence de consommation d'énergie (kWh/an)
50 %	2	18 500	4 800	13 700
60 %	3	29 300	9 800	19 500
70 %	6	61 700	26 800	34 900
80 %	6	63 300	35 900	27 400
90 %	4	44 200	32 600	11 600
100 %	3	34 200	35 200	-1 000
Total	24	251 200	145 100	106 100

Référence : Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada, "Quelle est l'ampleur des économies?"

Les économies d'énergie électrique ont leur importance, mais plusieurs autres facteurs doivent également être pris en compte dans le cadre d'une évaluation des coûts du cycle de vie d'un équipement. Par exemple, dans les cas où des pompes ou des ventilateurs fonctionnent à des vitesses réduites, on réalise souvent des économies notables d'entretien du fait de l'usure réduite des joints, paliers, arbres, etc. Le prix d'achat compte en principe pour moins de 10 % des coûts du cycle de vie si l'on tient compte des coûts d'exploitation et d'entretien.

L'accroissement de productivité découlant de la diminution des temps d'inactivité et la réduction du gaspillage due au contrôle optimisé des processus doivent également être considérés comme des aspects économiques importants des coûts du cycle de vie.

Évaluation de la période de récupération simple

On utilise souvent la *méthode de récupération simple* si l'on cherche à déterminer le temps nécessaire pour récupérer le montant initial investi dans un équipement grâce aux économies de coûts qu'elle génère. La période de récupération se calcule comme suit :

$$\text{Nombre d'années} = \frac{\text{Coût en capital initial total}}{\text{Économies annuelles totales}}$$

Cette méthode ne devrait être employée qu'à titre d'indicateur de risque. La récupération simple ne tient pas compte de l'impact de plusieurs variables importantes telles que les incitatifs fiscaux, l'inflation, etc.

Le tableau ci-après présente une "liste de contrôle pour EFV" en matière de coûts et d'économies; il permettra de ne pas oublier certains aspects économiques.

Coûts en capital	Économies de capital	Coûts et économies d'exploitation	Divers
<ul style="list-style-type: none"> - Entraînement - Moteur - Équipement de conditionnement d'énergie - Installation - Amélioration du réseau électrique - Analyse torsionnelle - Besoins en matière d'espace - Refroidissement 	<ul style="list-style-type: none"> - Vannes de régulation - Boîte de vitesses - Accouplement hydraulique/équipements de changement de vitesses mécaniques - Démarreurs à tension réduite 	<ul style="list-style-type: none"> - Énergie (énergie totale consommée, changement de la demande de pointe) - Entretien/ durée de vie utile/ temps d'immobilisation - Possibilités de survitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Valeur résiduelle - Répercussions fiscales

Évaluation de la valeur actualisée nette

Le calcul de la valeur actualisée nette (VAN) constitue une meilleure technique d'appréciation de la rentabilité d'un investissement. S'appuyant sur la technique des flux monétaires actualisés, la VAN tient compte de la valeur de rendement de l'argent. On trouvera ci-dessous un résumé des différentes étapes de cette méthode :

1. Évaluer les coûts/économies des éléments du tableau ci-dessus pour chacune des options envisagées (par exemple, achat d'un EFV ou plutôt achat d'un système d'entraînement mécanique). Les coûts en capital seront exprimés en dollars totaux; les dépenses d'exploitation seront exprimées en termes de temps.
2. Déterminer le taux d'actualisation réel qui sera employé pour chaque facteur fonction du temps et chaque facteur à valeur actualisée projetée. Par exemple, pour le calcul des économies d'énergie :
 - x% par an = taux d'actualisation nominal
 - y% par an = taux d'augmentation prévu pour les tarifs d'électricité
 - $i\% = \{x/y - 1\}\%$

Au titre d'un autre exemple, la valeur résiduelle au cours des années à venir sera actualisée en employant le pourcentage d'augmentation anticipé du taux d'intérêt entre aujourd'hui et 'n' années.

3. Les facteurs de chacune des options devront être actualisés à leurs valeurs actuelles en utilisant les taux d'actualisation appropriés. Le nombre d'années employé pour les facteurs fonctions du temps devra être choisi comme correspondant à une période de récupération raisonnable. Les tables de valeurs

actualisées et les tables d'annuités sont très utiles pour le processus d'actualisation.

4. La valeur actualisée nette (VAN) de chaque option est obtenue en faisant la somme des coûts et des économies qui ont été calculés en termes de valeur actualisée pour chaque facteur.
5. Pour toute option, si :
 - $VAN > 0$, il existe un gain net
 - $VAN < 0$, il existe une perte nette
 - $VAN = 0$, l'équilibre est atteint pour la période visée.
6. L'option qui présente la VAN la plus élevée est la plus rentable.
7. La procédure peut être répétée pour différentes périodes totales de temps.
8. On peut également se livrer à une comparaison entre deux options en utilisant la différence relative entre les options pour chacun des facteurs et en trouvant une VAN.

Coûts en capital

Entraînement à fréquence variable

Le coût d'un entraînement à fréquence peut différer considérablement selon les options envisagées.

Le coût devrait comprendre :

- les commandes de vitesse,
- les commandes marche/arrêt,
- l'ingénierie,
- les câbles et conduits,

- les fondations,
- les pièces de rechange et toutes modifications afférentes.

Par exemple, pourrait être prévue une batterie d'alimentation de secours pour les circuits de commande pour les séquences de redémarrage ou d'arrêt automatiques.

Moteur

Pour un nouveau système, on devra tenir compte du coût d'un moteur pour entraînement à vitesse variable; par contre, si on envisage de moderniser un système en lui ajoutant un EFV, le moteur existant devra alors être examiné en termes de dimensions, puissance et rendement. En principe, seuls les moteurs à haut rendement devraient être envisagés.

Pour plus de détails, on se reportera au "Guide de référence sur l'efficacité énergétique des moteurs" de CEATI International.

Équipement de conditionnement d'énergie

On devra inclure le coût de l'équipement de conditionnement d'énergie tel que, par exemple, les filtres d'harmoniques. Cet équipement comprend les filtres pour l'énergie absorbée par le moteur de même que les conditionneurs d'énergie limitant les tensions et courants harmoniques renvoyés au réseau d'électricité par l'entraînement à fréquence variable.

Installation

On devra déterminer les frais d'installation, de main-d'œuvre et de mise en service pour l'entraînement et le moteur, ainsi que pour l'appareillage de conditionnement d'énergie.

1 Introduction

Amélioration du réseau électrique

Au cas où serait exigée une fiabilité plus grande que celle offerte par le réseau actuel, il sera peut-être nécessaire d'améliorer le réseau d'alimentation électrique. Les éventuelles améliorations comprennent les ensembles de relais de protection, la redondance de transformateurs d'alimentation, les commutateurs de transfert/artères de secours, la formation du personnel d'intervention d'urgence, et les programmes d'entretien préventif.

Analyse torsionnelle

Une analyse torsionnelle permettra de définir les effets de vibration provoqués dans le train d'entraînement par les harmoniques de l'onduleur. Cette analyse devra être effectuée pour les applications d'entraînements de grande puissance.

14

Besoins en matière d'espace

Il s'agit là du coût des espaces intérieurs nécessaires pour l'entraînement et les filtres, ainsi que du coût des espaces extérieurs pour les transformateurs, filtres ou bobines d'inductance.

Refroidissement

L'installation d'un entraînement peut nécessiter un système de refroidissement supplémentaire. Bien que des équipements CVCA soient souvent utilisés, le refroidissement par eau peut se révéler comme une solution beaucoup plus économique pour les applications de grande puissance.

Économies de capital

L'usage d'un EFV peut éviter certains investissements de capitaux dans des équipements tels que : boîte de vitesses, vannes de régulation, accouplement hydraulique/dispositifs de changement de vitesses mécanique et démarreurs à tension réduite.

Coûts et économies d'exploitation

Économies en matière d'énergie électrique et de demande

On pourra réaliser des économies à la fois en termes de coûts de l'énergie consommée (kWh) et de la demande de pointe (kW). L'importance de ces économies dépend du profil de la charge spécifique à l'application, du profil de charge globale sur le réseau, de l'échelle des tarifs de l'entreprise d'électricité locale, etc.

En dehors des avantages qui lui sont propres, l'installation d'un EFV va normalement entraîner une diminution de l'énergie totale consommée (kWh). Fabricants et entreprises d'électricité offrent en ligne des feuilles de calcul électroniques téléchargeables, en général gratuites, permettant de faire des estimations des économies électriques réalisées.

L'autre facteur du coût de l'énergie électrique est la charge apparente mesurée en kVA et qui dédommage la compagnie d'électricité pour le courant de pointe devant être fourni pendant le mois. Chaque entreprise d'électricité a une échelle tarifaire différente; contactez la vôtre pour vérifier si les tarifs qui vous sont appliqués vous conviennent. La figure ci-après montre la demande quotidienne (kW) et la puissance apparente (kVA). On appelle facteur de puissance le rapport

1 Introduction

entre kW et kVA. La plupart des entreprises d'électricité appliquent désormais une pénalité pour le facteur de puissance en facturant la puissance apparente (kVA) plutôt que la puissance active (kW).

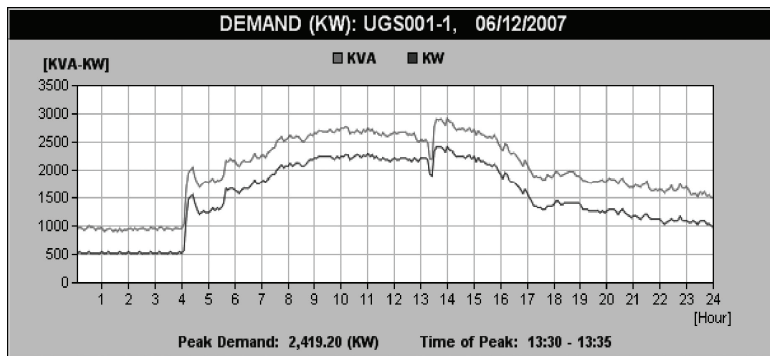


Figure 1 : Demande (kW) et puissance apparente (kVA)
Avec l'autorisation de UGS Profiler, contrôle en temps réel

16

Demand	Demande
Hour	Heure
Peak Demand	Demande de pointe
Time of peak	Durée de la pointe

Le facteur le plus important intervenant dans la demande est la puissance appelée par la charge. Ainsi, si la puissance peut être réduite, les entraînements à fréquence variable apportent des économies substantielles.

Il importe également de ne pas oublier le coût réel des kilowattheures (kWh) d'énergie économisés. Dans le cas de contrats à prix fixes ou de tranches à tarif progressif, les kWh économisés sont les derniers qui auraient, sans cela, été achetés et qui auraient généralement été facturés au prix le plus élevé.

Toutefois, étant donnée que certaines entreprises d'électricité continuent d'employer des structures de prix inversées et/ou à prix fixe, le coût réel par kWh va dépendre de la structure tarifaire de l'entreprise.

Dans les marchés déréglementés pour lesquels le prix du kWh varie en fonction de l'offre et de la demande, les économies de chaque application vont dépendre du prix de l'énergie électrique pour la période visée. Par exemple, la volatilité du prix de cette énergie en Ontario est illustrée ci-dessous :

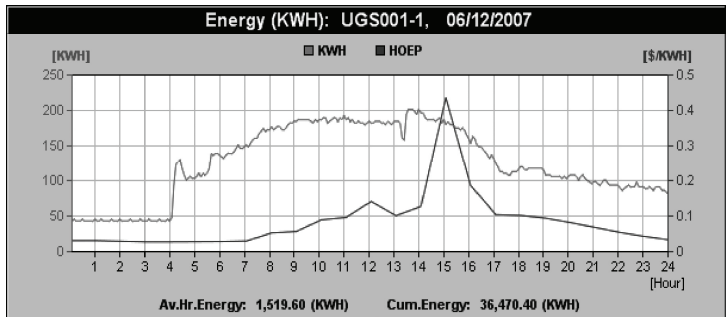


Figure 2 : Énergie électrique (kWh) et tarif horaire de l'énergie en Ontario (HOEP) (\$/kWh)

Avec l'autorisation de UGS Profiler, contrôle en temps réel

Energy	Énergie
Hour	Heure
Av. Hr. Energy	Énergie moyenne par
Cum. Energy	heure Énergie totale

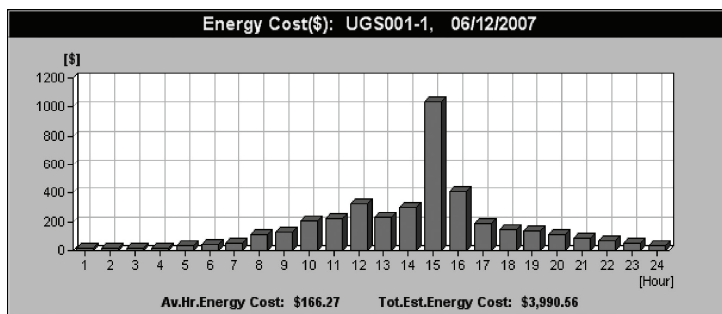


Figure 3 : Coût final de l'énergie pendant 24 heures
Avec l'autorisation de UGS Profiler, contrôle en temps réel

Energy Cost	Coût de l'énergie
Hour	Heure
Av. Hr. Energy Cost	Coût moyen de l'énergie par heure
Tot. Est. Energy Cost	Coût total estimé de l'énergie

Il est donc très important d'évaluer correctement le bénéfice réel des économies d'énergie, car l'emploi d'un "coût moyen de l'énergie" risque d'induire en erreur.

Améliorations de l'enchaînement des opérations et du fonctionnement

L'installation d'un EFV va souvent se traduire par des améliorations du procédé ou de l'exploitation et on devra tenir compte de ces gains de rendement dans les économies.

Élimination des autres dispositifs de commande mécaniques

La mise en place d'un EFV peut aider à éliminer certains dispositifs de commande mécaniques comme les vannes de régulation et les registres. Les coûts liés à l'achat et à l'entretien

de ces appareils devront également être pris en compte dans l'évaluation des économies entraînées par un EFV.

Avantages des EFV : entretien/durée de vie utile

L'usage d'un entraînement c.a. à fréquence variable peut entraîner une réduction de l'entretien et une diminution des temps d'immobilisation relativement appréciables. Les facteurs contributifs sont l'élimination des clapets de régulation, des fonctions de limitation du courant (qui empêchent le grillage des moteurs provoqué par des redémarrages multiples) et la protection de l'isolation des moteurs (qui sera protégée contre les problèmes de tension externes).

Le fonctionnement à des vitesses réduites prolongera la durée de vie utile des matériels comme les paliers, par exemple. Les contraintes et la fatigue du métal dans les arbres du train d'entraînement en seront également diminuées.

Les améliorations apportées à la technologie des EFV et les pièces de rechange "facilement disponibles" ont aidé à réduire considérablement les durées de réparation et n'ont, en général, provoqué aucun problème d'exploitation.

Possibilités de survitesse

Les possibilités de survitesse des EFV offrent l'avantage de favoriser une diminution considérable des coûts d'exploitation et de l'investissement dans le cas où les niveaux de production peuvent être augmentés. Par exemple, on peut accroître le débit d'air d'un ventilateur déjà existant en ajoutant un EFV (dans le but de moderniser le moteur du ventilateur) qui permettra un

1 Introduction

fonctionnement à une fréquence supérieure à la fréquence assignée de 60 Hz.

Critères d'utilisation des EFV (conseils et mises en garde)

Un entraînement à fréquence variable constitue le choix le plus rentable lorsque le cycle de fonctionnement est réparti de façon d'autant plus régulière sur la gamme complète des débits. Les économies relatives d'énergie augmentent si les courbes de rendement et de résistance du système sont à pente accentuées.

Nombre d'applications potentiellement satisfaisantes d'EFV sont négligées car d'autres avantages que les économies d'énergie sont délaissés. Il arrive souvent que, pour l'utilisateur, le contrôle et la fiabilité du procédé l'emportent de loin sur les avantages associés au rendement. Si, pour les applications à fréquence variable, on se sert du coût moyen de l'énergie dans les analyses des économies, celles-ci risquent d'être sous-évaluées. Il est préférable d'employer les coûts d'énergie et les primes de puissance en vigueur dans l'échelle tarifaire de l'entreprise d'électricité locale.

Pour les charges à couple variable, les économies découlant des entraînements à fréquence variable peuvent être beaucoup plus importantes du fait que la puissance en HP varie comme le cube de la vitesse.

Pour les applications de puissance supérieure à 25 HP, les coûts d'installation sont généralement du même ordre que le coût total en capital de l'entraînement. Pour les puissances inférieures à 25 HP, les coûts d'installation peuvent dépasser le coût de l'entraînement.

2 CLASSIFICATION DES ENTRAÎNEMENTS

a. Entraînements à c.a.

Entraînements à fréquence variable

Les EFV électroniques sont des appareils de contrôle de la vitesse qui font varier la tension et la fréquence d'alimentation d'un moteur à induction par la technique de modulation d'impulsions en durée (PWM). Les EFV sont devenus le moyen privilégié pour faire varier la vitesse de fonctionnement d'une machine, car ils sont relativement peu coûteux et d'une très grande fiabilité.

Les EFV utilisent des dispositifs à semi-conducteurs de puissance nommés transistors bipolaires à grille isolée (IGBT). La modulation d'impulsions en durée (PWM) permet de réguler la vitesse et les caractéristiques de couple d'un moteur, de façon à ce qu'elles correspondent aux besoins de la charge. Les EFV convertissent la tension d'alimentation c.a. à fréquence fixe du moteur en une alimentation à tension et fréquence variables, et peuvent réguler la vitesse d'un moteur à induction entre 10 % et 200 % environ, des gammes plus étendues étant possibles selon le modèle et les options choisis.

La précision de la vitesse est sensible au glissement du moteur, ce qui se traduit, pour une fréquence donnée, par une vitesse de fonctionnement légèrement inférieure à la vitesse synchrone. La précision peut être grandement accrue grâce au signal de réaction d'un tachymètre. Un contrôle extrêmement précis de

2 Classification des entraînements

la vitesse et de la position de l'arbre d'un moteur s'obtient par l'usage d'un EFV avec contrôle des vecteurs.

L'EFV est à même d'offrir de nombreuses solutions qui dépendent de l'application envisagée. Un EFV peut par exemple apporter :

1. Des économies d'énergie dans les applications de ventilateurs et de pompes;
2. Un meilleur contrôle et une meilleure régulation du procédé;
3. L'accélération ou le ralentissement d'une machine ou d'un procédé;
4. La correction inhérente du facteur de puissance;
5. Des possibilités d'isolement en cas d'urgence;
6. La protection contre les courants de surcharge;
7. Une accélération sans danger.

b. Autres entraînements c.a.

Commande des moteurs à rotor bobiné

Les moteurs à rotor bobiné sont un type particulier de moteur à induction, qui comportent des enroulements rotoriques en cuivre à la place des barres en aluminium du rotor classique à cage d'écureuil.

Les raccordements à ces enroulements se font par le biais d'un ensemble de bagues collectrices montées sur l'arbre.

Si les enroulements sont raccordés en court-circuit, le moteur fonctionne comme un moteur à cage d'écureuil à vitesse fixe; mais si on ajoute des résistances dans le circuit du rotor, le

glissement du moteur augmente, ce qui permet de réguler la vitesse du moteur.

L'énergie prélevée sur le circuit rotorique pendant le démarrage est dissipée dans les résistances sous forme de chaleur.

Comme variante, on peut remplacer les résistances par un circuit électronique afin de diminuer l'énergie gaspillée. Ce circuit récupère l'énergie et la renvoie au réseau d'alimentation c.a., accroissant ainsi le rendement global du moteur.

Autrefois très répandue, cette technique de contrôle de la vitesse d'un moteur a été largement remplacée par les EFV électroniques.

Moteurs à plusieurs vitesses

Les moteurs à plusieurs vitesses sont des moteurs à induction comportant des stators à bobinages spéciaux qui permettent de faire varier le nombre de pôles magnétiques en raccordant les enroulements du moteur suivant différentes configurations.

Les moteurs à plusieurs vitesses à simple enroulement procurent un rapport de vitesse de 2 à 1. Le changement de pôles est réalisé en raccordant les enroulements de façon à doubler le nombre de pôles en inversant le courant dans chaque groupe de bobinages alternés. Cette technique est appelée changement de pôles conséquents.

Dans le cas des moteurs à deux enroulements, il est possible de les configurer selon plusieurs nombres de pôles, ce qui permet d'autres rapports de vitesses. Trois vitesses sont obtenues en configurant l'un des enroulements selon les principe des pôles

2 Classification des entraînements

conséquents, et quatre vitesses en configurant chacun des deux enroulements suivant le même principe.

Du fait que les moteurs à plusieurs vitesses à deux enroulements comportent un deuxième ensemble de bobinages, ils ont souvent des dimensions plus importantes que leurs équivalents à une seule vitesse de même puissance.

Les moteurs à plusieurs vitesses sont une option relativement peu coûteuse dans les cas où des vitesses de fonctionnement déterminées fixes et limitées sont acceptables.

Contrôleurs de vitesse à tension variable

Ces contrôleurs font généralement appel à des thyristors (SCR) qui commandent la tension d'alimentation du moteur.

24

Sous tension réduite, un moteur va “glisser” davantage et sa vitesse tendra donc à diminuer.

Ce schéma de commande est normalement limité aux applications de ventilateurs et nécessite un moteur à glissement élevé du rotor.

Le contrôle est peu précis et ses applications sont limitées aux moteurs à condensateur permanent (MCP), à une seule phase. De tels moteurs se retrouvent en général dans les applications agricoles pour des puissances jusqu'à plusieurs HP.

On n'utilise plus les contrôleurs de vitesse à tension variable dans les applications industrielles et commerciales.

c. Entraînements à c.c.

Les moteurs à courant continu (c.c.) sont par essence des machines à vitesse variable. La commande de la vitesse et du couple est obtenue en faisant varier la tension d'induit, le courant d'excitation, ou les deux.

Autrefois, pour réguler la vitesse d'un moteur c.c., on utilisait un groupe convertisseur ou groupe M-G. Dans un groupe M-G, un moteur c.a. entraîne une génératrice c.c. qui fournit une tension c.c. variable destinée à faire fonctionner le moteur c.c. Les groupes M-G sont encombrants, ont un mauvais rendement et exigent beaucoup d'entretien.

Les groupes M-G sont désormais remplacés par des ensembles redresseurs à commande par microprocesseurs, qui permettent une régulation simple et précise de la vitesse, et offrent un rendement et une fiabilité élevés.

Cependant, en raison de la complexité, du coût et de l'entretien des moteurs c.c., ces ensembles sont rarement employés dans les applications nouvelles. De nombreuses applications d'entraînements à c.c. sont remplacées par des moteurs c.a. avec entraînements EFV.

Les nouvelles applications faisant appel aux moteurs c.c. sont en général des applications sophistiquées pour lesquelles les moteurs et entraînements c.a. ne sont pas en mesure de répondre aux exigences de la charge. Un exemple en est les équipements de traction dans lesquels les couples de démarrage exigés dépassent ceux que peuvent fournir les moteurs c.a.

d. Embrayages à courants de Foucault

Les embrayages à courants de Foucault peuvent être employés pour commander des moteurs c.a. à induction à cage d'écuréuil classiques. Leur rendement est toutefois peu élevé par rapport aux EFV et leurs applications sont limitées.

Un embrayage à courants de Foucault comporte essentiellement trois composantes :

- un tambour d'acier directement entraîné par un moteur c.a.,
- un rotor muni de pôles,
- des enroulements situés sur les pôles et qui fournissent le flux variable nécessaire à la régulation de la vitesse.

26

Une tension est appliquée aux enroulements des pôles pour établir le flux, un déplacement relatif se produisant alors entre le tambour et son rotor de sortie.

En faisant varier la tension appliquée, la quantité du couple transmis varie, ce qui permet de modifier la vitesse.

e. Moteurs perfectionnés

Les moteurs perfectionnés se classent généralement dans une catégorie de moteurs dont le fonctionnement fait appel à l'électronique de puissance et à des commandes par microprocesseurs. Ce concept avait été énoncé il y a bien des années, mais n'a pu se concrétiser qu'avec l'électronique moderne actuelle. Tous les moteurs perfectionnés peuvent fonctionner à des vitesses variables.

On commence à les utiliser dans les applications de fabricants de matériel d'origine, comme par exemple les moteurs de soufflantes des thermopompes et compresseurs d'air de haut de gamme. Certains moteurs perfectionnés sont maintenant des moteurs à usage général d'une puissance assignée pouvant atteindre 600 HP. Citons les moteurs à réluctance commutés, les moteurs à commutation électronique, et les moteurs à pôles inscriptibles (*Written Pole*).

f. Commande mécanique de la vitesse

Le fonctionnement des machines à vitesse variable peut être obtenu à l'aide d'un moteur à vitesse fixe, équipé d'un dispositif mécanique de commande de la vitesse. Parmi les applications, citons par exemple : accouplements hydrauliques, systèmes de poulies réglables, contrôles magnétiques de la vitesse et transmissions mécaniques telles qu'entraînements par courroie, entraînements par chaîne, boîtes de vitesses, etc.

Dans les méthodes mécaniques de commande de la vitesse, le moteur fonctionne à vitesse constante et le choix de l'accouplement modifie la vitesse de la charge entraînée. Le rendement du système dépend de plusieurs facteurs comme la tension des courroies, le type et le nombre de courroies et/ou de chaînes, etc. Les méthodes mécaniques classiques donnent lieu à des vitesses constantes et prédéfinies qui ne peuvent être réglées dynamiquement pour des charges variables. Les dispositifs mécaniques de commande de la vitesse ont en général des rendements peu élevés aux faibles charges.

2 Classification des entraînements

3 PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT – EFV À C.A.

a. Moteurs c.a. à induction

Un moteur c.a. à induction comprend un rotor dont les enroulements coupent le champ magnétique tournant engendré par les enroulements du stator.

À la vitesse de pleine charge, le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme du moteur. Ceci provient du fait que le champ magnétique provoque la circulation de courants dans les enroulements du rotor, ce qui engendre un couple qui entraîne la rotation du rotor. Ainsi, si le rotor tournait à la même vitesse que le champ magnétique tournant, le mouvement relatif entre rotor et champ magnétique serait nul et aucun couple ne serait engendré.

La valeur du décalage de vitesse entre le rotor et le champ magnétique tournant se nomme “glissement du moteur”. Le couple développé par le moteur est d’autant plus important que le glissement est plus élevé.

La vitesse de rotation du champ magnétique tournant dépend du nombre de pôles ou de bobines répartis autour du stator, et de la fréquence du courant d’alimentation. Elle se nomme “vitesse synchrone”.

$$\text{Vitesse synchrone} = \frac{120 \times \text{fréquence}}{\text{Nombre de pôles}}$$

3 Principes de fonctionnement – EFV à c.a.

Les vitesses types des moteurs à induction sont : 3600, 1800, 1200, et 900 tr/min.

La figure 4 montre la relation couple-vitesse d'un moteur à induction standard.

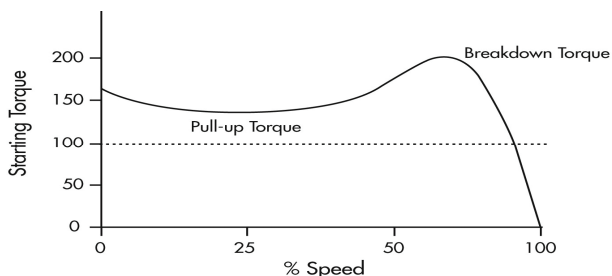


Figure 4 : Courbe couple-vitesse d'un moteur à induction

Starting Torque	Couple de démarrage
Breakdown Torque	Couple de décrochage
Pull-up Torque	Couple minimal au démarrage
% speed	% de la vitesse

b. Moteurs c.a. à induction à cage d'écureuil

La majorité des moteurs c.a. à induction sont des moteurs à cage d'écureuil.

Dans ce type de moteurs, les enroulements du rotor (voir la figure 5) se composent de barres en aluminium ou en alliage de cuivre disposées parallèlement à l'arbre et qui sont court-circuitées par des anneaux d'extrémité suivant le dessin ci-après.

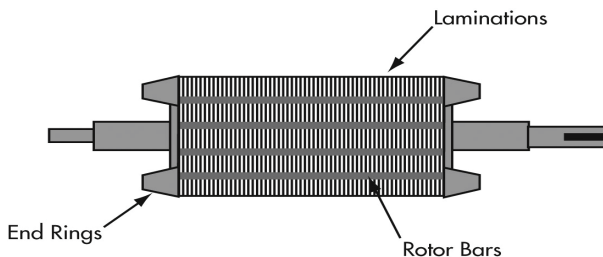


Figure 5 : Schéma du rotor d'un moteur à cage d'écureuil

Laminations	Tôles du rotor
End rings	Anneaux d'extrémité
Rotor bars	Barres du rotor

La forme des barres et la résistance de l'alliage qui les constitue influent sur les caractéristiques de la courbe couple-vitesse du moteur.

c. Entraînements à fréquence variable à modulation d'impulsions en durée

Lorsqu'ils fonctionnent à partir d'une source d'alimentation à fréquence constante (normalement 60 Hz), les moteurs c.a. à induction sont des machines à vitesse fixe.

Un entraînement à fréquence variable commande la vitesse d'un moteur c.a. en faisant varier la fréquence de l'alimentation du moteur.

L'entraînement assure également la régulation de la tension de sortie par rapport à la fréquence de sortie, de façon à maintenir

3 Principes de fonctionnement – EFV à c.a.

relativement constant le rapport tension sur fréquence (V/Hz), qu'exigent les caractéristiques d'un moteur c.a. pour engendrer le couple qui convient.

La première étape du processus consiste à transformer la tension d'alimentation c.a. en une tension c.c. au moyen d'un redresseur. La sortie c.c. renferme des ondulations de tension qui sont lissées par des condensateurs de filtrage. Cette partie d'un EFV est souvent désignée sous le nom de liaison c.c.

Cette tension c.c. est alors reconvertie en une tension c.a. La conversion est en principe réalisée par des dispositifs électroniques de puissance tels que transistors de puissance bipolaires à grille isolée IGBT employant la technique de modulation d'impulsions en durée (PWM). La tension de sortie est établie et coupée à haute vitesse, la durée ou largeur des impulsions commutées étant contrôlée de façon à obtenir une forme d'onde voisine d'une onde sinusoïdale.

32

Les anciennes technologies d'entraînements comme les redresseurs à courant constant et les régulateurs par variation de tension, employaient comme dispositifs de commande des redresseurs commandés au silicium (SCR) ou thyristors. Ces technologies sont désormais remplacées par les EFV à modulation d'impulsions en durée (PWM).

L'ensemble du processus est commandé par un microprocesseur qui contrôle :

- la tension d'alimentation d'entrée
- le point de consigne de vitesse
- la tension de la liaison c.c.

- la tension et le courant de sortie assurant un fonctionnement du moteur dans les limites des paramètres prédéterminés.

La figure 6 ci-après montre un entraînement EFV PWM classique.

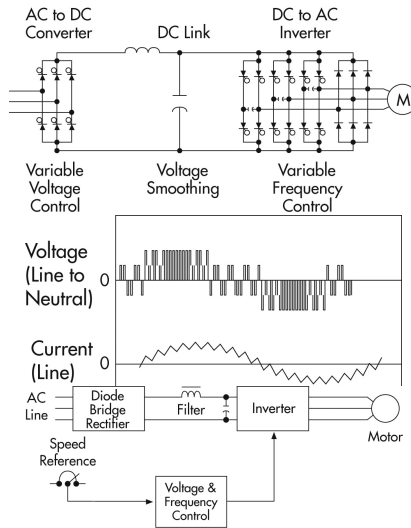


Figure 6 : Schéma fonctionnel d'un EFV PWM classique

AC to DC Converter	Convertisseur c.a. - c.c.
DC Link	Liaison c.c.
DC to AC Inverter	Onduleur c.c. - c.a.
Variable Voltage Control	Régulation par variation de tension
Voltage smoothing	Lissage de la tension
Variable Frequency Control	Régulation par variation de la Control fréquence
Voltage (Line to neutral)	Tension (phase-neutre)
Current (Line)	Courant (de ligne)
AC Line	Ligne c.a.

3 Principes de fonctionnement – EFV à c.a.

Diode Bridge Rectifier Redresseur à pont de diodes
Filter Filtre
Inverter Onduleur
Motor Moteur
Speed Reference Référence de vitesse
Voltage & Frequency Contrôle de la tension et de la
Control fréquence

Dans les entraînements ou applications les plus simples, la référence de vitesse est simplement un point de consigne. Cependant, pour les applications plus complexes, la référence de vitesse est délivrée par un système de commande de processus comme un automate programmable (PLC) ou un tachymètre.

4 CHOIX DES EFV

a. Aspects électriques de l'application d'EFV à des moteurs c.a.

Une application réussie et nécessitant peu d'entretien des entraînements EFV exige de bien comprendre leur impact sur le moteur et sur le réseau de distribution électrique.

L'application des EFV à des moteurs à induction va entraîner des effets dont il faut tenir compte pour un fonctionnement satisfaisant. En voici quelques exemples :

- L'aptitude d'un moteur à assurer efficacement son propre refroidissement diminue à mesure que sa vitesse baisse. Le surdimensionnement du moteur ou l'installation d'un système de ventilation externe peuvent se révéler nécessaires en cas de fonctionnement prolongé à de faibles vitesses et sous charges élevées.
- Le fonctionnement à différentes vitesses risque de provoquer des résonances mécaniques dans l'équipement entraîné. Il faudra identifier ces vitesses de résonance et les exclure de la gamme de fonctionnement du moteur.
- Les EFV engendrent des tensions et courants harmoniques qui risquent, dans certains cas, d'entraîner des effets indésirables sur le réseau de distribution électrique et d'altérer le fonctionnement des équipements. Si l'on soupçonne un problème de qualité de l'onde, on devra faire inspecter le réseau

électrique par une personne qualifiée. Pour minimiser ces effets, on devra parfois installer des transformateurs d'isolement, des bobines d'inductance de ligne ou des filtres. Pour plus d'informations, communiquez avec le représentant de votre entreprise d'électricité locale. Dès l'achat des EFV, il est bon de tenir compte de l'installation de dispositifs de filtrage qui minimiseront les problèmes de qualité de l'onde dans le réseau électrique. On devra faire appel à un spécialiste qualifié dans le domaine qui pourra évaluer et établir la nécessité de tels dispositifs.

Alimentation électrique des entraînements

Pour fonctionner de façon sécuritaire, efficace et fiable, les entraînements c.a. nécessitent une alimentation électrique convenable.

36

Les entraînements monophasés fonctionnent sous des tensions d'alimentation normalisées de 120 et 240 volts. Les tensions normalisées des moteurs triphasés sont de 200, 230, 460 et 575 volts.

La tension d'alimentation assignée du réseau de distribution est en principe plus élevée que celle de la plaque signalétique de l'entraînement, afin de tenir compte des chutes de tension entre le transformateur de distribution et le point d'utilisation.

En Amérique du Nord, la fréquence assignée est de 60 Hz (hertz ou cycles par seconde).

Harmoniques

La distorsion harmonique de la tension et du courant dans les réseaux électriques est engendrée par les charges non linéaires telles que EFV, machines à souder, redresseurs, alimentations sans coupure (UPS), fours à arc, etc. Les harmoniques déforment l'onde électrique et cette distorsion risque de se propager au réseau électrique tout entier et éventuellement à l'extérieur de l'usine.

Dans les EFV, la distorsion harmonique a pour origine les dispositifs de commutation de courant à semi-conducteurs employés pour produire les fréquences d'alimentation variables.

Ces effets, appelés “courants harmoniques de ligne”, ont une fréquence multiple de celle du courant d'alimentation fondamental à 60 Hz. Par exemple, une fréquence de 180 Hz correspond au troisième harmonique. Ces courants engendrent des distorsions harmoniques de la tension qui, la plupart du temps, dépassent les niveaux acceptables.

Pour plus de détails, on se reportera au “Guide de référence sur la qualité de l'onde” de CEATI International.

4 Choix des EFV

Composantes harmoniques

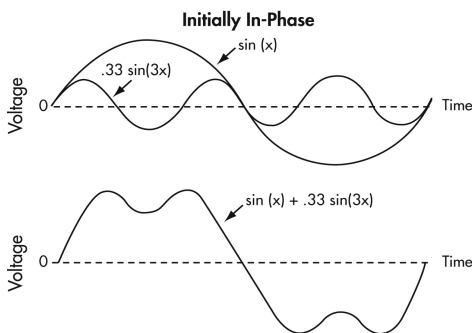


Figure 7 : Amplitudes des harmoniques

Voltage	Tension
Initially in phase	En phase à l'origine
Time	Temps

Les amplitudes des harmoniques impairs diminuent avec l'augmentation de leur fréquence, ce qui fait que les harmoniques de rangs inférieurs sont les plus importants. Les systèmes à EFV ne génèrent en principe pas d'harmoniques de rangs pairs.

Les harmoniques existent aussi longtemps que fonctionne l'équipement qui les génère et leur amplitude a tendance à rester stable.

Les harmoniques sont susceptibles d'être considérablement amplifiés par les condensateurs de correction du facteur de puissance. L'inductance du réseau d'alimentation peut, pour certaines fréquences harmoniques, entrer en résonance avec les

condensateurs et engendrer des courants et tensions de valeurs élevées risquant d'endommager les équipements.

Effets des harmoniques

Les microprocesseurs, machines à commande numérique et systèmes de commande de processus ne peuvent fonctionner qu'à partir de signaux de commande précis. L'existence d'harmoniques risque d'entraîner des anomalies du fonctionnement de ces matériels. Les harmoniques peuvent par ailleurs créer des interférences avec les ordinateurs et un fonctionnement incorrect des équipements électroniques. Ils risquent en outre provoquer la défaillance de condensateurs et de fusibles.

En présence d'harmoniques de courant, les moteurs tournent à des températures plus élevées et consomment donc davantage d'énergie, car ils doivent compenser le "couple contrarotatif" que créent les harmoniques impairs.

Il peut en résulter un claquage prématuré des matériaux d'isolation et une diminution de la durée de vie. Le moteur verra en outre son rendement global diminuer et aura à supporter des contraintes de tension sur ses enroulements et des pulsations du couple.

La gestion des harmoniques

Si l'on soupçonne un problème d'harmoniques, celui-ci devra être confirmé avant que toute tentative d'action correctrice ne soit entreprise. Un essai assez simple consiste à visualiser les formes d'onde du réseau électrique sur un oscilloscope. Une distorsion notable de la forme d'onde est une indication de la présence d'harmoniques. Les analyseurs d'harmoniques de puissance permettent de mesurer l'amplitude des harmoniques

individuels. De façon générale, il est préférable de confier ce travail à un expert spécialisé en qualité de l'alimentation.

Les utilisateurs ont à leur disposition diverses solutions pour résoudre ces problèmes; ils doivent d'abord s'assurer que l'installation est conforme au code de l'électricité applicable et que le système de mise à la terre est conforme aux normes.

Alimentation séparée

Idéalement, les charges produisant des harmoniques, de même que les charges sensibles, devraient être alimentées par des artères totalement distinctes et des transformateurs indépendants.

Transformateurs d'isolement et inductances de ligne

Pour protéger l'entraînement et aussi la ligne d'alimentation c.a. contre la distorsion, on emploie souvent des transformateurs d'isolement et des inductances de ligne.

Filtres

Les filtres d'harmoniques servent à réduire l'amplitude d'un ou de plusieurs courants de fréquences déterminées afin d'empêcher qu'ils ne pénètrent dans le reste du réseau. Les filtres peuvent être conçus sur demande de façon à correspondre à l'environnement électrique.

Longueur des câbles

La longueur des câbles devra être aussi courte que possible, c.-à-d. inférieure à 15 m ou 50 pieds, chaque fois que cela est possible.

Une bonne pratique largement acceptée consiste à acheter un système d'entraînement complet comprenant les inductances de ligne, plutôt que d'acheter l'entraînement seul. En règle générale, une inductance de ligne d'une impédance de 3 à 5 % va éviter que les harmoniques engendrés par un entraînement EFV n'interfèrent avec les équipements sensibles alimentés par le réseau électrique.

Si les charges non linéaires dépassent 20 % de la charge totale de l'usine, il serait judicieux de réaliser une étude des harmoniques et de minimiser leur impact éventuel en installant, outre les inductances de ligne, des transformateurs d'isolement.

Spécification des entraînements en matière d'harmoniques

Les spécifications des entraînements portent généralement la mention : *“L'équipement de conditionnement d'énergie ne devra pas engendrer de distorsion en tension ou d'encoques de commutation qui soient supérieures aux limites conseillées par la norme IEEE 519”*; mais le sens n'est pas forcément clair pour une installation en particulier. Que signifie respecter la norme IEEE 519 lorsque l'on installe un entraînement sur un système d'alimentation électrique ?

La norme IEEE 519-1992 *“Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (Pratiques et spécifications recommandées pour le contrôle des harmoniques dans les réseaux d'alimentation électrique” est souvent citée en référence, mais n'est pas forcément toujours bien comprise.

Certaines parties de cette norme sont consacrées aux problèmes qu'engendrent les courants et tensions harmoniques, donnent

4 Choix des EFV

des exemples de calcul, des exemples d'applications, et traitent des courants harmoniques produits par divers types de convertisseurs de puissance et de charges non linéaires.

D'un point de vue pratique des applications des entraînements, respecter les prescriptions en matière d'harmoniques signifie que les entraînements doivent présenter, à leurs bornes de sortie, une distorsion harmonique totale de courant inférieure à 5 % pour la charge assignée. Pour les faibles puissances d'entraînement rencontrées avec les charges à couple variable, le taux de distorsion harmonique (THD) du courant mesuré par un analyseur d'harmoniques peut être supérieur à 5 %, mais l'amplitude du courant harmonique devra alors être inférieure à celle de pleine charge.

b. Critères des moteurs

42

Problèmes électriques des moteurs

Les systèmes d'isolation des enroulements sont classés selon leur tenue aux températures ou leurs capacités thermiques. Les essais permettant d'établir les propriétés thermiques des installations à basse tension ne doivent pas soumettre leur isolation électrique à des contraintes supérieures à 600 volts.

En fonctionnant, un EFV PWM risque d'engendrer des transitoires de tension de valeur nettement plus élevée que la tension assignée du moteur, et qui pourraient provoquer un claquage du système d'isolation électrique en un temps très court.

Pour comprendre ce phénomène, examinons de quelle façon un onduleur PWM permet d'obtenir une forme d'onde de

courant voisine d'une onde sinusoïdale. Les figures ci-après montrent les formes d'ondes caractéristiques de tension et de courant des onduleurs à modulation d'impulsions en durée (PWM).

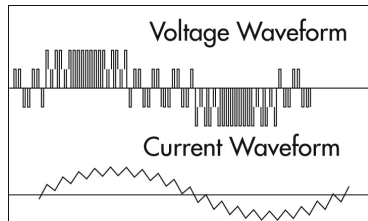


Figure 8 : Formes d'ondes de tension et de courant

Voltage Waveform	Forme d'onde de tension
Current Waveform	Forme d'onde de courant

La forme d'onde de tension se compose d'une série d'impulsions contrôlées par les dispositifs de sortie de l'onduleur. La largeur ou durée de ces impulsions est commandée pour que la forme d'onde se rapproche d'une forme sinusoïdale. La figure 9 représente une forme d'onde de tension d'une demi-période d'un onduleur PWM type fonctionnant sur un réseau 600 volts.

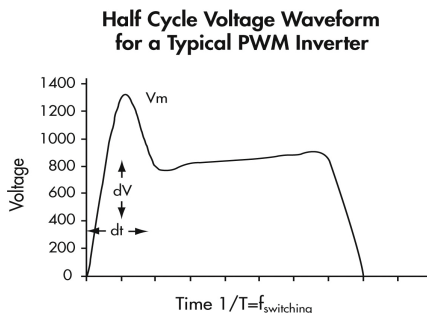


Figure 9 : Forme d'onde de tension d'une demi-période d'un onduleur PWM type

Half Cycle Voltage Waveform for a Typical PWM Inverter type Voltage Time $1/T = f_{\text{switching}}$	Forme d'onde de tension de une demi-période d'un onduleur PWM type Tension Temps $1/T = f_{\text{commutation}}$
---	---

La contrainte de tension maximale sur le système d'isolation (V_m) peut atteindre une valeur nettement plus élevée que la tension assignée du moteur et présenter des temps de montée en tension extrêmement brefs (illustrés sur la figure 9).

En raison des réflexions ou effets de résonance multiples, la fréquence risque d'augmenter à la suite des interactions entre la fréquence de commutation PWM et la forme d'onde, la longueur des câbles d'alimentation du moteur et l'inductance du moteur.

Les ondes stationnaires ou un "effet d'oscillations parasites" sont susceptibles de produire une réflexion de tension pouvant atteindre plus de deux fois la tension appliquée; et ceci devient encore plus problématique avec des longueurs de câbles plus grandes (habituellement supérieures à 15 m ou 50 pieds).

Un “effet d’oscillations parasites” engendre des contraintes de tension très élevées sur les premières spires des enroulements du moteur, ce qui peut entraîner des courts-circuits temporaires et une défaillance de l’isolation à la masse.

On peut minimiser ce problème en installant des filtres appropriés, en installant des moteurs pour entraînement à vitesse variable avec isolation renforcée, et en s’assurant que les moteurs réparés ont une isolation améliorée.

Dans de nombreux EFV, l’utilisateur a la possibilité de régler la fréquence de commutation. Cette fréquence peut être réglée dans une gamme très large pouvant comprise entre 500 Hz et 20 kHz. Le choix de la fréquence de commutation est très important, car il détermine le nombre de dépassements de tension que doit supporter le moteur pendant un temps donné. Les fréquences de commutation élevées se traduisent par des nombres plus élevés de dépassements de tension d’amplitudes plus élevées, ce qui va exercer des contraintes accrues sur l’isolation du moteur. Si la tension de crête assignée du moteur est supérieure au niveau des dépassements de tension, une fréquence de commutation élevée ne posera aucun problème. Si par contre le niveau des dépassements de tension est supérieur à la tension de crête assignée du moteur, une fréquence de commutation moins élevée pourra réduire le niveau des dépassements de tension à une valeur inférieure à la tension de crête assignée du moteur. Cependant, une fréquence trop faible risque de provoquer un fort ronflement du moteur, ce qui se révèle indésirable dans certaines applications telles que les systèmes CVCA.

4 Choix des EFV

Les facteurs à considérer comprennent notamment :

- Réduire, lorsque c'est possible, les parcours de câbles;
- utiliser des inductances de filtrage de sortie d'onduleur (impédance type de 1 à 3 %);
- employer une fréquence de commutation plus faible;
- pour les moteurs neufs et réparés, utiliser un frettage additionnel sur les spires terminales, du papier isolant, une résine imprégnée sous vide et pression, et un émail des fils de bobinage résistant aux impulsions (triple couche, quadruple couche ou à couche neuve renforcée);
- garder la conception d'origine des enroulements lors du rebobinage des moteurs, car la réduction du nombre de spires entraîne une augmentation des niveaux de tension électrique entre spires.

46

Questions de choix de moteurs

La prise en compte des problèmes thermiques lors du fonctionnement des moteurs d'EFV doit être l'un des premiers facteurs à étudier pour une application réussie.

Lorsque la vitesse du moteur diminue, la capacité de refroidissement du système de ventilation du moteur décroît, de sorte que son couple à vitesse réduite devra être diminué pour éviter la surchauffe.

Outre la diminution de leur capacité de refroidissement, les moteurs sont sujets à un échauffement interne additionnel attribuable aux tensions et courants non sinusoïdaux provenant du fonctionnement de l'onduleur.

L'emploi d'un EFV pour une charge à couple variable comme un ventilateur ou une pompe centrifuge n'entraîne en général aucun problème, mais les charges à couple constant ou à puissance constante peuvent, aux vitesses réduites, provoquer une surchauffe du moteur du fait de la réduction de la circulation d'air autour du moteur.

Il est à noter que de nombreuses applications dans lesquelles un moteur c.c. a été remplacé par un moteur à induction c.a. alimenté par onduleur sont de la catégorie à couple constant ou à puissance constante.

La figure 10 montre le couple disponible des moteurs NEMA de classes A et B, compte tenu de la diminution du refroidissement durant le fonctionnement à vitesses réduites. Cette courbe peut servir comme guide pour le déclassement ou pour le choix d'un moteur convenablement surdimensionné.

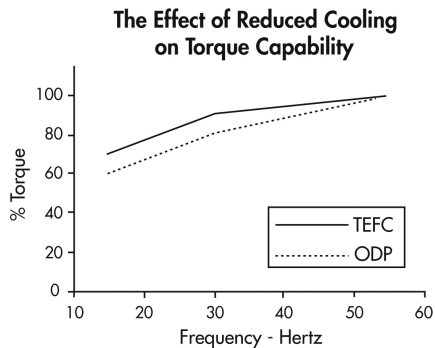


Figure 10 : Effet du refroidissement réduit sur la capacité de couple

The Effect of Reduced Cooling on Torque Capability Effet du refroidissement réduit sur la capacité de couple

4 Choix des EFV

Capability	% du couple
% Torque	Fréquence – Hertz
Frequency – Hertz	Moteur à ventilation extérieure
TEFC	Moteur abrité
ODP	

On recommande généralement d'utiliser un moteur avec un facteur de surcharge de 1,15 et une isolation de classe F afin de pouvoir supporter l'échauffement supplémentaire attribuable aux harmoniques.

L'aptitude d'un moteur à assurer efficacement son propre refroidissement diminue à mesure que sa vitesse est réduite. Le surdimensionnement du moteur ou l'installation d'un système de ventilation externe pourraient s'avérer nécessaires en cas de fonctionnement prolongé à de faibles vitesses et sous charges élevées.

48

Les “moteurs pour entraînement à vitesse variable” sont conçus pour un rendement optimisé lorsqu'ils fonctionnent avec des EFV. Ces moteurs, qui comportent en principe de meilleurs systèmes d'isolation, peuvent également être du type à ventilation forcée avec ventilateurs auxiliaires disponibles en option. Cela permet de les faire fonctionner à température moins élevée plutôt que de les surdimensionner s'ils entraînent des charges à couple élevé.

Lors de l'installation d'un onduleur PWM, il est important de vérifier les courants induits dans l'arbre des moteurs présentant des anomalies de paliers fréquentes ou anormales. Les courants induits dans l'arbre ne sont, en principe, pas problématiques pour les moteurs dont le diamètre de noyau est inférieur à 20 pouces; mais ils peuvent en devenir un en présence d'harmoniques de haute fréquence découlant de l'utilisation d'un

onduleur. Les tensions d'arbre supérieures à 0,3-0,5 volts sont parfois l'indication de problèmes éventuels et peuvent exiger la mise à la terre de l'arbre ou l'isolement du palier libre.

Questions physiques et d'environnement

Les EFV doivent être choisis de façon à ce qu'ils comportent une protection appropriée à leurs conditions d'environnement.

Les EFV sont en général logés dans une enveloppe de protection électrique avec d'autres dispositifs électriques, mais ils peuvent être aussi des éléments autonomes montés dans leur propre enveloppe.

La *National Electrical Equipment Manufacturers Association* (NEMA) a défini des types d'enveloppes normalisées destinées à la protection des équipements électriques et à la protection des personnes contre l'exposition à ces équipements dans les conditions d'environnement normalisées. Ces enveloppes sont désignés comme suit :

TYPE	ENVELOPPE NEMA
1	Utilisation générale – intérieur
2	Abrité – intérieur
3	Étanche à la poussière, à l'eau de pluie et au verglas – extérieur
3R	À l'épreuve de la pluie, résistant au verglas – extérieur
3S	Étanche à la poussière, à la pluie, à l'épreuve du verglas – extérieur
4	Étanche à l'eau, à la poussière, résistant au verglas
4X	Étanche à l'eau, à la poussière, résistant à la corrosion
5	Étanche à la poussière – intérieur
6	Submersible, étanche à l'eau, à la poussière
6P	Étanche à l'eau, submersion prolongée
7	Emplacements dangereux de classe I, groupes A, B, C ou D, antidéflagrant – intérieur

4 Choix des EFV

TYPE	ENVELOPPE NEMA
8	Emplacements dangereux de classe I, groupes A, B, C ou D, immersion dans l'huile – intérieur
9	Emplacements dangereux de classe II, groupes E, F, ou G, antidéflagrant – intérieur
10	Bureau des Mines
11	Résistant à la corrosion et abrité, immersion dans l'huile
12	À usage industriel, étanche à la poussière et aux égouttements – intérieur
12K	À usage industriel, étanche à la poussière et aux égouttements, avec alvéoles défonçables
13	Étanche à l'huile, à la poussière – intérieur

On trouvera ci-après une description plus détaillée pour les types d'enveloppes les plus couramment employés :

Type 1— Enveloppes conçues pour une utilisation en intérieur et pour assurer un degré de protection du personnel contre l'accès aux parties dangereuses et un degré de protection de l'équipement intérieur de l'enveloppe contre la pénétration de corps solides étrangers (chute de saletés).

Type 2— Enveloppes conçues pour une utilisation en intérieur et pour assurer un degré de protection du personnel contre l'accès aux parties dangereuses, assurer un degré de protection de l'équipement intérieur de l'enveloppe contre la pénétration de corps solides étrangers (chute de saletés), et assurer un degré de protection de l'équipement contre les effets préjudiciables dus à la pénétration d'eau (égouttements et éclaboussures légères).

Type 3— Enveloppes conçues pour une utilisation en intérieur ou en extérieur et pour assurer un degré de protection du personnel contre l'accès aux parties dangereuses, assurer un degré de protection de l'équipement intérieur de l'enveloppe contre la pénétration

de corps solides étrangers (chute de saletés et poussière projetée par le vent), et assurer un degré de protection de l'équipement contre les effets préjudiciables dus à la pénétration d'eau (pluie, neige fondante, neige). Elles sont conçues pour résister aux phénomènes de givrage externe sur l'enveloppe.

Type 4X— Enveloppes conçues pour une utilisation en intérieur ou en extérieur et pour assurer un degré de protection du personnel contre l'accès aux parties dangereuses, assurer un degré de protection de l'équipement intérieur de l'enveloppe contre la pénétration de corps solides étrangers (poussière projetée par le vent), assurer un degré de protection de l'équipement contre les effets préjudiciables dus à la pénétration d'eau (pluie, neige fondante, neige, éclaboussements d'eau et arrosage au jet) et assurer un niveau de protection supplémentaire contre la corrosion. Elles sont conçues pour résister aux phénomènes de givrage externe sur l'enveloppe.

Outre la protection contre la contamination et la pénétration de saleté, de poussière, d'eau, etc., les enveloppes devraient satisfaire aux limites d'utilisation ci-après dans les conditions normales d'exploitation :

1. Exposition à une température ambiante dans la gamme de -15°C à 40°C .
2. Exposition à une altitude inférieure à 3300 pieds (1000 mètres).
3. Installation sur une surface de montage rigide.
4. Installation dans des zones ou enveloppes complémentaires qui n'entravent pas véritablement le

fonctionnement du système de ventilation de l'entraînement.

Vibrations et résonance

On prend généralement pour acquis que la marche à vitesse réduite des équipements rotatifs entraîne une diminution de l'usure, favorisant ainsi un meilleur entretien. Il arrive souvent que la durée de vie d'un équipement soit prolongée grâce aux avantages que présente une vitesse variable. Toutefois, plusieurs conditions mécaniques défavorables peuvent survenir lors du fonctionnement à vitesse réduite d'un équipement.

La plupart des machines sont conçues pour fonctionner à une vitesse choisie avec une marge de sécurité calculée, et qui est inférieure à la première vitesse critique ou fréquence naturelle de l'arbre.

52

Dans certains cas, et pour faciliter la conception de l'arbre, certaines machines à haute vitesse sont conçues pour fonctionner entre la première et la deuxième vitesses critique. En réduisant la vitesse d'une machine de ce type, on pourrait entraîner son fonctionnement à la première vitesse critique.

Pour les installations de grande puissance, on devrait contacter le fabricant de la machine afin de s'assurer que les vitesses critiques sont bien connues et qu'elles sont réglables de façon appropriée.

La résolution des éventuels problèmes de vibration et de résonance implique généralement la programmation de l'EFV de façon à ce qu'il ne fasse pas fonctionner l'équipement entraîné dans la gamme des vitesses critiques.

Dans le cas où les données de conception ne peuvent être retrouvées, on devra effectuer des essais en service ou réaliser des mesures sur l'appareillage complet, puis recalculer les vitesses critiques.

5 CRITÈRES D'APPLICATION DES EFV ET ESTIMATION DES ÉCONOMIES

a. Caractéristiques de la charge entraînée et puissance nécessaire

Les caractéristiques du couple et de la puissance, par rapport à la vitesse, déterminent en partie les spécifications de l'ensemble moteur-entraînement.

$$\text{Puissance} = \frac{\text{tr/min} \times \text{couple (livre-pied)}}{5250}$$

1 cheval-vapeur (HP) = 746 watts = 0,746 kW

$$\begin{aligned} \text{Puissance (kW)} &= \frac{\text{tr/min} \times \text{couple (kg}\cdot\text{m)}}{5250} \\ &= \frac{\text{tr/min} \times \text{couple (N}\cdot\text{m)}}{9555} \\ &= \frac{\text{tr/min} \times \text{couple (livre-pied)}}{3917} \end{aligned}$$

Cette formule du couple montre que le couple est proportionnel à la puissance assignée et inversement proportionnel à la vitesse.

Les applications d'entraînements peuvent être classées par catégories selon les spécifications du couple de fonctionnement :

- Charges à couple constant;
- Charges à puissance constante;
- Charges à couple variable pour lesquelles le couple est la valeur de la force de rotation qu'exige la charge;
- Rendement des moteurs électriques et des entraînements.

Charges à couple constant

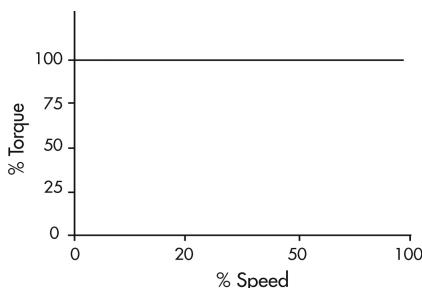


Figure 11 : Charge à couple constant

% Torque	% du couple
% Speed	% de la vitesse

Une charge à couple constant (figure 11) est une charge caractérisée par un couple qui demeure constant quelle que soit la vitesse. Il s'ensuit que la puissance nécessaire est directement proportionnelle à la vitesse de fonctionnement de l'application et varie directement avec cette vitesse. Du fait que le couple n'est pas fonction de la vitesse, il reste constant alors que la puissance et la vitesse varient proportionnellement. Parmi les exemples types de charges à couple constant, on peut citer :

- Les convoyeurs
- Les extrudeuses

- Les mélangeurs
- Les pompes et compresseurs volumétriques.

Parmi les avantages que présentent les EFV dans les applications à couple constant, mentionnons le contrôle précis de la vitesse et le démarrage et l'arrêt avec accélération/décélération contrôlées.

Pour les charges à couple constant, la gamme de vitesses est en général de 10:1. Ces applications engendrent généralement des économies d'énergie modérées aux faibles vitesses.

Charges à puissance constante

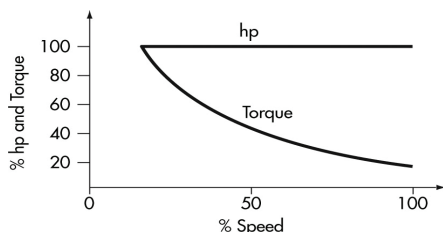


Figure 12 : Charge à puissance constante

% hp and Torque	% de la puissance et du couple
hp	Puissance (HP)
Torque	Couple
% Speed	% de la vitesse

Le deuxième type de caractéristiques de charge est la puissance constante (figure 12). Dans ces applications, le couple varie inversement avec la vitesse. À mesure que le couple augmente, la vitesse doit décroître pour maintenir une puissance constante de la charge. La relation peut alors s'écrire :

Puissance = vitesse x couple x constante

Des exemples de machine présentant ce type de charge seraient les tours, les fraiseuses ou les perceuses qui tournent à faible vitesse pour de lourds travaux, et à vitesse réduite pour des travaux légers.

Habituellement, ces applications ne permettent aucune économie d'énergie à basse vitesse

Charges à couple variable

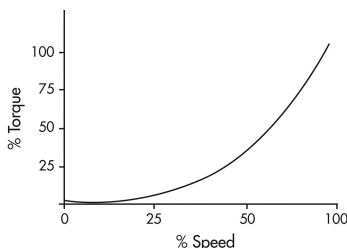


Figure 13 : Charge à couple variable

% Torque	% du couple
% Speed	% de la vitesse

Le troisième type de caractéristiques de charge est la charge à couple variable (figure 13). Des exemples en sont les ventilateurs, soufflantes et pompes centrifuges. L'emploi d'un EFV avec une charge à couple variable peut rapporter des économies d'énergie substantielles.

Dans ces applications :

- Le couple varie directement avec le carré de la vitesse;

- La puissance varie directement avec le cube de la vitesse.

Cela signifie que, à *mi-vitesse*, la puissance requise est d'environ *un huitième du maximum nominal*.

L'étranglement d'un système au moyen de registres et de vanes de régulation constitue une méthode de contrôle peu efficace, car le dispositif d'étranglement dissipe de l'énergie qui avait été communiquée au fluide. Un entraînement à fréquence variable réduit simplement l'énergie totale dans le système lorsqu'elle n'est pas nécessaire.

- Outre ses possibilités notables en matière d'économies d'énergie, un entraînement permet aussi d'exercer un meilleur contrôle sur le procédé, ce qui rehausse souvent la qualité du produit et diminue les pertes.
- Pour les charges à couple variable, la gamme de vitesses est en général de 3:1.

Rendements des moteurs et des entraînements

Le rendement à pleine charge des moteurs électriques c.a. va de 80 % pour les moteurs les plus petits, à plus de 95 % pour les moteurs de puissance supérieure à 100 HP. Le rendement d'un moteur électrique diminue considérablement si sa charge est inférieure à 40 %. Une bonne pratique d'ingénierie consiste à dimensionner les moteurs de façon à ce que leur fonctionnement à pleine charge corresponde à 75 % de la puissance assignée du moteur. La figure 14 illustre une courbe type de rendement d'un moteur en fonction de la charge.

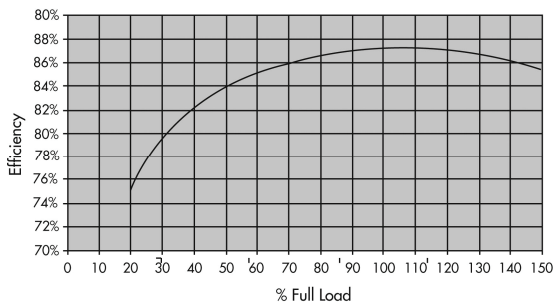


Figure 14 : Rendement type d'un moteur à induction de 10 HP à rendement normal en fonction de la charge

Efficiency	Rendement
% Full Load	% de la pleine charge

Le rendement d'un ensemble moteur électrique-entraînement est égal au rapport de la puissance mécanique délivrée, à la puissance électrique absorbée, et s'exprime le plus souvent comme un pourcentage.

60

$$\text{Rendement du système moteur} = \frac{\text{Sortie}_{\text{mécanique}}}{\text{Entrée}_{\text{électrique}}} \times 100 \%$$

Le rendement d'un entraînement EFV est très bon et atteint 97 % ou plus à pleine charge. Aux charges réduites, le rendement diminue. Les EFV de puissance supérieure à 10 HP ont en principe des rendements dépassant 90 % pour des charges supérieures à 25 % de la pleine charge. C'est là la gamme d'exploitation intéressante pour les applications pratiques.

Le tableau ci-après montre le rendement des EFV types pour différentes charges.

Rendement des EFV PWM en fonction de la puissance assignée de l'EFV					
Puissance assignée de l'EFV	Rendement en %				
	Charge en pourcentage de la puissance de sortie assignée de l'entraînement				
	12,5	25	50	75	100
1	0,48	0,74	0,84	0,87	0,89
5	0,80	0,88	0,92	0,94	0,95
10	0,83	0,90	0,94	0,95	0,96
25	0,88	0,93	0,95	0,96	0,97
50	0,86	0,92	0,95	0,96	0,96
75	0,86	0,94	0,97	0,97	0,97
100	0,89	0,94	0,96	0,96	0,97
200	0,91	0,95	0,96	0,97	0,97

Tableau provenant du Programme des technologies industrielles du ministère américain de l'énergie – Liste de conseils n° 12 pour les moteurs : *Employez le rendement à charge partielle des entraînements à vitesse variable pour déterminer les économies d'énergie* (version préliminaire 2005)

Le rendement du système est inférieur au produit du rendement du moteur par le rendement de l'EFV en raison de la variation du rendement du moteur avec la charge et à cause de l'effet des harmoniques sur le moteur.

Il est malheureusement presque impossible de savoir quel sera le rendement de l'ensemble moteur-entraînement; mais du fait que la puissance absorbée par un système à couple variable décroît de façon aussi notable avec la vitesse, une estimation des rendements du système devrait être suffisante.

Pour le calcul de la consommation d'énergie d'un système moteur-entraînement, on pourra employer un rendement estimé du système de l'ordre de 80 à 90 % pour les moteurs d'une puissance de 10 HP et plus avec des charges égales ou supérieures à 25 %.

De façon générale, les gammes de rendement les plus faibles correspondent aux moteurs de petite puissance et faibles charges, alors que les gammes de rendement les plus élevées correspondent aux moteurs et charges plus importants.

b. Comparaison avec les méthodes de contrôle conventionnelles

Estimation des économies d'énergie

Les ventilateurs et les pompes sont en principe conçus pour satisfaire la demande maximale du système dans lequel ils sont installés.

Assez souvent toutefois, la demande réelle risque de varier et d'être très inférieure à la puissance prévue. L'adaptation à ces conditions s'obtient en installant des registres de refoulement pour les ventilateurs et de vannes de régulation par étranglement pour les pompes.

Bien que simples et efficaces, ces moyens de contrôle altèrent gravement le rendement d'un système.

L'emploi d'un EFV pour commander un ventilateur ou une pompe est un moyen du contrôle du débit plus efficace que de simples vannes de régulation ou registres d'aspiration ou de refoulement. La puissance absorbée par les ventilateurs et les pompes varie comme le cube de la vitesse, ce qui fait que des variations de vitesse qui peuvent sembler petites peuvent avoir une forte incidence sur la puissance absorbée par la charge. Le tableau ci-dessous montre quelle est la puissance absorbée par un ventilateur ou une pompe à mesure que la vitesse diminue.

Vitesse du ventilateur/ de la pompe	Puissance mécanique nécessaire
100 %	100 %
90 %	73 %
75 %	42 %
50 %	13 %

Puissance nécessaire à un ventilateur/
une pompe en fonction de la vitesse

Outre son potentiel notable en matière d'économies d'énergie, un entraînement possède des propriétés inhérentes de correction du facteur de puissance, permet d'exercer un meilleur contrôle sur le procédé et assure la protection du moteur.

L'application la plus courante est le ventilateur centrifuge ou la pompe centrifuge qui confère l'énergie au fluide actif par force centrifuge. Il en résulte une augmentation de la pression et la production d'un débit d'air à la sortie du ventilateur, ou d'un débit de liquide à la sortie d'une pompe.

La figure 15 présente un exemple de courbe de pression de sortie en fonction du débit d'un ventilateur centrifuge classique pour une vitesse donnée.

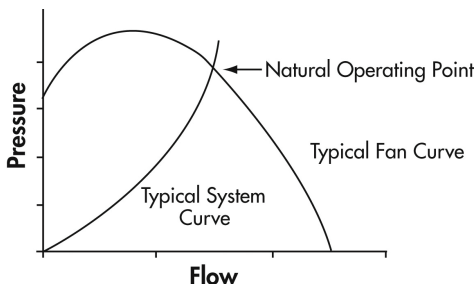


Figure 15 : Courbe de la pression de sortie en fonction du débit d'air

Pressure	Pression
Natural Operating Point	Point de fonctionnement naturel
Typical Fan Curve	Courbe de ventilateur type
Typical System Curve	Courbe de système type
Flow	Débit

Les courbes classiques des ventilateurs et pompes se composent en général d'une série de courbes établies pour différentes valeurs de vitesses, rendements et puissances nécessaires. Ces courbes aident à choisir le ventilateur ou la pompe les mieux adaptés pour une application donnée. Elles se révèlent également nécessaires pour prévoir le fonctionnement et les autres paramètres en cas de changement du mode d'utilisation.

Dans la figure 15, on a superposé une courbe de système à la courbe du ventilateur. La courbe du système ne dépend pas du ventilateur, mais c'est la courbe représentant les besoins du système dans lequel le ventilateur est employé.

Elle montre la quantité de pression que le ventilateur doit fournir pour vaincre les pertes du système et engendrer un débit d'air donné.

La courbe du ventilateur est le tracé des caractéristiques du ventilateur, indépendamment du système. La courbe du système est le tracé des besoins de la "charge" indépendamment du ventilateur. L'intersection de ces deux courbes représente le point de fonctionnement naturel. Il correspond à la pression et au débit réels que l'on retrouvera à la sortie du ventilateur durant le fonctionnement du système. En l'absence d'influences externes, le ventilateur fonctionnera exclusivement à ce point.

Beaucoup de systèmes doivent cependant fonctionner à de nombreux points différents. La figure 16 illustre un profil des variations types de débit que l'on retrouve dans un système courant. La façon dont ces variations sont produites et contrôlées aura un effet direct sur les économies d'énergie.

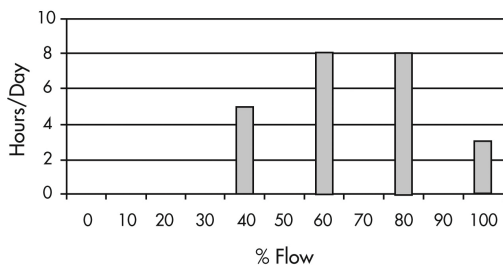


Figure 16 : Variations du débit

Hours/Day	Heures par jour
% Flow	% du débit

Différentes méthodes permettent de moduler ou de faire varier le débit d'un système afin d'atteindre les points de fonctionnement optimaux. Parmi ces méthodes, on citera :

- Les registres de refoulement sur les ventilateurs et les vannes de régulation sur les pompes;
- Les registres d'aspiration ou aubes directrices sur les ventilateurs
- Le contrôle par entraînement EFV

Chacune de ces méthodes a un effet sur la courbe du système ou sur celle du ventilateur, qui permet d'obtenir un point de fonctionnement naturel différent. Ce faisant, elles peuvent également entraîner des changements dans le rendement du ventilateur et dans les besoins en puissance.

Positions des registres de refoulement et des vannes de régulation par étranglement

Les registres de refoulement d'un système de ventilateur et les vannes de régulation d'un système de pompe ont un effet sur la courbe du système du fait de l'accroissement de la résistance à l'écoulement que provoque leur action d'étranglement.

La courbe du système est une fonction simple qui peut s'exprimer par la formule $P = K \times (\text{débit})^2$ dans laquelle : P est la pression nécessaire pour créer dans le système un débit donné; K dépend du système et représente la résistance due au frottement de l'air. Les ailettes des registres de refoulement altèrent le terme K de la formule.

La figure 17 présente différentes courbes de résistance du système correspondant à diverses positions d'étranglement.

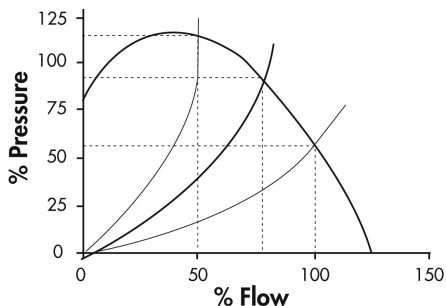


Figure 17 : Pression en fonction du débit

% Pressure	% de la pression
% Flow	% du débit

La figure 18 présente une courbe de la puissance nécessaire pour un fonctionnement de ce type. À partir de cette courbe, on peut constater que la puissance diminue progressivement avec le débit. À un débit de 50 %, la puissance nécessaire est de 80 %.

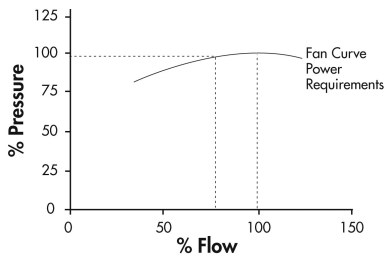


Figure 18 : Courbe de la pression en fonction du débit

Fan Curve Power Requirements	Puissance nécessaire selon la courbe du ventilateur
------------------------------	---

Vannes d'entrée modulantes

Dans cette méthode, on modifie la courbe du ventilateur de façon à ce qu'elle coupe la courbe du système en un point différent.

Il n'existe pas d'équivalence dans les systèmes de pompes, car les vannes de régulation par étranglement ne sont jamais installées du côté aspiration d'une pompe.

La figure 19 montre diverses courbes de systèmes correspondant à différentes positions d'étranglement.

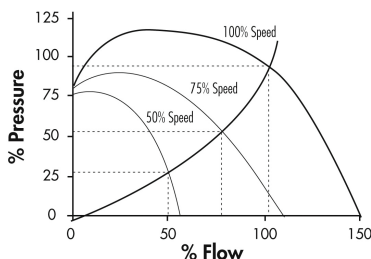


Figure 19 : Pression d'un ventilateur en fonction du réglage des vannes modulantes d'aspiration

% Pressure	% de la
100 % Speed	pression
75 % Speed	Vitesse 100 %
50 % Speed	Vitesse 75 %
% Flow	Vitesse 50 %
	% du débit

La figure 20 montre qu'avec cette méthode, la puissance nécessaire diminue de façon plus marquée que dans la méthode avec étranglement au refoulement. À un débit de 50 %, la puissance nécessaire n'est que de 60 %.

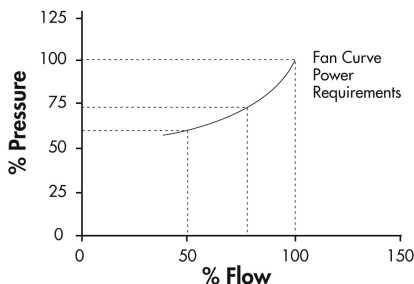


Figure 20 : Courbe de pression d'un ventilateur et du réglage des vannes modulantes d'aspiration

% Pressure	% de la pression
% Flow	% du débit
Fan Curve Power Requirements	Puissance nécessaire selon la courbe du ventilateur

Entraînements à fréquence variable

Dans cette méthode, on tire parti du changement qui se produit dans la courbe du ventilateur ou de la pompe lorsque la vitesse de la machine est modifiée.

Il est possible d'évaluer ces modifications à l'aide d'un ensemble de formules (ci-après) appelées lois de similitude :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2} \quad \frac{HP_1}{HP_2} = \frac{(N_1)^3}{(N_2)^3}$$

avec : N = vitesse
 Q = débit
 P = pression
 HP = puissance

Note : lorsque l'on combine les lois de débit et de pression, le résultat est une formule qui correspond à la formule de la courbe du système :

Courbe de pression du système $P = K \times (N)^2$.

Lorsque sa vitesse est modifiée, la machine va donc suivre la courbe du système.

La figure 21 est une représentation de la méthode du réglage de la vitesse.

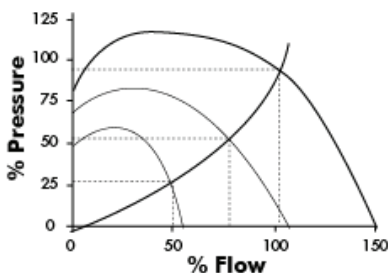


Figure 21 : Méthode du réglage de la vitesse

La figure 22 illustre l'importante diminution de puissance que cette méthode permet d'atteindre. La formule de la puissance théorique en vertu des lois de similitude fait ressortir l'effet de fonctions d'élévation au cube.

L'expérience a montré cependant que la puissance nécessaire réelle était voisine d'une fonction d'élévation au carré en raison des effets réels du système (comme la contre-pression statique ou hauteur géométrique de charge) et le frottement, de sorte que la loi de similitude pour la plupart des applications pratiques est alors :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2} \quad \frac{HP_1}{HP_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2}$$

avec : N = vitesse
 Q = débit
 P = pression
 HP = puissance

Dans la plupart des applications qu'il aura à étudier, un utilisateur devra employer l'approximation de la loi des carrés. Seuls les ventilateurs avec peu ou pas de pression statique, comme par exemple les ventilateurs d'une tour de refroidissement et les ventilateurs de toit avec dôme, ou les pompes sans hauteur géométrique de charge, comme les pompes de refoulement, vont suivre approximativement une fonction d'élévation au cube.

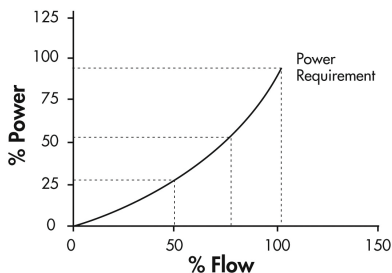


Figure 22 : Approximation par la loi des carrés

% Pressure	% de la pression
% Flow	% du débit
Power Requirements	Puissance nécessaire

La méthode de la vitesse réglable permet de contrôler le débit d'une façon qui correspond de près à la courbe du système ou

de la charge. À un débit de 50 %, la puissance nécessaire n'est que de 25 %.

Le ventilateur ou la pompe peuvent ainsi créer les résultats souhaités avec le minimum de puissance consommée.

Les deux autres méthodes modifient certains paramètres du système, ce qui se traduit généralement par une diminution du rendement de la machine. C'est pour cette raison que, dans ces méthodes, la puissance appelée est supérieure à celle de la méthode de la vitesse réglable.

Calcul des économies d'énergie

Il convient à présent d'estimer la consommation d'énergie puis de comparer cette consommation pour chacune des méthodes en vue de déterminer les économies d'énergie possibles.

72

Pour cet exemple, nous avons choisi un ventilateur fonctionnant à 300 tr/min et produisant un débit nominal (100 %) de 2 500 m³/min, avec une puissance de 25 kW sur l'arbre du moteur. Pour les pompes, le calcul devra être effectué de façon similaire, mais avec la courbe de pompe appropriée.

Le ventilateur va fonctionner pendant 8 000 heures par an. Sans méthode de contrôle, la dépense annuelle d'énergie à un coût de 0,10 \$/kWh s'élèvera à :

$$(25 \text{ kW}) (8\,000 \text{ h}) (0,10 \text{ \$/kWh}) = 20\,000 \text{ \$/an}$$

Pour déterminer les économies éventuelles d'une méthode de contrôle, on doit d'abord établir un profil de la charge. Dans le cas de cet exemple, le profil de charge suivant a été déterminé :

Débit	Facteur de marche
100 %	20 %
75 %	40 %
50 %	40 %

Puissance nécessaire

On peut, pour chaque point de fonctionnement, obtenir la valeur de la puissance nécessaire à partir de la courbe du ventilateur (en employant les courbes données précédemment pour chaque méthode de contrôle).

Cette puissance est alors multipliée par le pourcentage de temps pendant lequel le ventilateur fonctionne en ce point. On fait ensuite la somme de ces calculs afin d'obtenir une "puissance pondérée" qui représente la consommation moyenne en énergie du ventilateur.

À partir de la courbe avec registre de refoulement (figure 17), les calculs de la puissance pondérée pour la méthode des registres de refoulement s'établissent comme suit :

% du débit	Facteur de marche en %	Puissance nécessaire (kW)	Puissance pondérée (kW)
100	20	25 (1,00) = 25,0	25,0 (0,2) = 5,0
75	40	25 (0,96) = 24,0	24,0 (0,4) = 9,6
50	40	25 (0,88) = 22,0	22,0 (0,4) = 8,8
Puissance annuelle moyenne			23,4 kW

Les calculs de la puissance pondérée pour la méthode des vannes d'entrée modulantes (figure 20) s'établissent comme suit :

5 Critères d'application des EFV et estimation des économies

% du débit	Facteur de marche en %	Puissance nécessaire (kW)	Puissance pondérée (kW)
100	20	25 (1,00) = 25,0	25,0 (0,2) = 5,0
75	40	25 (0,73) = 18,3	18,3 (0,4) = 9,6
50	40	25 (0,60) = 15,0	15,0 (0,4) = 6,0
Puissance annuelle moyenne			20,6 kW

Les calculs de la puissance pondérée pour la méthode de l'entraînement EFV (figure 18) s'établissent comme suit :

% du débit	Facteur de marche en %	Puissance nécessaire (kW)	Puissance pondérée (kW)
100	20	25 (1,00) = 25,0	25,0 (0,2) = 5,0
75	40	25 (0,55) = 13,8	18,3 (0,4) = 5,5
50	40	25 (0,25) = 6,3	15,0 (0,4) = 2,5
Puissance annuelle moyenne			13,0 kW

Le coût annuel de fonctionnement pour les trois méthodes de contrôle est le suivant :

Registres de refoulement : 23,4 kW x \$0,10/kWh x 8000 heures = 18 720 \$

Registres d'aspiration : 20,6 kW x \$0,10/kWh x 8000 heures = 16 480 \$

Contrôle par EFV : 13,0 kW x \$0,10/kWh x 8000 heures = 10 400 \$

Les économies de ces méthodes de contrôle sont alors les suivantes :

Méthode de contrôle	Coût de fonctionnement annuel	Économies annuelles
Aucun	20 000 \$	0
Registres de refoulement	18 720 \$	1 280 \$
Registres d'aspiration	16 480 \$	3 520 \$
Contrôle par EFV	10 400 \$	9 600 \$

Dans les calculs qui précèdent, nous avons utilisé un simple coût "mixte" pour l'électricité. La façon dont votre distributeur

d'énergie vous facture l'électricité dépend de plusieurs facteurs dont notamment la demande, l'énergie, la durée d'utilisation et certains autres facteurs. Communiquez avec le représentant de votre distributeur d'électricité local pour obtenir plus de détails sur la façon de calculer votre coût de l'électricité.

Logiciels d'économies des EFV

Des logiciels sont proposés par plusieurs fabricants et fournisseurs d'EFV, et parfois par des entreprises d'électricité locales, et également des organismes gouvernementaux.

Ce type de ressource se révélera fort utile pour l'estimation des économies d'énergie et pour étudier les différentes options de contrôle disponibles. Plusieurs de ces logiciels permettent d'entrer les caractéristiques complètes d'un système, si elles sont accessibles, et de réaliser ainsi une analyse encore plus précise.

Chaque logiciel source suppose une compréhension de base de la technologie des EFV et une connaissance approfondie de l'application envisagée.

c. Surveillance et vérification

Avant la mise en œuvre du projet, il importe d'établir un plan de mesures et vérifications (M&V) pour plusieurs raisons dont notamment :

1. Établir la preuve que les économies estimées peuvent être atteintes.

2. Satisfaire aux exigences concernant les initiatives d'incitation à la conservation de l'énergie et à la gestion de la demande.
3. Obtenir l'appui pour de futurs projets par la concrétisation du succès.

Les économies d'énergie se déterminent par la comparaison de la consommation d'énergie avant la mise en œuvre du projet (scénario de référence) avec la consommation après la mise en place des mesures de conservation de l'énergie (après réalisation du projet).

Pour une détermination adéquate des économies d'énergie, on devra tenir compte des changements altérant la consommation, mais qui ne découlent pas des mesures de conservation. Les corrections vont varier selon l'application et comprendront des facteurs tels que les conditions météorologiques, le produit et les périodes d'utilisation propres au scénario de référence d'une part, et à la période après installation des mesures de conservation d'autre part.

De façon générale, les activités de mesures et vérifications (M&V) se succèdent selon les étapes suivantes :

1. Définir les conditions de référence avant installation, incluant notamment :
 - a) Les équipements et systèmes
 - b) La consommation d'énergie de référence (et le coût)
 - c) Les facteurs influant sur la consommation d'énergie de référence.

Les conditions de référence peuvent être définies par des examens sur place, des mesures ponctuelles, à

court terme ou à long terme, et/ou des analyses des données de facturation.

2. Définir la situation après réalisation du projet, y compris :
 - a) Les équipements et systèmes
 - b) La consommation d'énergie après réalisation du projet (et le coût)
 - c) Les facteurs influant sur la consommation d'énergie après réalisation du projet.
3. Faire appel, pour les évaluations après réalisation du projet, à des examens sur place, à des mesures ponctuelles, à court terme ou à long terme, et/ou à des analyses des données de facturation.
4. Procéder aux activités (M&V) de façon suivie afin de vérifier le fonctionnement des équipements et des systèmes installés, déterminer les économies de l'année courante, et estimer les économies pour les années à venir.

Note : l'adjonction d'un EFV fait souvent partie de la modernisation d'un équipement.

Ceci peut avoir une incidence sur le débit du procédé ou les activités connexes. Il est important que la consommation d'énergie après réalisation du projet soit uniformément corrigée de façon à correspondre aux conditions de fonctionnement qui prévalaient avant l'installation.

Le processus de mesures et vérifications peut s'avérer assez complexe et la réussite du projet EFV en cours (ou des futurs projets en efficacité énergétique) peut tenir à un processus de mesures et vérifications précis et détaillé. Ce processus doit être inclus dans les coûts du projet. Afin d'assurer que les mesures

soient faites de façon correcte, on recommande de confier cette tâche à un spécialiste chevronné. Les coûts associés aux mesures et vérifications peuvent en principe être récupérés sur des programmes d'incitation en vigueur.

Le Guide de mesure des économies d'énergie publié par CEATI International fournit des détails sur le processus d'exécution des mesures et vérifications d'un projet.

d. Rendement du système

Le rendement d'un système se définit comme le rapport entre nombre d'unités de produit fabriquées par le système et l'énergie électrique consommée par ce dernier. Pour déterminer la différence, soustraire le rendement de l'ancien système de celui du nouveau.

78

Si le résultat est négatif, cela signifie que le rendement a diminué depuis l'optimisation du système. Le résultat devrait toujours être positif.

e. Rendement électrique

L'amélioration de l'efficacité électrique peut être déterminée en comparant la consommation électrique mesurée pour le scénario de référence avec l'utilisation d'énergie électrique déterminée lors des mesures d'évaluation du projet.

$$\text{Amélioration du rendement} = \text{Rendement après projet} - \text{Rendement de référence}$$

f. Coût par unité de produit

Ce calcul intègre les données de facturation afin de pouvoir quantifier l'optimisation en dollars. À l'aide de la formule présentée dans le cas de référence, utiliser les données de mesures après réalisation du projet.

$$\begin{aligned} & \text{[Frais liés à la demande pour le moteur +} \\ & \quad \text{(kWh OP x tarif OP + kWh FP x tarif FP)]} \\ & \text{Divisé par : nombre d'unités produites quotidiennement} \\ \text{Tarif OP} &= \text{coût par kWh de consommation aux heures de} \\ & \quad \text{pointe} \\ \text{Tarif FP} &= \text{coût par kWh de consommation aux heures} \\ & \quad \text{creuses} \end{aligned}$$

Pour comparer avec le cas de référence, soustraire le chiffre correspondant à ce dernier du chiffre après optimisation. Si le résultat est négatif, le coût par unité de produit a alors augmenté. Le résultat devrait toujours être positif.

g. Fiabilité et entretien

Les dispositifs électroniques à semi-conducteurs des EFV ne nécessitent pratiquement aucun entretien.

La plupart des fabricants d'entraînements munissent leurs appareils de systèmes de diagnostic intégrés, ainsi que de relais et fusibles de protection.

Lorsqu'un entretien est nécessaire, il est préférable de faire appel à du personnel expérimenté pour la recherche des pannes et la réparation de l'entraînement.

L'entretien courant pourra comprendre le nettoyage et/ou le remplacement des filtres lorsque cette activité est ajoutée aux activités d'entretien électrique normales comme le nettoyage et l'inspection sur une base régulière.

Lors de la réparation de moteurs fonctionnant avec des EFV, si un rebobinage est nécessaire, l'atelier de réparation devra utiliser du fil de bobinage pour "moteur pour entraînement à vitesse variable". Par ailleurs, on devra éviter de réduire le nombre de spires dans les groupes de bobines, car cela provoquerait une augmentation de la contrainte électrique par spire dans l'enroulement.

Si le moteur a subi une défaillance suite à une surchauffe, on devra déterminer si le système de refroidissement de ce moteur est suffisant. Deux solutions sont envisageables : l'installation d'un ventilateur de refroidissement extérieur ou le surdimensionnement du moteur.

Votre fournisseur d'entraînements ou votre atelier de réparation sera en mesure de vous fournir l'assistance voulue pour tout problème d'entretien.

6 ÉTUDES DE CAS

a. Étude de cas : remplacement d'un entraînement à courants de Foucault par un EFV

Profil de la compagnie

La compagnie est une usine de 100 000 pieds carrés qui, chaque mois, produit environ 1 million de pieds linéaires de tubes en acier inoxydable. Ses clients font affaire avec le secteur de l'automobile et les industries de l'alimentation, pharmaceutiques et pétrochimiques.

Vue d'ensemble du projet

Le processus de production consiste à commander l'étirage de tubes d'acier inoxydable à travers des filières pour en réduire le diamètre et/ou l'épaisseur des parois. Ce processus d'étirage s'effectue sur un banc à étirer.

Chaque tube est généralement soumis à plusieurs passes d'ébauche qui lui donnent rapidement une forme voisine de ses dimensions finales. Le tube subit ensuite quelques passes finales de "finition" qui l'amènent à la dimension exacte recherchée. Le banc à étirer qui traite les passes d'ébauche fonctionne 24 heures par jour durant 5 jours par semaine, et effectue environ 1200 passes d'étirage par jour.

Le banc à étirer était entraîné par un moteur de 150 HP tournant à 1 800 tr/min. Ce moteur était couplé à un réducteur

de vitesses par l'intermédiaire d'un embrayage à courants de Foucault dont l'inefficacité est connue, bien que la technologie soit très fiable.

Approche

À partir des données recueillies par le service d'ingénierie de l'usine, l'équipe de mise en œuvre a procédé à l'analyse du système actuel. Cette analyse incluait l'observation du fonctionnement d'autres équipements comparables et le relevé des paramètres de fonctionnement similaires qui pourraient être appliqués au banc d'étirage.

En raison du grand nombre de diamètres de tubes, épaisseurs de parois, matériaux employés et commandes reçues chaque semaine, il n'existe pas de produit représentatif en particulier. Afin de recueillir des données représentatives de l'exploitation réelle, l'équipe du projet a choisi des commandes au hasard, puis a réalisé une analyse détaillée des étapes intermédiaires que subissait le tube. L'équipe a alors comparé la puissance nécessaire mesurée par le service d'ingénierie de l'usine dans l'étude du cas de référence aux besoins en puissance mesurés pour le système.

Mise en œuvre du projet

Un entraînement EFV avec options de commande vectorielle a été choisi, car il peut surveiller en continu le courant, la tension et la position angulaire des moteurs c.a. à induction. Avant la mise au point des dispositifs de commande vectorielle, seuls les moteurs c.c. – moins fiables et exigeant plus d'entretien que leurs équivalents c.a. – pouvaient être employés dans les applications demandant un contrôle précis du couple et de la

vitesse. Les options de commande vectorielle sont désormais un caractère standard des EFV.

Afin de réaliser les objectifs du projet, l'équipe de mise en œuvre a remplacé le démarreur magnétique et l'embrayage à courants de Foucault par un entraînement EFV à commande vectorielle et une inductance de ligne. Cette inductance avait pour but de satisfaire une exigence du système : éviter les problèmes d'harmoniques sur le réseau de distribution. L'ingénieur d'usine désirait en outre augmenter le couple délivré au banc d'étirage, améliorer le rendement général de l'entraînement, et réduire la consommation d'énergie; le moteur de 150 HP, 1800 tr/min, à rendement normal a alors été remplacé par un moteur de 200 HP, 1200 tr/min à haut rendement. Le moteur à plus faible vitesse a été choisi, car il fournit un couple plus important que le moteur à vitesse plus élevée.

Résultats

À la suite des changements mis en place par l'équipe du projet, le banc d'étirage demande maintenant moins d'énergie pour étirer un tube, et ce même si la puissance du moteur a été portée de 150 HP à 200 HP. Pour un étirage type, le système à embrayage à courants de Foucault nécessitait 190 HP pour étirer le tube, alors que l'entraînement EFV à meilleur rendement exige moins de 90 HP. Le temps total de fonctionnement annuel prévu a également été réduit de 623 heures grâce aux modifications, du fait que la puissance plus élevée disponible permet de réduire la plupart des tubes à la dimension voulue, avec un nombre moins élevé de passes d'étirage.

6 Études de cas

Les modifications ont aidé à réduire la consommation annuelle totale du banc d'étirage qui est passée de 439 065 kWh à 290 218 kWh, ce qui a entraîné une diminution de la facture d'électricité annuelle totale de 34 pour cent par rapport au coût du cas de référence de 20 812 \$.

Les changements permettront également une économie évaluée à 2 762 heures de travail par an. D'après les estimations du personnel, une passe d'étirage a été éliminée sur la moitié des commandes exécutées. Une économie de temps est non seulement réalisée par le nombre réduit de passes d'étirage nécessaires pour "l'ébauche" d'un tube, mais également sur les autres opérations qu'exige le processus d'étirage, comme le dégraissage, la coupe, le rétreint et le recuit. En supposant un salaire horaire de 8,50 \$ l'heure, le montant des réductions de main-d'œuvre s'élève à 23 473 \$ par an. La réduction du nombre de passes d'étirage nécessaires a en outre amené des économies d'acier inoxydable estimées à 41 322 \$, car un nombre de passes plus faible entraîne moins de coupe des extrémités rétreintes (gaspillées) après chaque passe. En ajoutant les autres économies directes de 5 415 \$, les économies annuelles totales s'élèvent à 77 266 \$. Si on les compare aux 34 000 \$ de coût du projet, la période de récupération simple est d'environ 6 mois.

Économies d'énergie et de coûts

Coûts de mise en œuvre du projet	34 000 \$
Économies annuelles de coûts d'énergie	7 056 \$
Économies annuelles de coûts autres que l'énergie (main-d'œuvre et déchets)	70 210 \$
Récupération simple (années)	1/2
Économies sur la demande (kW)	189
Économies annuelles d'énergie (kWh)	148 847

b. Étude de cas : remplacement des commandes de registres par des EFV dans un système CVCA

Profil de la compagnie

Dans une petite usine de transformation de textiles traitant des fibres écruées, on voulait améliorer le rendement du système CVCA de l'usine. La compagnie s'est attachée les services d'un spécialiste en EFV afin de moderniser 15 des moteurs de ventilateurs du système par des entraînements à fréquence variable (EFV). L'usine fonctionnant 24 heures par jour et 7 jours par semaine, le système CVCA pourrait devenir plus économique et procurer aux travailleurs un meilleur conditionnement des locaux et une meilleure qualité de l'air.

Vue d'ensemble du projet

Le système de ventilation compte neuf ventilateurs de soufflage et neuf ventilateurs d'extraction qui permettent de contrôler et de maintenir des conditions d'ambiance adéquates, de refroidir les machines de transformation et d'assurer aux travailleurs une

qualité d'air adéquate. Dans un premier temps, quatre laveurs d'air assurent le dépoussiérage, le refroidissement et le réglage du degré d'humidité d'un mélange d'air de reprise et d'air frais. Cet air est alors délivré dans l'installation par les neuf ventilateurs de soufflage et distribué à travers l'usine par des gaines et des diffuseurs montés au plafond. Neuf ventilateurs de retour extraient l'air de la zone de transformation et le refoulent dans un réseau de gaines. Les particules en suspension sont éliminées par filtrage à l'entrée de chacun des ventilateurs d'extraction.

Les facteurs qui agissent sur la pression, le volume ou la résistance du système ont un effet direct sur la puissance nécessaire aux ventilateurs. Par conséquent, tous les éléments tels que la densité de l'air, les variations de position des registres, la pression du système et les pertes de charge dans les filtres à air, l'interaction entre les systèmes d'aspiration et de refoulement d'air, ainsi que le fonctionnement en parallèle des ventilateurs, ont une incidence sur la puissance devant être fournie aux ventilateurs; ils doivent donc être surveillés afin d'assurer un fonctionnement efficace du système. Les aubes directrices à incidence variable et les registres de refoulement assuraient jusque là le contrôle du débit d'air dans le système, mais leur rendement était très médiocre. Le réglage de ces dispositifs était très imprécis et leur réinitialisation ne pouvait être faite que manuellement.

Approche

Afin de déterminer de quelle façon il était possible d'améliorer le rendement du système de ventilation, la compagnie et l'expert en EFV ont recueilli les données relatives au système de référence pendant deux semaines en vue de mesurer le

rendement du système existant. La puissance des moteurs a été enregistrée électroniquement, les positions des registres ont été relevées manuellement par inspection visuelle de leurs accouplements, et la puissance absorbée a été mesurée sur chaque ventilateur à intervalles de dix minutes. Ces données ont été analysées et l'équipe du projet a alors établi un cycle de charge visant à calculer la demande en énergie, les heures de fonctionnement (périodes d'heures de pointe et d'heures creuses) et la consommation d'énergie annuelle pendant cette période, tant pour les ventilateurs d'extraction que pour les ventilateurs de soufflage. Ces données ont été ultérieurement comparées aux données du nouveau système, recueillies après son installation.

Mise en œuvre du projet

Après avoir déterminé que les ventilateurs du système étaient nettement surdimensionnés, l'équipe du projet a entrepris la modernisation avec des EFV de 15 des 18 ventilateurs. Les trois autres ventilateurs fonctionnent en continu à leur plein débit et des EFV ne leur sont pas nécessaires. Un système de mesure de la puissance et de l'énergie a été installé sur chaque EFV pour recueillir les données de charge du nouvel ensemble. Le système de mesure enregistre la vitesse et la puissance consommée de chaque ventilateur à des intervalles de 15 minutes avec production de rapports d'analyse des économies. Après installation des EFV, la commande des volets n'était plus nécessaire, ce qui fait que les volets de commande des ventilateurs ont été laissés en mode totalement ouvert.

Résultats

La demande totale d'électricité du système de ventilation qui était d'environ 322 kW a été réduite à 133 kW grâce à l'instal-

lation des EFV, soit une réduction de l'ordre de 59 pour cent. La consommation d'énergie annuelle totale des ventilateurs a elle aussi diminué de 59 pour cent, passant de 2 700 000 kWh environ à 1 100 000 kWh. Les gains en efficacité énergétique ont été rendus possibles du fait que les EFV ont permis au personnel de l'usine d'ouvrir totalement les registres de commande des ventilateurs dont la vitesse a été diminuée. La conséquence a été une baisse importante de la consommation d'énergie, ce qui a permis au système de fonctionner de façon plus efficace. Ces économies d'énergie se sont traduites par des économies annuelles des coûts d'énergie de l'ordre de 101 000 \$. Le projet a coûté 130 000 \$ et comprenait :

- Le coût de l'étude de faisabilité
- Les coûts en capital
- Les coûts d'installation
- L'ingénierie
- Les activités de mesures et vérifications (M&V)

La période de récupération simple du coût du projet était d'environ 1,3 années.

Économies d'énergie et de coûts

Coûts de mise en œuvre du projet	130 000 \$
Économies annuelles de coûts d'énergie	101 000 \$
Récupération simple (années)	1,3
Économies sur la demande (kW)	189
Économies annuelles d'énergie (kWh)	1 579 400

c. Étude de cas : remplacement des commandes de pompes à vide par un EFV dans une exploitation laitière

Profil de la compagnie

Dans une ferme laitière, on utilisait un système à dépression pour l'exploitation des équipements de traite automatique qui assuraient la traite des vaches et l'acheminement du lait vers un réservoir de stockage. Avant la mise en œuvre du projet, le système de traite à dépression comprenait une pompe à vide entraînée par un moteur de 30 HP, les niveaux de vide étant commandés par admission d'air atmosphérique – ce qui est une pratique standard dans cette industrie.

Vue d'ensemble du projet

Dans les fermes laitières, les systèmes modernes de traite du lait utilisent le vide pour la traite automatique des animaux. Dans les systèmes classiques de traite à l'aide du vide, plusieurs unités de traite avec gobelets trayeurs sont attachées aux animaux et le vide est créé dans les lignes de lait par une pompe à vide qui extrait le lait des gobelets et l'envoie à un réservoir de stockage.

La pompe à vide est entraînée par un moteur c.a. à vitesse constante. Pour maintenir le vide stable nécessaire à la traite des vaches, l'air doit être extrait du système à la même cadence qu'il s'infiltré dans le système. Normalement, l'air entre dans le système par les pulsateurs, ce qui entraîne des fuites et fait que les gobelets se détachent des animaux.

6 Études de cas

Le commande classique du vide est réalisée en faisant tourner à vitesse constante une pompe à vide dimensionnée pour un débit d'air maximal, et permettant à l'air de pénétrer dans le système par l'intermédiaire d'un dispositif de régulation de pression.

Avec une assistance technique de la part de son entreprise d'électricité, le fermier a étudié son système de pompage à vide afin de déterminer si celui-ci fonctionnait avec un rendement satisfaisant. L'étude d'évaluation a conclu que le moteur du système était surdimensionné par rapport au vide à obtenir et que la ferme pouvait réduire ses coûts d'énergie avec un système de pompage plus petit et plus efficace.

Mise en œuvre du projet

90

Appliquant les recommandations qui avaient été formulées, le fermier a décidé d'installer un système comportant un moteur de puissance plus faible et entraîné par un EFV. Le moteur existant a été remplacé par un nouveau moteur éconergétique de 20 HP. Par ailleurs, le fermier a installé sur ce nouveau moteur un EFV permettant de réguler la vitesse du système de pompage en fonction de la charge. On aurait pu installer un plus grand EFV sur le moteur existant de 30 HP, mais le coût en capital aurait été augmenté et l'on aurait manqué l'occasion d'installer un moteur à meilleur rendement.

Résultats du projet

La mise en œuvre du nouveau système de pompe à vide s'est traduite par des économies d'énergie et aussi par une meilleure productivité de la ferme. Alors que l'ancien système demandait une puissance de 16 kW, le nouveau n'a jamais utilisé plus de

4,5 kW, même lors des périodes de pointe. La ferme a pu réduire la puissance nécessaire au système de vide de 30 % de la capacité totale, sans diminution de la dépression ou de la capacité du système. Qui plus est, l'entraînement EFV a été en mesure de faire varier la vitesse de la pompe de façon à ce qu'elle corresponde avec davantage de précision aux besoins de vide du procédé.

La mise en œuvre du projet a permis à la ferme de réaliser une économie annuelle d'énergie de 5 520 \$ ou 55 000 kWh, correspondant à plus de 70 % de l'énergie électrique consommée par ce système. Avec un coût total de 8 200 \$, la période de récupération simple était seulement de 1,5 année. En plus de réduire les coûts d'entretien, le projet va entraîner une plus longue durée de vie utile des équipements.

Économies d'énergie et de coûts

Coûts de mise en œuvre du projet	8 200 \$
Économies annuelles de coûts d'énergie	5 520 \$
Récupération simple (années)	1,5
Économies sur la demande (kW)	11,5
Économies annuelles d'énergie (kWh)	55 000

ANNEXE A : BIBLIOGRAPHIE

Code canadien de l'électricité, Association canadienne de normalisation

CSA C390 Mesure du rendement énergétique des moteurs à induction triphasés, Association canadienne de normalisation

EASA Technical Manual (Manuel technique de l'EASA), Electrical Apparatus Service Association, St. Louis

IEEE 519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (Pratiques et prescriptions recommandées pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes d'alimentation électrique), Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York

IEEE Standard 112 Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (Procédure d'essai normalisée de l'IEEE pour les moteurs et les générateurs à induction polyphasés), Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York

NEMA Standard MG1, Motors and Generators (Moteurs et générateurs), National Electrical Manufacturers Association, Washington DC

NEMA Standard MG10, Energy Management Guide for Selection and Use of Polyphase Motors (Guide de gestion de l'énergie pour le choix et l'utilisation des moteurs poly-

Annexe A : Bibliographie

phasés), National Electrical Manufacturers Association,
Washington DC

*Variable Frequency Drives Application Guide (Guide
d'application des entraînements à fréquence variable)*,
Electric Power Research Institute, Palo Alto, Californie

*Robert S Carrow: Electrician's Technical Reference:
Variable Frequency Drives*, Delmar Thomson Learning
ISBN07668 1923 X

ANNEXE B : SITES WEB UTILES

www.energyefficiency.org

Le Centre canadien d'efficacité énergétique a été créée par l'Alliance canadienne d'efficacité énergétique afin de fournir un accès facile à l'information et aux ressources liées à l'efficacité énergétique. L'Alliance met en valeur et fait progresser l'efficacité énergétique et les avantages qui y sont associés pour l'économie et l'environnement.

www1.eere.energy.gov/industry/

Le Programme des technologies industrielles est un organisme de collaboration avec les industries américaines, visant l'amélioration de l'efficacité énergétique des industries et de leurs performances environnementales.

www.ieee.org

Organisme à but non lucratif, l'IEEE est la principale association professionnelle pour l'avancement de la technologie.

www.nema.org

La NEMA est l'association professionnelle de choix pour l'industrie de fabrication des matériels électriques, et constitue la plus importante association professionnelle des fabricants de produits électriques aux États-Unis.

www.electrofed.com/councils/EEMAC/

L'Association des manufacturiers d'équipement électrique et électronique du Canada (EEMAC) se veut un lieu de rencontre pour plus de 80 compagnies œuvrant au Canada dans la fabrication et la vente de produits, systèmes et

composants électriques. L'EEMAC se consacre principalement à la vitalité économique de l'industrie.

http://www.midamericanenergy.com/pdf/ee_VFD_manuf.pdf

Études de cas d'entreprises d'électricité, comme celle-ci qui présente d'autres exemples tels qu'un EFV installé dans une usine de fabrication de caoutchouc.

<http://www.bchydro.com/business/investigate/investigate780.html>

Le programme "Power Smart" de BC Hydro fait appel aux services de E Source pour fournir à ses clients des informations, comme par exemple sur les entraînements à vitesse variable.

http://www.hydro.mb.ca/pop/pop_profile_whiteshell_labs.pdf

http://www.hydro.mb.ca/pop/pop_profile_prairie_forest.pdf

Les entreprises d'électricité présentent souvent des études de cas des services qu'elles appuient, comme par exemple des études de cas de Manitoba Hydro sur l'utilisation des EFV. Si vous la contactez, votre entreprise d'électricité pourra vous fournir un appui supplémentaire tel que surveillance, informations sur le système, etc.

<http://www.Energy-Efficiency.com>

On trouvera sur ce site des exposés et des références utiles venant à l'appui du triple résultat que l'efficacité énergétique permet d'atteindre, à savoir :

- Prospérité économique
- Performances environnementales
- Responsabilité sociale

<http://oee.nrcan.gc.ca/industriel/equipement/efv/index.cfm?attr=24>

L'office de l'efficacité énergétique de Ressources naturelles Canada propose une aide en ligne sur les EFV et notamment :

- Description
- Estimation des économies
- Conseils pour l'achat
- Divers liens utiles comme par exemple une liste des fabricants.

<http://oee.nrcan.gc.ca/Publications/commerciaux/pdf/m92-242-2002-11f.pdf>

Des fiches techniques comme celle ci-dessus apportent des arguments supplémentaires.

http://www.pumpsystemsmatter.org/content_detail.aspx?id=150

Il existe de nombreuses autres ressources, comme par exemple le *Hydraulic Institute*, une initiative de transformation du marché, créée dans le but d'aider les utilisateurs de pompes en Amérique du Nord à acquérir un avantage commercial plus concurrentiel à l'aide de solutions générales et stratégiques en matière de gestion de l'énergie et d'optimisation de la performance des systèmes de pompes. L'un des objectifs premiers de l'initiative est d'apporter des changements au processus de prise de décisions lors de l'achat des systèmes de pompage et d'équipements connexes, comme éventuellement un EFV.

<http://www.ceati.com/eerg.php>

Les Guides sur l'efficacité énergétique, comme celui-ci, peuvent être obtenus gratuitement à partir du site Web de CEATI International.

ANNEXE C : ACRONYMES EN USAGE DANS L'INDUSTRIE ET GLOSSAIRE

Acronymes en usage dans l'industrie

ANSI = *American National Standards Institute*

API = automate programmable industriel

BHP = puissance au frein

c.a. = courant alternatif

c.c. = courant continu

CFM = pieds cubes par minute

CSA = Association canadienne de normalisation

CSI = onduleur de courant

DSP = processeur de signaux numériques

ECC = embrayage à courants de Foucault

EVR = entraînement à vitesse réglable

FPM = pieds par minute

GPM = gallon par minute

GTO = blocable par la gâchette (thyristor)

HDF = facteur de distorsion harmonique

IEEE = *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IGBT = transistor bipolaire à grille isolée

LCI = onduleur à commutation par la charge

MIA = modulation d'impulsions en amplitude

NEMA = *National Electrical Manufacturers Association*

PWM = modulation d'impulsions en durée (onduleur)

SCR = redresseur commandé au silicium (ou thyristor)

SR = réluctance commutée

THD = distorsion harmonique totale

V = tension

VAN = valeur actualisée nette

VSI = onduleur à courant réglable

VV = variateur de vitesse (*voir* EVR)

VVI = onduleur à tension variable

Glossaire

Ambiant : air entourant un moteur dans le cas des machines à refroidissement par air.

Ampère : unité de courant qui mesure la vitesse de la circulation d'électrons. On l'emploie souvent sous sa forme abrégée Amp ou A. L'unité de courant électrique est l'ampère.

Balai : Pièce en matériau conducteur du courant qui est en contact avec un induit ou un ensemble de bagues collectrices, et assure une connexion électrique entre les composants rotatifs et fixes d'un moteur électrique.

Collecteur : dispositif cylindrique monté sur l'arbre d'un moteur c.c. et assurant les fonctions de commutation entre les enroulements de l'induit et la source d'alimentation.

Condensateur : dispositif qui peut emmagasiner une charge électrique. Dans un circuit à c.a., un condensateur entraîne un retard de la tension par rapport au courant. L'unité de capacité est le farad.

Conducteur : tout matériau qui présente une faible résistance au passage du courant électrique, par exemple, le cuivre.

Couple : force de rotation appliquée à un arbre, généralement exprimée en livres-pieds (système impérial) ou en newtons-mètres (système métrique).

Couple à pleine charge : couple du moteur nécessaire à la production de sa puissance assignée à la vitesse de pleine charge.

Couple de décrochage : couple le plus élevé que peut développer un moteur à la tension nominale sans caler ni subir une diminution brusque de vitesse.

Courant alternatif : débit d'électricité qui change de sens suivant un cycle régulier, atteignant une valeur maximale dans un sens, puis diminuant jusqu'à une valeur nulle et changeant de sens pour atteindre ensuite une valeur maximale dans le sens opposé.

Courants de Foucault : courants localisés dans les tôles électriques qui sont induits par le flux magnétique alternatif et provoquent des pertes et un échauffement.

Courant de pleine charge : courant absorbé par un moteur aux tensions, fréquences et charges assignées.

Élévation de température : écart entre la température des enroulements d'un moteur en fonctionnement et la température ambiante.

Entrefer : distance séparant la partie tournante (rotor) et la partie fixe (stator) d'un moteur électrique. L'énergie magnétique est transmise à travers cet entrefer.

Facteur de marche : relation entre le temps de fonctionnement et le temps d'arrêt d'un moteur électrique.

Facteur de puissance : mesure de la différence de phase entre tension et courant dans un circuit électrique. Dans la plupart des dispositifs électriques, le courant est en retard sur la tension en raison de l'inductance. Dans les circuits capacitifs, le courant est en avance sur la tension.

Facteur de surcharge : le facteur de surcharge d'un moteur c.a. est un coefficient multiplicateur qui, lorsqu'on l'applique à la puissance assignée du moteur, indique la charge admissible maximale qui pourra être entraînée dans les conditions spécifiées pour le facteur de surcharge.

Flux : champ magnétique qui s'établit autour d'un conducteur parcouru par un courant ou autour d'un aimant permanent.

Force électromotrice (f.e.m.) : un synonyme de la tension généralement employé pour définir les tensions induites ou engendrées dans un circuit électrique.

Force magnétomotrice (f.m.m.) : énergie magnétique produite lors de l'établissement d'un flux magnétique. Elle est comparable à la force électromotrice dans un circuit électrique.

Fréquence : vitesse à laquelle l'écoulement d'un courant alternatif change de sens. L'unité de fréquence est le hertz (Hz) qui vaut un cycle par seconde.

Glissement : rapport entre la vitesse synchrone et la vitesse réelle d'un moteur à induction, qui s'exprime normalement en pourcentage.

Glissement à pleine charge : différence entre la vitesse synchrone d'un moteur et sa vitesse de pleine charge. Il s'exprime souvent comme le rapport en pour cent de la vitesse synchrone à la vitesse à pleine charge.

Horse-power : mesure de la puissance employée pour classer les moteurs électriques. L'unité de mesure de la puissance assignée des moteurs est le horse-power (HP) ou le kilowatt. Un horse-power équivaut à 746 watts.

Impédance : opposition totale d'un circuit au passage du courant alternatif. Elle est la somme vectorielle de la résistance et de la réactance.

Inductance : propriété d'un circuit électrique qui s'oppose à toute variation du courant dû au champ magnétique induit par ce courant. (En courant alternatif, l'inductance d'un circuit électrique est la propriété qui tend à s'opposer à toute variation de courant qui le parcourt).

Inducteur : terme utilisé pour définir la partie fixe d'une machine à c.c. L'inducteur engendre le flux magnétique qui interagit avec l'induit.

Inertie : l'inertie est la résistance opposée par un objet à un changement de son état de mouvement. Elle est déterminée par la masse de l'objet multipliée par le carré du rayon de giration (k). Les parties tournantes ne fonctionnant pas toutes à la même vitesse, le calcul de l'inertie de chaque partie mobile permet de considérer que les parties tournantes fonctionnent comme un tout.

Phase : terme employé pour caractériser la relation spatiale des enroulements d'un moteur électrique ou les tensions et les courants dans un circuit électrique.

Réactance (inductive) : propriété d'un circuit magnétique entraînant le retard du courant par rapport à la tension.

Rendement : rapport entre la puissance mécanique produite et la puissance électrique absorbée par un moteur.

Résistance : propriété d'un conducteur électrique qui s'oppose à la circulation du courant électrique. L'unité de résistance est l'ohm ().

Rotor : partie tournante d'un moteur électrique.

Stator : partie fixe d'un moteur c.a. qui contient les tôles d'acier et les enroulements.

Tension : unité standard de la force électromotrice qui produit la circulation d'un courant dans un conducteur. L'unité de force électromotrice est le volt (V).

Tension de ligne : tension fournie aux bornes d'entrée d'un appareil électrique.

Vitesse de pleine charge : vitesse d'un moteur aux tension, fréquence et charge assignées.

Watt : mesure de la puissance dans un circuit électrique qui est égale à un joule d'énergie consommé en une seconde. L'unité de puissance est le watt (W).

ANNEXE D : FORMULES PRATIQUES

Calcul de la puissance nécessaire à une charge

La charge mécanique nécessaire à l'équipement entraîné est appelée la puissance au frein (BHP). La valeur de la BHP peut se calculer comme suit :

$$\text{BHP} = \frac{T \times N \text{ (HP nécessaires)}}{5250}$$

avec : HP = puissance fournie par le moteur
 T = force de rotation (lb·pi) x rayon
 N = vitesse de référence du moteur (tr/min)

Après détermination de la puissance au frein nécessaire de la machine (produit de la vitesse par le couple), la puissance en HP peut être déterminée :

$$\text{Puissance assignée du moteur} = \frac{\text{rendement du moteur (\%)} / 100}{\text{puissance disponible}}$$

Si la puissance calculée se situe entre deux puissances assignées de moteur normalisées, choisir la puissance assignée la plus élevée. C'est là une bonne pratique de garder une certaine marge lors du choix de la puissance d'un moteur.

Dans bien des applications, il est possible de calculer la puissance nécessaire sans avoir mesuré réellement le couple nécessaire.

Annexe D : Formules pratiques

Quelques exemples types :

Pour les convoyeurs

$$\text{Puissance (vert.)} = \frac{\text{poids (lb)} \times \text{vitesse (pi / min)}}{33\,000 \times \text{rendement}}$$

$$\text{Puissance (horiz.)} = \frac{\text{poids (lb)} \times \text{vitesse (pi / min)} \times \text{coeff. de frottement}}{33\,000 \times \text{rendement}}$$

Pour les ventilateurs et soufflantes

Effet de la vitesse sur la puissance.

HP = k_1 x vitesse (tr/min)³ – la puissance varie comme le cube de la vitesse

T = k_2 x vitesse (tr/min)² – le couple varie comme le carré de la vitesse

Débit = k_3 x vitesse (tr/min) – le débit varie proportionnellement à la vitesse

$$\text{HP} = \frac{\text{pi}^3 / \text{min} \times \text{pression (lb / po}^2\text{)}}{229 \times (\text{rendement du ventilateur})}$$

$$\text{HP} = \frac{\text{pi}^3 / \text{min} \times (\text{pouces de pression totale a la colonne d'eau})}{6\,362 \times (\text{rendement du ventilateur})}$$

Pression totale = pression statique + pression dynamique

Pression dynamique = $V^2 \times (1/1096,7)^2 \times \text{densité}$

Pour les pompes

$$\text{HP} = \frac{[\text{gallons / min} \times \text{hauteur (pi)} \times \text{densité relative}]}{[3\,960 \times (\text{rendement en \% de la pompe})]}$$

Densité relative de l'eau = 1

1 pi³ par seconde = 448 gallons/min

1 PSI = une hauteur de 2309 pi pour une eau pesant 62,36 lb/pi³ à 62 °F

Pompes à cylindrée constante

Effet de la vitesse sur la puissance (HP) = $k \times$ vitesse (tr/min).

La puissance et la capacité varient directement avec la vitesse.

Les pompes volumétriques sous hauteur constante nécessitent un couple sensiblement constant à toutes les vitesses.

Pompes centrifuges

Effet de la vitesse sur la puissance au frein absorbée.

HP = $k_1 \times$ vitesse (tr/min)³ – la puissance varie comme le cube de la vitesse

T = $k_2 \times$ vitesse (tr/min)² – le couple varie comme le carré de la vitesse

Débit = $k_3 \times$ vitesse (tr/min) – le débit varie proportionnellement à la vitesse

Rendement d'une pompe centrifuge (type)

500 à 1000 gal/min = de 70 % à 75 %

1000 à 1500 gal/min = de 75 % à 80 %

Plus de 1500 gal/min = de 80 % à 85 %

Le rendement des pompes volumétriques peut varier entre 50 % et 80 %, selon leur puissance.

Puissance nécessaire

$$\text{HP} = \frac{\text{couple (lb. pi)} \times \text{vitesse (tr / min)}}{5\,250}$$

$$\text{HP} = \frac{\text{couple (lb. po)} \times \text{vitesse (tr / min)}}{63\,000}$$

$$\text{Couple (lb. pi)} = \frac{[\text{HP} \times 5\,250]}{\text{vitesse (tr / min)}}$$

Annexe D : Formules pratiques

Loi d'Ohm

$$\text{amperes} = \frac{\text{volts}}{\text{ohms}}$$

$$\text{ohms} = \frac{\text{volts}}{\text{amperes}}$$

$$\text{Volts} = \text{ampères} \times \text{ohms}$$

Puissance dans les circuits c.c.

$$\text{Puissance} = \frac{\text{volts} \times \text{amperes}}{746}$$

$$\text{Watts} = \text{volts} \times \text{ampères}$$

$$\text{Kilowatts} = \frac{\text{volts} \times \text{amperes}}{1000}$$

$$\text{Kilowattheures} = \frac{\text{volts} \times \text{amperes} \times \text{heures}}{1000}$$

108

Puissance dans les circuits c.a.

Kilovoltampères (kVA)

$$\text{kVa (monophasé)} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{amperes (de phase)}}{1000}$$

$$\text{kVa (triphase)} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{amperes (de phase)} \times 1,73}{1000}$$

Kilowatts (kW)

$$\text{kW (monophasé)} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{amperes (de phase)} \times \text{facteur de puissance}}{1000}$$

$$\text{kW (triphase)} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{ampères (de phase)} \times \text{facteur de puissance} \times 1,73}{1000}$$

$$\text{Facteur de puissance (PF)} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

Circuits triphasés c.a

$$\text{HP} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{ampères (de phase)} \times 1,73 \times \text{rendement} \times \text{PF}}{746}$$

$$\text{Courant du moteur} = \frac{\text{HP} \times 746}{\text{volts (entre phases)} \times 1,73 \times \text{rendement} \times \text{PF}}$$

$$\text{Courant du moteur} = \frac{\text{kVA} \times 1000}{1,73 \times \text{volts (entre phases)}}$$

$$\text{Courant du moteur} = \frac{\text{kW} \times 1000}{1,73 \times \text{volts (entre phases)} \times \text{PF}}$$

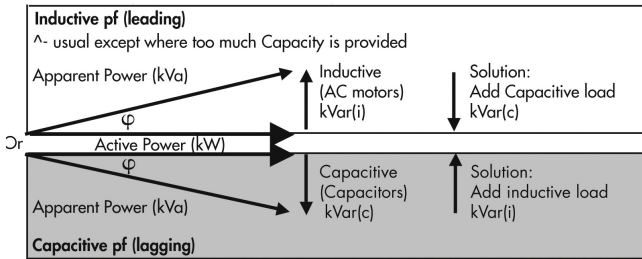
$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{kW} \times 1000}{\text{volts (entre phases)} \times \text{ampères (de phase)} \times 1,73}$$

$$\text{Kilowattheures} = \frac{\text{volts (entre phases)} \times \text{ampères (de phase)} \times \text{heures} \times 1,73 \times \text{PF}}{1000}$$

$$\text{Puissance (watts)} = \text{volts (entre phases)} \times \text{ampères (de phase)} \times 1,73 \times \text{PF}$$

$$\text{PF} = \text{Facteur de déplacement de puissance} = \text{cosinus de l'angle} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

Annexe D : Formules pratiques



Ideal: pf should be at unity (1.0) i.e.:

ϕ is zero
and kVa is equal to kW
(Apparent Power) (Active or 'Real' Power)

Figure 23 : Triangle des puissances - Illustration des relations entre :

- i) Puissance active (kW) et puissance apparente (kVA)
- ii) Le rapport de la puissance active à la puissance apparente est le facteur de puissance (kW/kVA)
- iii) Charge inductive et charge capacitive (kVar)
- iv) Circuit inductif (tension en avance) et à circuit capacitif (tension en retard)

Inductive pf (leading)	Facteur de puissance inductif (en avance)
Usual except where too much capacity is provided	Cas général sauf si le circuit est fortement capacitif
Apparent Power (kVA)	Puissance apparente (kVA)
Inductive (AC motors) kVar (i)	Inductive (moteurs c.a.) kVar (i)
Solution: Add Capacitive Load kVar (c)	Solution : ajouter une charge capacitive kVar (c)
Active Power	Puissance active
Apparent Power (kVA)	Puissance apparente (kVA)
Capacitive (Capacitors) kVar (c)	Capacitive (condensateurs) kVar (c)
Solution: Add inductive Load kVar (i)	Solution : ajouter une charge inductive kVar (i)
Capacitive pf (lagging)	Facteur de puissance capacitif (en retard)
Ideal: pf should be at unity (1.0) i.e.	Idéalement : PF devrait être égal à 1, c.-à-d. :
ϕ is 0	ϕ est nul
and kVA (Apparent power)	et la puissance apparente (kVA)
is equal to	est égale à
kW (Active or 'Real Power')	la puissance active ou 'réelle' (kW)

ANNEXE E : FACTEURS DE CONVERSION

	Multiplier	par	pour obtenir
Longueur	Mètres	3,281	des pieds
	Mètres	39,37	des pouces
	Pouces	0,0254	des mètres
	Pieds	0,3048	des mètres
Couple	Newtons-mètres	0,7376	des lbf-pi
	lbf-pi	1,3558	des newtons-mètres
	lbf-po	0,0833	des lbf-pi
	lbf-pi	12,00	des lbf-po
Rotation	tr/min	6,0	des degrés/sec
	tr/min	0,1047	des rad/sec
	Degrés/sec	0,16667	des tr/min
	Rad/sec	9,549	des tr/min
Moment d'inertie	Newtons-mètres ²	2,42	des lb-pi ²
	oz-po ²	0,000434	des lb-pi ²
	lb-po ²	0,00694	des lb-pi ²
	Slug-pi ²	32,17	des lb-pi ²
	oz-po-sec ²	0,1675	des lb-pi ²
	lb-po-sec ²	2,68	des lb-pi ²
Puissance	Watts	0,00134	des HP
	lb-ft/min	0,0000303	des HP
	HP	746	des watts
	HP	30300	des lb-pi/min
Température	Degré C = (Degré F - 32) x 5/9		
	Degré F = (Degré C x 9/5) + 32		

Nous apprécions votre réaction et vos commentaires à propos de ce guide. Veuillez faire parvenir vos observations ou suggestions à :

info@ceati.com

L'efficacité énergétique améliore la compétitivité

- Prospérité économique
- Performance environnementale
- Responsabilité sociale
- Sécurité