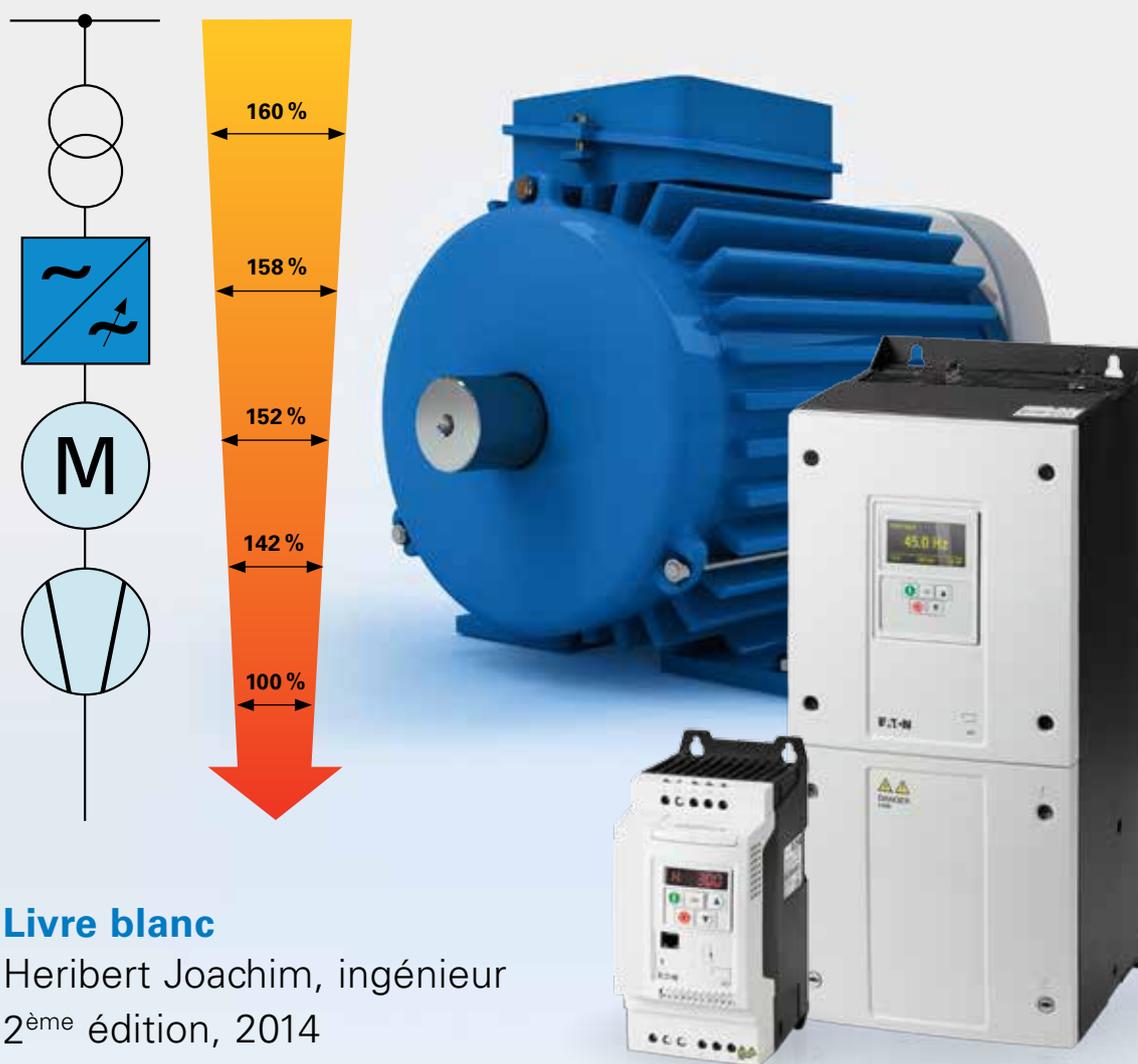


Mise en application réussie de la directive ErP

Réduire les pertes observées avec les variateurs de vitesse



Livre blanc

Heribert Joachim, ingénieur
2^{ème} édition, 2014



Powering Business Worldwide

Rendement énergétique dans les applications industrielles - tirant parti des économies potentielles à réaliser dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques

Introduction

Le rendement énergétique est un sujet d'actualité. Ces dernières années, la classe politique et les entreprises ont tout mis en œuvre pour réduire la consommation d'énergie des systèmes de production et réduire les émissions de CO₂ du secteur industriel. Des succès remarquables ont été obtenus dans de nombreux domaines, mais la route est encore longue avant que nous puissions nous reposer sur nos lauriers. De nombreuses économies d'énergie sont encore à réaliser, notamment dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques. La manière la plus efficace d'utiliser ce potentiel consiste à recourir à des technologies d'automatisation combinées à des démarreurs de moteur ou à des variateurs de fréquence. Le facteur clé ici est de choisir la bonne solution pour chaque application.

L'industrie allemande est responsable d'environ 30 % de la consommation totale d'énergie du pays (voir la figure 1). Les deux tiers de cette consommation sont utilisés pour le chauffage industriel. L'énergie mécanique représente un quart de la consommation, tandis que le chauffage des pièces ne constitue qu'une part minime de la consommation totale¹. 54 % de la demande en énergie finale de l'industrie émane de l'industrie manufacturière². Selon la ZVEI (Association allemande de l'industrie électrique et électrotechnique), l'industrie manufacturière et l'industrie de transformation allemande pourraient à elles seules réaliser 10 à 25 % d'économies d'énergie en utilisant des technologies d'automatisation plus efficaces, ce qui représente 88 milliards de kilowattheures d'énergie équivalente. Cela permettrait d'économiser jusqu'à 7 milliards en coûts d'énergie annuels.³

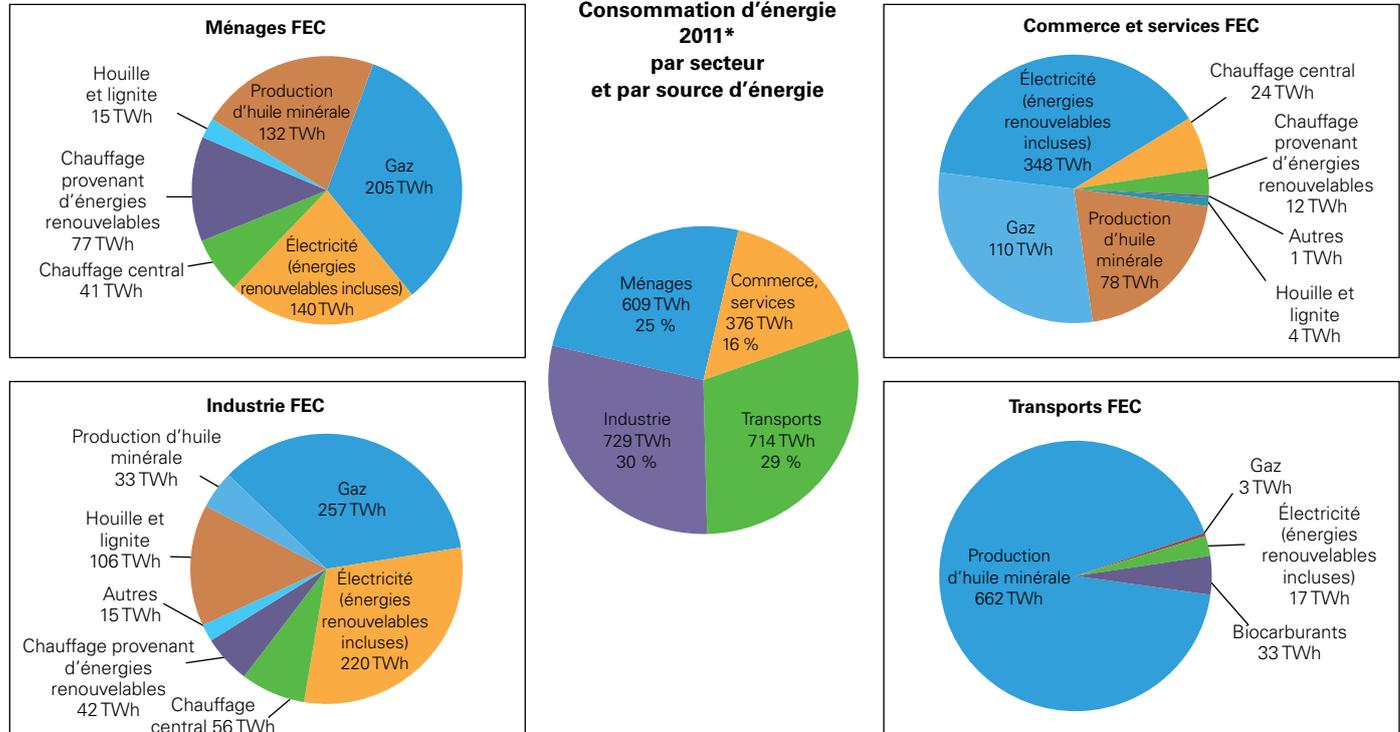


Figure 1 Consommation d'énergie en Allemagne (2011) par secteur et par source d'énergie, source : Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Agence fédérale de protection de l'environnement

- 1 Agence fédérale de protection de l'environnement, consommation d'énergie par source et par secteur, mars 2013, <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeId=5978> [en allemand]
- 2 VDMA / Roland Berger : Der Beitrag des Maschinen- und Anlagenbaus zur Energieeffizienz, 2009
- 3 ZVEI : Automation, Mit Hightech für Umwelt- und Klimaschutz – Automation: Wir machen's energieeffizient!, 2010

L'automatisation industrielle offre également un potentiel énorme en matière de gaz à effet de serre. 37 % (378 millions de tonnes CO₂e, CO₂e = équivalent CO₂) des émissions totales de gaz à effet de serre en Allemagne (1 025 millions de tonnes CO₂e) proviennent du secteur industriel, et ce chiffre devrait fortement augmenter au cours des 20 prochaines années. Il est toutefois possible de freiner cette tendance. Une utilisation accrue des technologies environnementales intelligentes, et en premier lieu des solutions d'automatisation, pourrait ralentir cette progression, voire même l'inverser⁴. Dans l'industrie, les émissions de gaz à effet de serre pourraient être réduites de 43 millions d'équivalent CO₂ (env. 11 % des émissions totales du secteur industriel). Cela équivaut aux émissions annuelles de CO₂ de sept centrales thermiques au charbon de grande taille (de 2 000 MW chacune)⁵.

Dans le domaine de la fabrication industrielle, les systèmes d'entraînement électriques se taillent la part du lion avec près des deux tiers de la consommation d'électricité⁶. L'augmentation du rendement énergétique en recourant aux bonnes techniques d'entraînement a un rôle spécial à jouer. En Allemagne, l'Agence fédérale de protection de l'environnement estime que des technologies d'entraînement offrant un meilleur rendement énergétique, et notamment des solutions d'automatisation intelligentes, pourraient réduire la consommation de près de 27 milliards de kilowatts d'ici 2020 et, par là même, éliminer 16 millions de tonnes d'émissions de CO₂⁷. Les économies réalisables dans le secteur de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques devient encore plus apparente si l'on considère que le coût de l'énergie représente, et de loin, la plus grosse partie des frais supportés au cours du cycle de vie d'un moteur électrique (voir la figure 2).

Sur la base de ce constat, l'Union européenne a lancé un certain nombre d'initiatives visant à promouvoir l'écoconception des produits. Au cœur de ces propositions : la directive 2009/125/CE (dite « directive ErP ») relative aux « produits liés à l'énergie »⁸, qui remplace et étend le champ d'application de la directive ErP 2005/32/CE⁹. Elle établit un cadre pour la fixation d'exigences communes en matière d'écoconception applicables aux produits consommant de l'énergie et définit des critères que les produits concernés doivent satisfaire pour pouvoir être utilisés en Europe. Les exigences relatives aux différents groupes de produits sont définies dans des directives d'application séparées, comme par exemple le règlement CE 640/2009 applicable aux moteurs électriques¹⁰.

Mais cela soulève un certain nombre de questions : quelles sont précisément les nouvelles exigences applicables aux moteurs électriques et quels sont les types de moteurs concernés ? Quelle est la meilleure façon pour les entreprises de tirer parti des potentiels d'économie dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques ? Quelle est la solution d'automatisation la mieux adaptée pour telle ou telle application ? Quelles sont les stratégies de mise en œuvre existantes ? Quel est le montant de l'investissement requis pour la modernisation technique ? Ce livre blanc vise à répondre à ces questions et à guider les ingénieurs équipement, les constructeurs d'armoires de commande et les opérateurs à utiliser des solutions d'automatisation adaptées afin d'améliorer le rendement énergétique et la compatibilité environnementale de leurs processus de fabrication dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques.

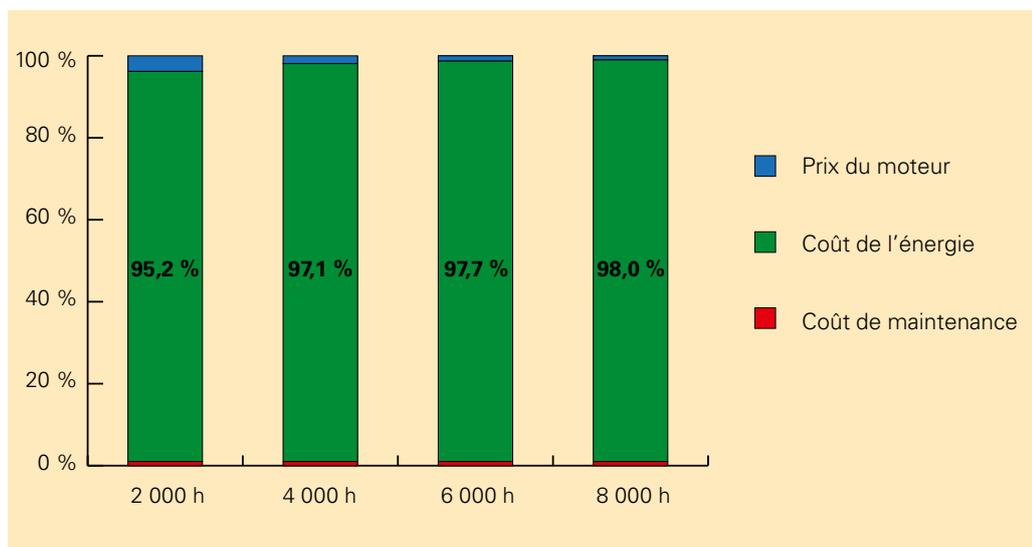


Figure 2 : Coûts sur la durée du cycle de vie (hors frais d'installation et de mise au rebut) d'un moteur de 11 kW avec un cycle de vie de 15 ans (ou, alternativement, oder ZVEI Motors et systèmes d'entraînement équipés d'un système de contrôle en chaîne fermée, page 14),

Source : diam-consult*

* Extrait de : Almeida, A.T. Ferreira, Fong, J., Fonseca, P., « EUP Lot 11 Motors » ; ISR-Université de Coimbra, février 2008

4 ZVEI, sur la base du rapport industriel rédigé en 2007 par McKinsey & Company, Inc. « Costs and Potentials of Greenhouse Gas Abatement in Germany »

5 ZVEI, Measuring Technology and Process Automation Division (Division des technologies de mesure et de l'automatisation des processus), dans : ZVEI : Automation, with high-tech for environmental and climate protection – Automation: We make it energy efficient!, 2010

6 ZVEI, « Motors and closed-loop controlled drives – standards and legal requirements for low voltage three-phase motors », 2013 [en allemand]

7 Agence fédérale de protection de l'environnement, communiqué de presse n° 53/2009, « Energy efficiency in electric motors », 2009 <http://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/energy-efficiency-in-electric-motors>

8 Directive 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie

9 Directive 2005/32/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits utilisant de l'énergie

10 Règlement de la Commission européenne (CE) n° 640/2009 du 22 juillet 2009 mettant en application la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil européen relative aux exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques

Cadres juridiques

Les directives du CE ont force de loi dans tous les États-membres de l'Union européenne et entrent en vigueur peu après leur publication dans le Journal officiel des Communautés européennes. La directive ErP 2009/125/CE fixe un cadre pour la fixation d'exigences communes en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie. Ces produits incluent les systèmes à moteur électrique et les applications de CVC comme les chaudières sans cuve, les chauffe-eaux, les réfrigérateurs et congélateurs commerciaux, les systèmes de conditionnement d'air, les ventilateurs et les compresseurs.

Le règlement CE 640/2009 définit les classes de rendement énergétique minimum obligatoires des moteurs asynchrones basse tension triphasés (voir les domaines d'application dans la figure 3). Ce type de moteurs est très répandu dans l'industrie et représentait en 2005 près de 90 % de l'électricité consommée par des moteurs électriques dans l'Europe des 27.¹¹ Dans ce contexte, les anciennes classes de rendement énergétique (EFF) facultatives mises en place par le CEMEP (Comité européen des constructeurs de machines électriques et d'électronique de puissance) ont été remplacées par les classes internationales de rendement énergétique IE définies dans la norme CEI 60034-30 applicable aux moteurs à induction. Ces classes sont : IE1 (rendement standard), IE2 (rendement élevé) et IE3 (rendement très élevé). Le rendement énergétique est désormais calculé à l'aide de nouvelles méthodes (définies dans la norme CEI 60034-2-1:2007), comme suit :

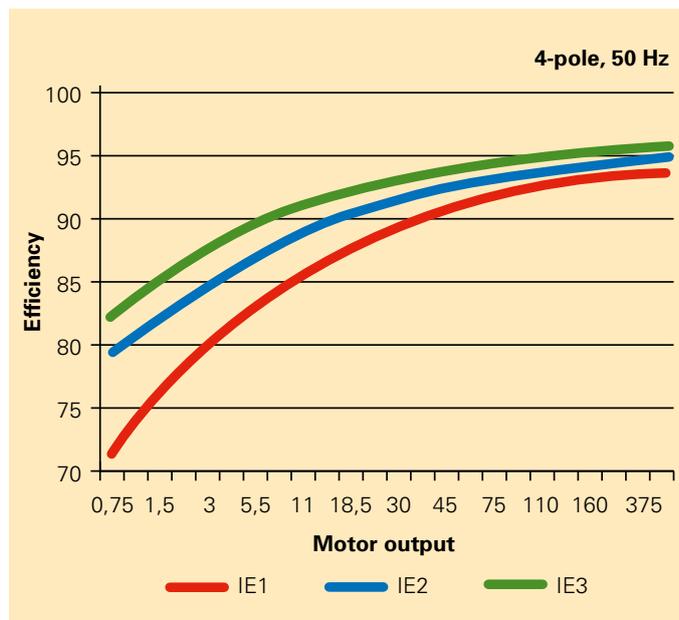


Figure 4 : Courbes de rendement énergétique global (code IE) des moteurs asynchrones standards, source : ZVEI

Quel moteur tombe dans quel domaine de validité	Norme CEI 60034-30:2008 Noms des classes : IE1, IE2, IE3	Directive ErP/Règlement 640/2009 Exigence légale minimum
1 Moteur asynchrone triphasé standard 0,75–375 kW 2, 4, 6 pôles, service continu S1 <i>(Remarque : s'applique également si le moteur est installé dans une machine)</i>	Oui Remarque : mode de fonctionnement supplémentaire S3 (cycle de fonctionnement ≥ 80 %)	Oui
2 Moteur asynchrone triphasé standard avec accessoires (joints d'arbre, dispositifs anti-inversement du sens de rotation, codeurs rotatifs, etc.) 0,75–375 kW 2, 4, 6 pôles, service continu S1 <i>(Remarque : mesure du rendement énergétique sans accessoires)</i>	Oui Remarque : mode de fonctionnement supplémentaire S3 (cycle de fonctionnement ≥ 80 %)	Oui
3 Moteur à train d'engrenages	Oui	Oui
4 Moteur antidéflagrant	Oui	Non
5 Moteur frein Moteur équipé d'un dispositif de freinage électromécanique directement relié à l'arbre de transmission, sans couplage.	Oui	Non
6 Moteurs entièrement intégrés dans une machine (ex. : pompes, ventilateurs, boîtes à engrenages et compresseurs) et dont le rendement énergétique ne peut être mesuré indépendamment de cette machine.	Non	Non
7 Autres types de moteurs (ex. : moteurs à aimant permanent, moteurs à plusieurs polarités, moteurs de commutation, ex. : servomoteurs)	Non	Non

Figure 3 : Comparaison des domaines de validité dans la directive CEI/UE « moteurs », source : ZVEI

¹¹ Agence fédérale de protection de l'environnement, communiqué de presse n° 53/2009, « Energy efficiency in electric motors », 2009

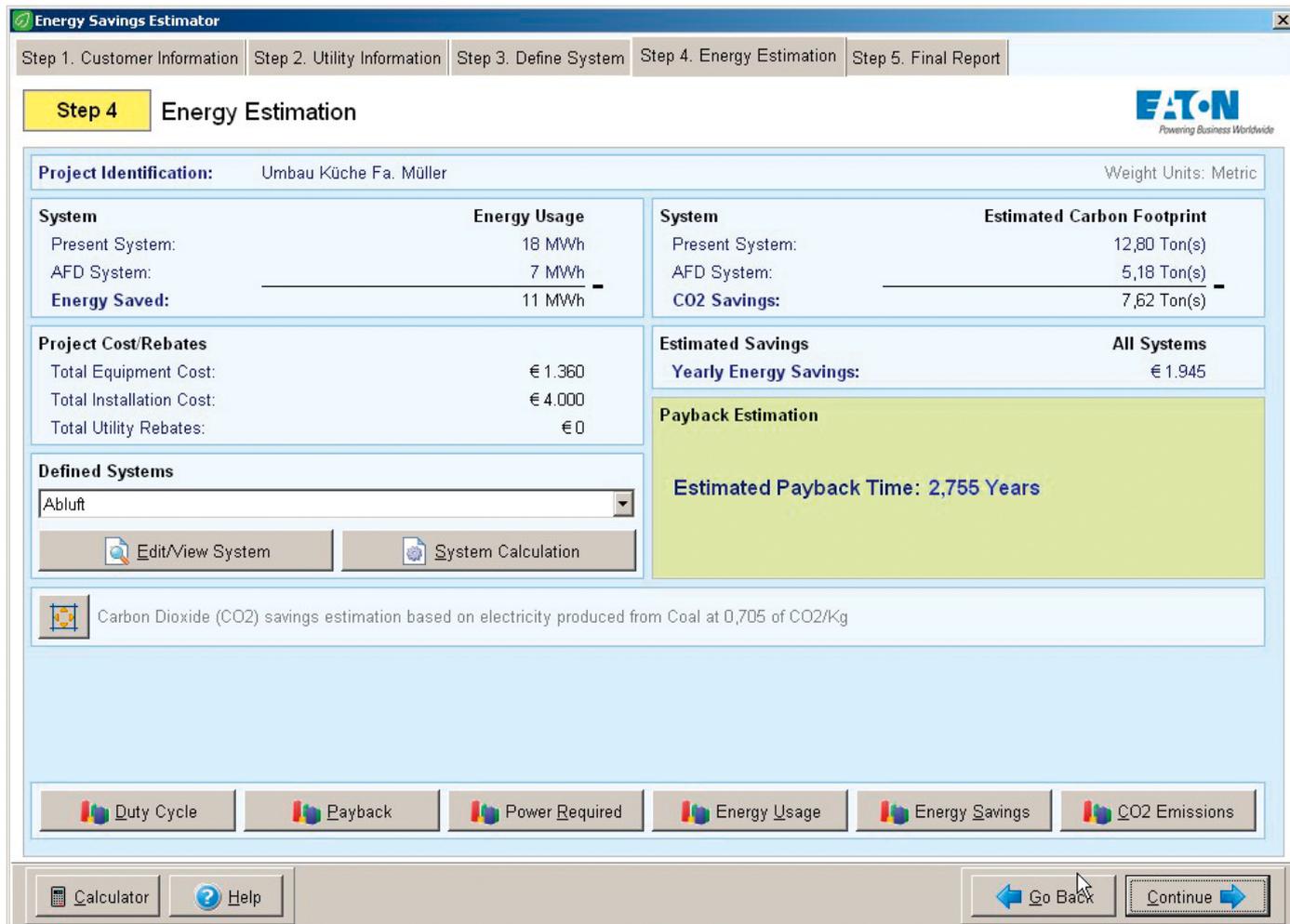


Figure 5 : Logiciel d'estimation des économies d'énergie visant à identifier les économies d'énergie potentielles dans les systèmes électroniques, source : Eaton

Cette réforme prévoit que le domaine de validité couvert par la directive « Moteurs » sera progressivement élargie dans les années à venir avec pour objectif d'économiser davantage d'énergie dans le domaine de l'ingénierie des systèmes d'entraînement électriques. Le cadre juridique applicable aux moteurs asynchrones standard est le suivant :

Règlement CE 640/2009, article 3 (extrait)

- À partir du 16 juin 2011, les moteurs doivent avoir un rendement supérieur ou égal à la classe de rendement IE2.
- À partir du 1^{er} janvier 2015 : tous les moteurs d'une puissance nominale comprise entre 7,5 et 375 kW doivent soit avoir un rendement supérieur ou égal à la classe de rendement IE3 [...] soit atteindre la classe de rendement IE2 [...] et être équipés d'un variateur de vitesse.
- À partir du 1^{er} janvier 2017 : tous les moteurs d'une puissance nominale comprise entre 0,75 et 375 kW doivent soit avoir un rendement supérieur ou égal à la classe de rendement IE3 [...] soit atteindre la classe de rendement IE2 [...] et être équipés d'un variateur de vitesse.

Ces nouveaux cadres juridiques devraient renforcer la sensibilisation aux problèmes de rendement énergétique dans l'industrie. Sans technologies d'automatisation, l'industrie sera incapable de satisfaire aux exigences sans cesse croissantes en matière de rendement énergétique et d'atteindre les objectifs fixés en matière de lutte contre le réchauffement climatique. Le marché reflète l'importance croissante des technologies d'automatisation : Selon des estimations de la ZVEI, le marché mondial des technologies de mesure et de l'automatisation des processus passera de 113

milliards d'euros (2007) à 213 milliards d'euros (2020), ce qui correspond à une croissance annuelle d'environ 5 %. Les principaux moteurs de cette évolution (au moins 25 % de la valeur du marché des technologies de mesure et de l'automatisation des processus) sont les produits et systèmes verts ou les liens avec le rendement énergétique et les activités liées à la protection du climat. Ce chiffre devrait augmenter de 35 à 40 % d'ici 2020¹².

Économiser l'énergie, mais comment ?

Il existe trois grandes approches permettant de réduire la consommation d'énergie d'un système, chacune offrant différents potentiels d'économies (indiqués en pourcentage entre parenthèses) : améliorer le rendement énergétique des moteurs en se basant sur les nouvelles classes IE (1,4 à 3 %), le variateur de vitesse au lieu d'un accélérateur mécanique (8 à 10 %) ou optimisation générale du système (15 à 20 %)¹³.

Ces chiffres montrent que pour augmenter efficacement le rendement énergétique d'un système, il ne suffit pas de remplacer des composants par des produits offrant un meilleur rendement ; il faut plutôt considérer le système dans son ensemble. L'obtention de résultats optimaux n'est possible qu'avec une interaction parfaite entre tous les composants et en choisissant une solution d'automatisation adaptée à l'application envisagée. Cette approche

12 ZVEI, Division économique et statistique, 2009, dans ZVEI : Automation, with high-tech for environmental and climate protection – Automation: We do it energy efficiently!, 2010

13 Professeur Andreas Binder, conférence intitulée « Réduire les coûts et la consommation d'énergie grâce à des systèmes d'entraînement électrique à rendement élevé », IHK Nuremberg, 20 janvier 2009 [en allemand]

modifiée, qui ne se concentre plus sur le composant, mais sur le système dans son ensemble, constitue la solution du futur. Ceci est confirmé par le fait qu'un groupe de travail du CENELEC (Comité européen de normalisation électrotechnique) travaille déjà sur une nouvelle norme grâce à laquelle il sera possible de déterminer la solution offrant le meilleur rendement énergétique pour une application entière (moteurs, appareils de commutation, variateurs de vitesse), et qui indiquera également les méthodes d'essai à utiliser (norme CENELEC « Exigences en matière de rendement énergétique et d'écoconception applicables à l'électronique de puissance, aux appareils de commutation, aux appareillages de manœuvre et aux systèmes d'entraînement électriques, et à leurs applications industrielles »).

Cette approche intégrée signifie également qu'une analyse complète de la consommation d'énergie du système dans sa globalité et de ses composants est nécessaire pour identifier les écarts de rendement et les bons outils pour les combler. Ce processus pouvant être très complexe, de nombreux fabricants de composants d'automatisation fournissent des solutions logicielles pratiques pour aider les utilisateurs à acquérir des données de consommation d'énergie détaillées concernant leur machine ou leur équipement (voir la figure 5). Un programme de ce type permet de calculer les économies potentielles à l'avance. Les utilisateurs peuvent ainsi éviter les risques prévisibles, et même calculer le moment où le coût d'un nouvel équipement, en tenant compte des économies d'énergie réalisées, sera amorti. Les ingénieurs équipement ne devront donc pas être d'emblée repoussés par les prix d'achat élevés des technologies de pointe, mais plutôt considérer le rapport coût-avantages sur l'intégralité du cycle de vie du produit qu'ils souhaitent acquérir (coût global sur le cycle de vie). Dans la majorité des cas, un investissement dans des composants d'automatisation visant à augmenter le rendement énergétique d'un système est très rapidement amorti.

Deux approches, un seul objectif

Deux grandes méthodes peuvent être utilisées pour tirer pleinement parti du potentiel d'économies d'énergie offert par une technologie de commande de système d'entraînement : l'une consiste à équiper le moteur d'un démarreur afin de faire tourner celui-ci à une vitesse prédéfinie une fois démarré, tandis que l'autre consiste à utiliser des démarreurs à vitesse variable (VSS) ou des dispositifs d'entraînement à vitesse variable pour faire fonctionner des moteurs

avec une vitesse variable. Dans les deux cas, les composants ne produiront les résultats escomptés que s'ils sont correctement déployés. Ce qui suit tient donc compte des différences, des domaines d'application et des scénarios d'utilisation des quatre méthodes de démarrage les plus importantes et les plus connues utilisées pour démarrer et contrôler les moteurs asynchrones triphasés.

A) Démarreurs de moteur : Un moteur triphasé se caractérise par une intensité de courant élevée sur l'alimentation principale avec un démarrage direct. Des courants de démarrage et de surtension élevés apparaissent lorsque l'intégralité de la tension est appliquée, ce qui provoque des creux de tension gênantes au niveau de l'alimentation principale et des effets de couple transitoires dans les systèmes mécaniques. C'est notamment le cas avec les moteurs IE3 à rendement très élevé, qui se caractérisent par un certain nombre de propriétés spécifiques, et notamment des courants de démarrage élevés. De ce fait, il est particulièrement important d'utiliser des appareils de commutation et des composants de protection de haute qualité, au comportement de déclenchement adéquat et avec un dispositif de commutation spécialement conçu pour le moteur IE3 utilisé. Pour compléter cette stratégie, on utilise souvent des solutions d'automatisation pour éliminer les effets secondaires gênants évoqués ci-dessus

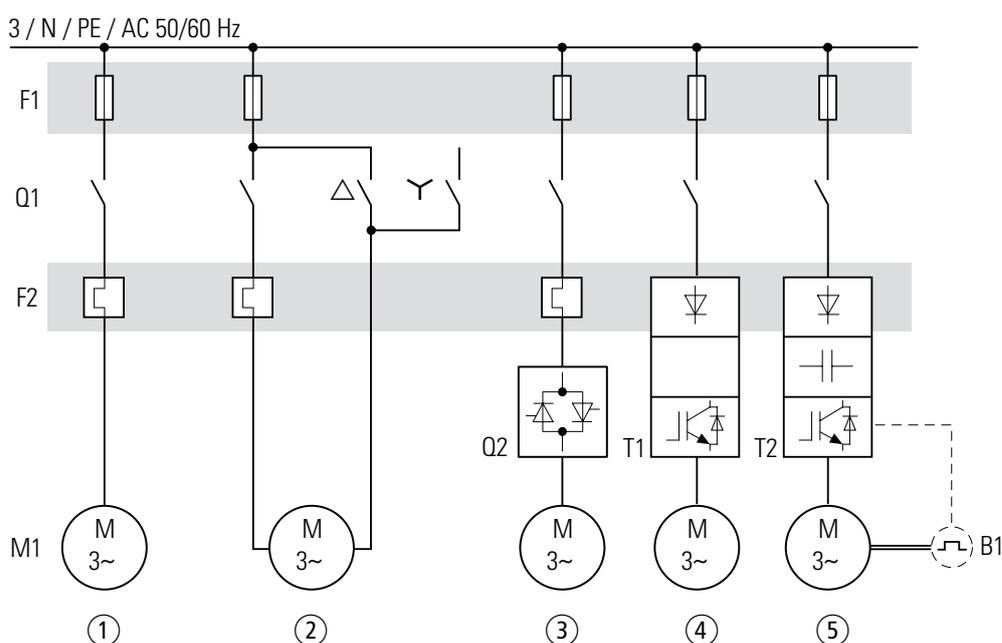


Figure 6 : Différentes méthodes de démarrage des moteurs

F1 = fusible (court-circuit et protection de ligne)

Q1 = commutation (contacteurs)

F2 = protection du moteur (protection contre les surcharges thermiques, relais de surcharge)

M1 = moteur asynchrone triphasé

① Démarrage direct du moteur

② Démarreur en étoile-triangle, la méthode de démarrage la plus connue et la plus courante.

③ Démarreur à variations de fréquence (Q2), qui permet un démarrage sans à-coups du moteur. Une alternative électronique et moderne au démarreur étoile-triangle.

④ Démarreur à vitesse variable (VSS) (T1), démarrage contrôlé, sans à-coups du moteur avec couple lié à la charge nominale. Les démarreurs à vitesse variable (VSS) permettent également un contrôle précis de la vitesse du moteur et sont dotés d'une protection de moteur électronique intégrée (I^2t).

⑤ Système d'entraînement à fréquence variable (T2), qui permet un démarrage contrôlé et sans à-coups du moteur avec un couple lié à la charge nominale. Les variateurs de fréquence permettent également de contrôler avec précision la vitesse du moteur et sont dotés d'une protection de moteur électronique intégrée (I^2t). En fonction des caractéristiques, ils permettent également de contrôler avec exactitude la vitesse (option, générateur d'impulsions B1) sur les moteurs asynchrones sujets aux dérives.

et pour réduire la consommation d'énergie.¹⁴ (Figure 6 : schémas fonctionnels des différents types de démarreurs de moteur, source : Eaton)

I. *Démarreur direct* : Le démarrage direct d'un moteur est la méthode la plus facile pour démarrer les moteurs asynchrones triphasés. Les bobinages du stator sont directement reliés à l'alimentation principale dans un processus de commutation unique. Le démarrage direct est idéal pour les systèmes d'entraînement des réseaux puissants qui permettent de recourir à des courants de démarrage élevés (couple). (Figure 7 : démarreur direct, source : Eaton)

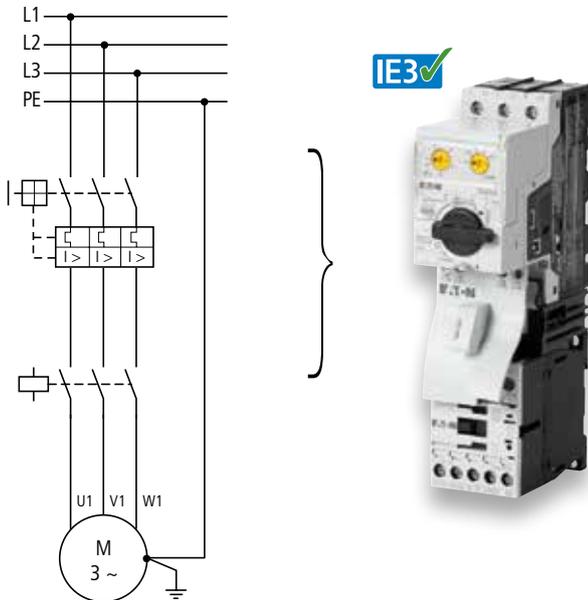


Figure 7 : système d'entraînement du moteur, démarreur direct, rotation dans le sens horaire, exemple de MSC

II. *Démarreur étoile-triangle* : Avec un démarreur de type étoile-triangle, le démarrage du moteur asynchrone triphasé s'effectue grâce à une commutation des bobinages. Les cavaliers situés dans la boîte à bornes du moteur sont ignorés, et les six connexions du bobinage sont reliées à l'alimentation principale à l'aide de ce que l'on appelle un commutateur étoile-triangle (interrupteur à actionnement manuel ou circuit de contacteur automatique). Dans une connexion en étoile, la tension de l'alimentation principale (U_{LN}) et le courant traversant les bobinages du moteur sont réduits par un facteur de $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0,58$), ce qui réduit le couple de démarrage à environ un tiers de la valeur d'une connexion en triangle. Du fait du couple de démarrage réduit, la configuration étoile-triangle convient aux systèmes d'entraînement dotés de couples faibles ou de couples qui augmentent proportionnellement à la vitesse, comme c'est le cas avec les pompes et les ventilateurs (ventilateurs/souffleuses). Elles sont également utilisées lorsque le système d'entraînement n'est soumis à une charge qu'après avoir accéléré jusqu'à une certaine vitesse (presses et centrifugeuses, par exemple). (Figure 8 : démarreur étoile-triangle, source : Eaton)

III. *Démarreurs à variations de fréquence* : Bien souvent, le démarrage direct et le démarrage progressif étoile-triangle d'un moteur asynchrone triphasé n'est pas la meilleure solution, car des courants de crête élevés ont un impact sur l'alimentation électrique, et des augmentations brutales du couple soumettent les composants mécaniques de la machine ou du système à des contraintes importantes. Le démarreur à variations de fréquence constitue une solution.

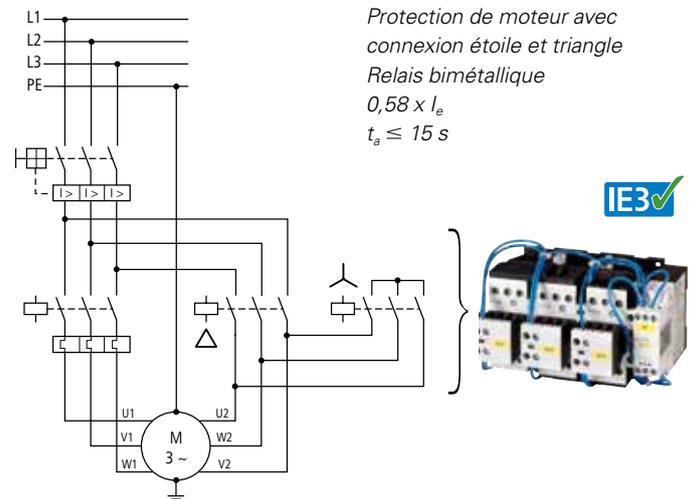


Figure 8 : système d'entraînement de moteur, démarreur étoile-triangle, rotation dans le sens horaire, exemple de SDAINL

(Figure 9, démarreur à variations de fréquence, source : Eaton). Il permet une augmentation continue et sans à-coups du couple et offre également l'opportunité de réduire le courant de démarrage de manière sélective. La tension du moteur passe, dans le délai de démarrage sélectionné, de la tension de démarrage choisie à la tension nominale du moteur. Le démarreur à variations de fréquence permet également de contrôler la décélération du système d'entraînement en réduisant la tension. Les

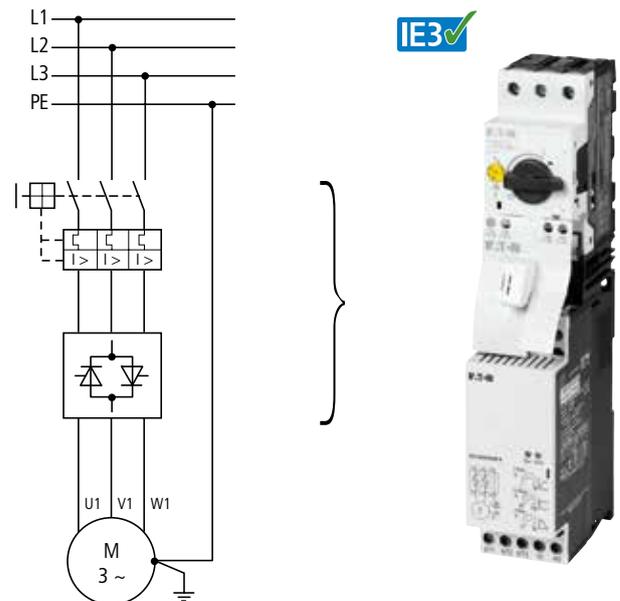


Figure 9 : système d'entraînement de moteur, démarreur à variations de fréquence DS7, configuration en ligne, combiné à PKZM0

démarreurs à variations de fréquence sont parfaits pour les systèmes d'entraînement exigeant un couple progressif ou une réduction de courant. Dans les applications nécessitant un démarrage sous une charge (la charge ne peut pas être raccordée après le démarrage), il doit être préféré à la configuration étoile-triangle. Pour des raisons économiques et compte tenu du potentiel d'économies d'énergie, c'est la solution optimale pour les systèmes d'entraînement de forte puissance. Que les utilisateurs prévoient ou non de prévenir les surpressions dans les systèmes de pompage, de réduire les courants de démarrage dans les grosses masses centrifuges ou de garantir un démarrage sans à-coups de leurs systèmes de transport, les démarreurs à variations de fréquence offrent une bonne alternative pour un démarrage de moteur sans à-coups tout en protégeant le système d'alimentation (voir la figure 10).

14 Jörg Randermann, « Starting and Controlling Three-Phase Asynchronous Motors », 2010 [en allemand]

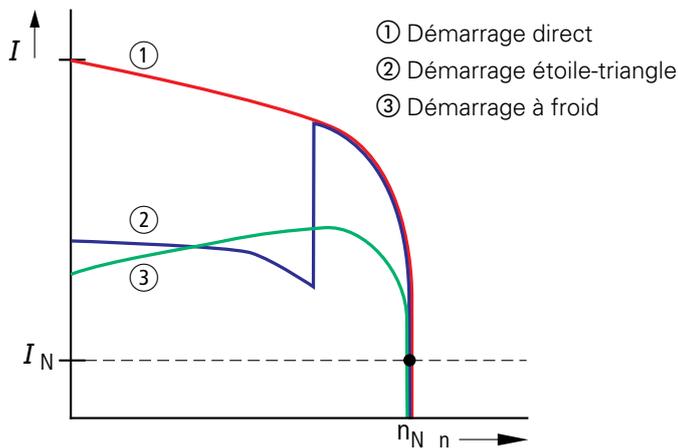


Figure 10 : Grâce à leur limite de courant réglable, les démarreurs à variations de fréquence réduisent la charge exercée sur l'alimentation principale avec un courant d'entrée élevé comme avec le démarrage direct ou les crêtes de courant comme dans le cas des démarreurs étoile-triangle, et prévient ainsi les parasites comme les creux de tension. Source : Eaton (page d'accueil)

Le choix, parmi les trois modèles de démarreur, du mieux adapté à l'application de l'utilisateur ne peut être clairement défini qu'après une analyse détaillée des paramètres du système (ex. : spécifications du projet, profil de charge, dimensions physiques), des exigences fonctionnelles (alimentation, capacité de charge nette, coût d'investissement) et des conditions de fonctionnement (productivité de l'usine, qualité du processus, coûts d'exploitation).¹⁵ Pour les applications à vitesse fixe, notamment, les démarreurs sont non seulement la solution la plus abordable, mais aussi la plus efficace par comparaison avec les variateurs de fréquence – indépendamment de la classe IE du moteur (IE2/IE3). Pour parvenir à la meilleure solution d'automatisation, il est donc toujours important de tenir compte de l'ensemble des facteurs liés au système. Ce n'est pas demain la veille, malgré ce qu'ont déclaré certains, que les contacteurs ou les démarreurs seront bannis de l'automatisation industrielle. Après tout, l'association d'un moteur IE3 et d'un contacteur revient bien moins cher qu'un dispositif IE2 équipé d'un variateur de fréquence. En outre, la majorité des systèmes d'entraînement équipés d'un dispositif de commande en chaîne fermée continuent à être dotés d'un contacteur d'alimentation principale.

Résumé : De tous les types de démarreurs, les démarreurs à variations de fréquence sont ceux qui conviennent le mieux pour réduire les charges de pointe dans les systèmes d'entraînement électriques à vitesse fixe ou à faible fréquence de commutation. Les pompes des réservoirs d'eau, les agitateurs des stations d'épuration et les systèmes de transport à charge constante sont des exemples d'applications typiques.

B) Démarreurs à vitesse variable (VSS) et variateurs de fréquence :

Augmenter le rendement énergétique d'un système implique toujours une combinaison entre l'amélioration du rendement énergétique des différents composants et une analyse indépendante du produit du système dans son ensemble.¹⁶

Les démarreurs à vitesse variable (VSS) constituent une nouvelle catégorie de dispositifs utilisés pour contrôler les

moteurs asynchrones. D'un point de vue fonctionnel, ils peuvent être placés n'importe où entre les démarreurs et les systèmes d'entraînement à fréquence variable actuels, car ils combinent les avantages de ces deux catégories existantes (la simplicité d'utilisation d'un démarreur et la vitesse variable fournie par un système d'entraînement à fréquence variable). De ce fait, ils sont utilisés pour des applications simples dans lesquelles des vitesses variables sont requises et pour lesquelles les fonctionnalités offertes par un système d'entraînement à fréquence variable classique est inutile, voire trop complexe.

Depuis plusieurs décennies, les méthodes mécaniques de contrôle des flux de liquides et de gaz ont été la seule manière d'ajuster les débits à la demande d'un processus. Ici, le moteur tourne presque en permanence à la vitesse nominale requise pour le débit maximum. Les soupapes et les accélérateurs utilisés pour le contrôle mécanique représentent des sources de perte de conversion, généralement sous forme de chaleur. De nos jours, la vitesse d'un système d'entraînement peut être contrôlée directement à l'aide d'un variateur de fréquence, de manière à ce que le débit d'un liquide ou d'un gaz soit ajusté en fonction de la demande immédiate.¹⁷ Malgré leurs propres pertes de chaleur, les démarreurs à vitesse variable (VSS) et les variateurs de fréquence améliorent généralement le rendement énergétique moyen d'une application sur l'intégralité de la gamme de fonctionnement.

La limitation réglable du courant prévient les crêtes de courant importantes dans l'alimentation électrique principale et les charges élevées dans les composants mécaniques de la machine et des systèmes. En plus d'un démarrage sans à-coups, le démarreur à vitesse variable (VSS) et le variateur de fréquence peuvent également permettre de contrôler le moteur asynchrone triphasé avec une vitesse continue (fréquence). Tandis que les moteurs directement raccordés à l'alimentation principale ne peuvent atteindre leurs conditions de fonctionnement idéales qu'au point de fonctionnement à l'état stable (= spécifications figurant sur la plaque signalétique), ils peuvent être utilisés sur toute la plage de

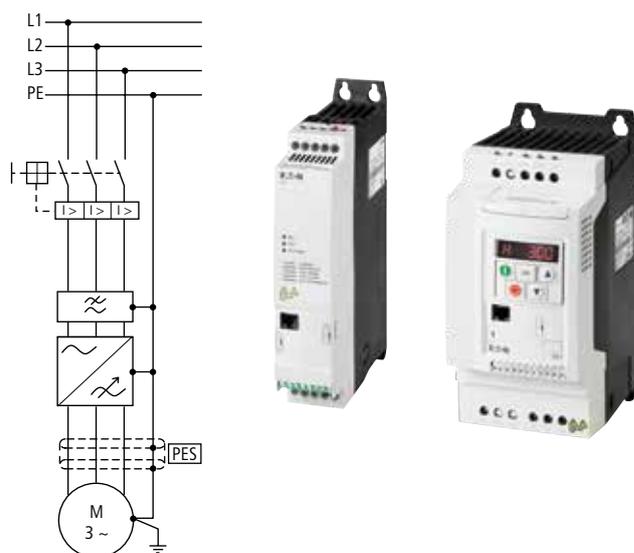


Figure 11 : Système d'entraînement du moteur, démarreur à vitesse variable (VSS) et variateur de fréquence

¹⁵ Capiel (Association européenne des fabricants d'appareils de commutation et de contrôle basse tension) Journal, « What about control gear? Electric motor system efficiency », 2011, http://capiel.eu/data/Journal_CAPIEL_MOTEUR-2_EN.pdf

¹⁶ Capiel (Association européenne des fabricants d'appareils de commutation et de contrôle basse tension) Journal, « What about control gear? Electric motor system efficiency », 2011

¹⁷ Alfred Mörx, conférence intitulée « Increasing Energy Efficiency in Drive Engineering in the Light of European Directives and Regulations », Eaton Vienne, 2013 [en allemand]

vitesse avec un variateur de fréquence. Le rapport tension/fréquence (U/f) constant garantit des points de fonctionnement indépendants avec le couple de charge nominal (M_N). En adaptant la vitesse de rotation au processus de production et la compensation des interférences externes, le système d'entraînement à fréquence contrôlée garantit une plus longue durée de vie et une sécurité fonctionnelle.¹⁸

Le potentiel d'économies d'énergie lié à l'utilisation des variateurs de fréquence dépend des facteurs suivants : type de charge entraînée, degré d'optimisation du rendement énergétique de la machine par le variateur de fréquence et temps pendant lequel le système fonctionne sous une charge partielle. Les variateurs de fréquence sont particulièrement efficaces dans les applications impliquant des charges alternatives ou des vitesses variables.

Les courbes caractéristiques pour le moteur et la machine (ex. : pompe) sont généralement fournies sous forme d'une interaction entre la vitesse (n) ou le couple (M) et la puissance (P). Lorsqu'il s'agit d'économiser de l'énergie avec des variateurs de fréquence, les machines et les systèmes dans lesquels la relation entre la vitesse (n) et le couple (M) est quadratique avec une relation plus que linéaire avec la puissance (P) sont particulièrement intéressants. Cela inclut les applications comme les pompes centrifuges et les ventilateurs. Dans le monde de l'ingénierie des systèmes d'entraînement, elles sont connues sous le nom de machines à flux continu. Le principal facteur permettant d'économiser de l'énergie ici est la relation cubique entre la vitesse et la puissance (P proportionnelle n^3) : on a ainsi, par exemple, une pompe qui fonctionne à 50 % de sa vitesse maximale en n'utilisant que 1/8^{ème} de la puissance nécessaire à pleine vitesse. Cela signifie qu'une petite réduction de la vitesse suffit pour réaliser d'importantes économies. Une réduction de la vitesse de 20 % permet de réaliser 50 % d'économies (voir la figure 12), car la consommation électrique du moteur est réglée avec précision de manière à répondre aux exigences réelles du processus.¹⁹

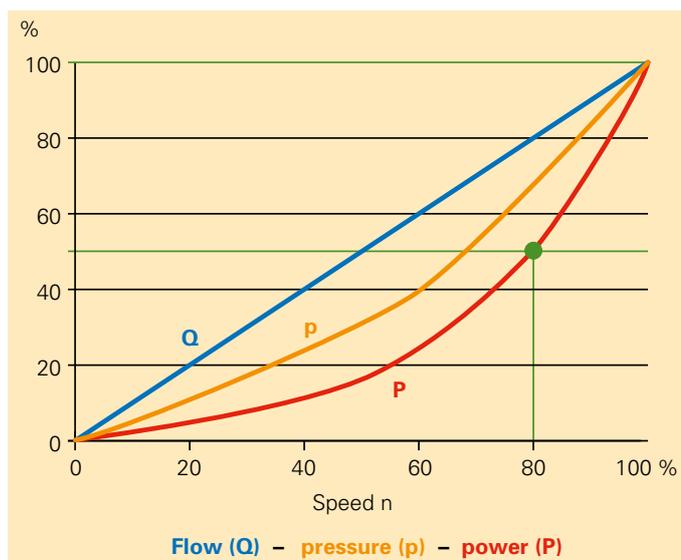


Figure 12 : Relation (en pourcentage) entre le débit (Q), la pression (p), la puissance (P) et la vitesse (n) dans les machines à flux continu (schéma), source : diam-consult

18 Jörg Randermann, « Starting and Control of Three-Phase Asynchronous Motors », 2010

19 Alfred Mörx, conférence intitulée « Increasing Energy Efficiency in Drive Engineering in the Light of European Directives and Regulations », Eaton Vienne, 2013 [en allemand]

À première vue, le démarreur à vitesse variable (VSS) et le variateur de fréquence semblent être les moyens les plus onéreux de contrôler la vitesse des moteurs asynchrones. Le coût d'acquisition plus élevé que les démarreurs et les procédures d'installation supplémentaires en sont les principales raisons. Mais, pendant l'exploitation, au plus tard le démarrage à variations de fréquence associé au rendement énergétique et à l'optimisation du processus révèle ses avantages économiques²⁰. Ceci est particulièrement vrai pour les pompes et les ventilateurs, comme le démontre l'exemple suivant :

Un système de pompage requiert un débit variable. Il est possible de modifier le débit en : (a) utilisant un moteur à vitesse constante et un papillon des gaz pour ajuster le débit ou en (b) utilisant un système d'entraînement équipé d'un dispositif de commande en chaîne fermée qui adapte la vitesse de la pompe aux besoins. Le cycle typique d'une pompe est le suivant : 100 % du débit pendant 6 % du temps, 75 % du débit pendant 15 % du temps, 50 % du débit pendant 35 % du temps, 25 % du débit pendant 44 % du temps. Contrôler la pompe au moyen d'un papillon des gaz entraîne de fortes pertes et un mauvais rendement énergétique du système. Avec un contrôle de la vitesse basé sur la charge obtenue au moyen d'un variateur de fréquence, ces pertes peuvent être considérablement réduites, d'où des économies d'énergie importantes et une réduction considérable des coûts d'exploitation (voir la figure 13).

Dans cet exemple, la puissance effective de la pompe est toujours de 100 %. Avec un papillon des gaz, une énergie égale à 2,85 fois la puissance effective doit être fournie ; avec un contrôle électronique de la vitesse, ce chiffre n'est que de 1,6 fois la puissance.

Résumé : Augmenter le rendement à l'aide de démarreurs à vitesse variable (VSS) et de variateurs de fréquence constitue la méthode idéale pour les applications à vitesse ou charge variable. Contrôler la vitesse en fonction de la charge permet de réaliser des économies considérables. Les applications possibles incluent les systèmes de pompage et de ventilation en circuit fermé sans papillon des gaz, les systèmes de transport à charges variables, les éléments de contrôle final des machines-outils.²¹

20 Jörg Randermann, « Starting and Control of Three-Phase Asynchronous Motors », 2010

21 La distinction faite ici entre les applications avec vitesses/charges constantes et variables est simpliste et fournie uniquement afin d'illustrer le sujet du rendement énergétique. Dans les systèmes plus complexes comme les applications de CVC des grands immeubles, dans les systèmes de manipulation de matériaux ou dans les systèmes d'approvisionnement en eau, on utilise naturellement plusieurs dispositifs de contrôle différents. Ces systèmes complexes, toutefois, ne jouent qu'un rôle subalterne dans le contexte actuel et ne seront donc pas abordés plus en détails.

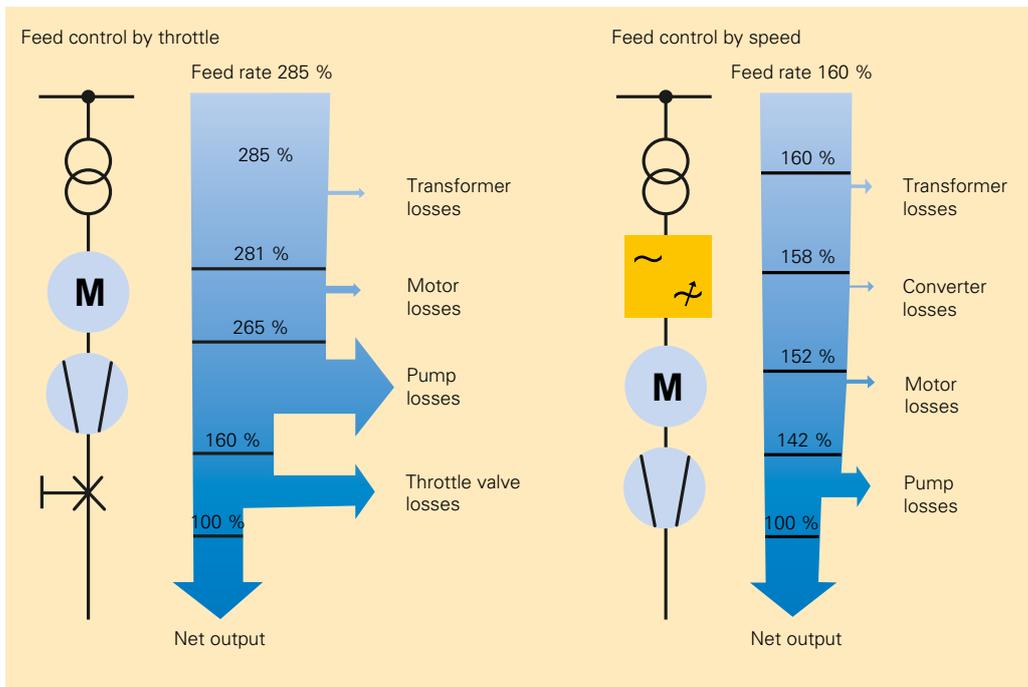


Figure 13 : Comparaison du contrôle d'un système de pompage avec papillon des gaz mécanique et variateur de vitesse électrique, source : ZVEI



Figure 14 : La nouvelle gamme PowerXL d'Eaton

Conclusion :

Au plus tard lors de l'adoption de la directive ErP 2009/125/CE par l'Union européenne, les industriels seront de plus en plus obligés de réduire leur consommation d'énergie ainsi que leurs émissions de CO₂, notamment dans le secteur des systèmes d'entraînement électriques. Des solutions d'automatisation comme les démarreurs de moteur et les variateurs de fréquence peuvent apporter une contribution importante dans ce domaine, à condition d'être déployées correctement. Les utilisateurs doivent tenir compte des trois principaux problèmes s'ils veulent effectivement tirer parti des potentiels d'économies dans le domaine des systèmes d'entraînement électroniques :

1. **Le choix de la bonne technologie d'entraînement est un facteur de succès essentiel.** Il existe deux grands types d'applications dans le domaine des systèmes d'entraînement électriques, chacun avec ses propres solutions d'automatisation.

- Les démarreurs constituent la solution offrant le meilleur rendement énergétique pour les applications à vitesse fixe ou nécessitant une faible fréquence de commutation.
- Le contrôle électrique de la vitesse du moteur à l'aide d'un variateur de fréquence est le meilleur choix pour les applications à vitesse variable ou impliquant des charges alternatives importantes.

2. **Du composant au système :** Le rendement énergétique doit toujours être considéré comme une interaction entre tous les composants et pas limité à un seul dispositif. L'utilisation de composants offrant un meilleur rendement énergétique est une bonne idée en soi, mais ce n'est pas suffisant pour maximiser le rendement énergétique de l'intégralité du système. C'est pourquoi une analyse complète de la consommation d'énergie portant sur l'intégralité du système doit être réalisée afin d'identifier la meilleure solution – variateur de fréquence ou démarreur – pour augmenter le rendement énergétique de l'application de l'utilisateur. Ce n'est qu'alors que la solution d'automatisation offrant la meilleure amélioration du rendement global du système et la portée du potentiel d'économies pourront être déterminées avec certitude.

3. **D'une réflexion à court terme à une réflexion à long terme** Cela vaut la peine d'investir dans des technologies offrant un bon rendement énergétique, comme les moteurs IE3. Même si la modernisation d'un système peut sembler coûteuse de prime abord, l'utilisation de composants d'entraînement tels que les variateurs de fréquence et les démarreurs à variations de fréquence sont bénéfiques à long terme, compte tenu des économies réalisées. Si le coût total sur toute la durée du cycle de vie d'un dispositif est pris en compte, l'investissement est généralement amorti en très peu de temps. Bien que cela ne soit pas encore exigé par la loi, cela vaut la peine d'investir dans la technologie IE3 en y associant des inverseurs ou des démarreurs car cela améliore la compatibilité avec les futures modifications qui seront apportées au système.

Auteur : Heribert Joachim, chef de projet Systèmes d'entraînement, à Eaton (Bonn)

Ouvrages consultés

- Alfred Mörx, « Increasing Energy Efficiency in Drive Engineering in the Light of European Directives and Regulations », Eaton Vienne, 2013 [en allemand]
- Almeida, A.T. Ferreira, Fong, J., Fonseca, P., « EUP Lot 11 Motors » ; ISR-Université de Coimbra, Février 2008
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB : « Energy balance evaluation tables from 1990 to 2011 ». [en allemand]
- Capiel (Association européenne des fabricants d'appareils de commutation et de contrôle basse tension) Journal, « What about control gear? Electric motor system efficiency », 2011, http://capiel.eu/data/Journal_CAPIEL_MOTEUR-2_EN.pdf
- Jörg Randermann, « Starting and Controlling Three-Phase Asynchronous Motors », 2010 [en allemand]
- Directive 2005/32/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.
- Directive 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits utilisant de l'énergie
- Agence fédérale de protection de l'environnement, consommation d'énergie par source et par secteur, mars 2013, <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=5978>
- Agence fédérale de protection de l'environnement, communiqué de presse n° 53/2009, « Energy efficiency in electric motors », 2009 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2009/pd09-053_energieeffizienz_bei_elektromotoren.htm
- Prof. Andreas Binder, « Saving Costs and Energy with Efficient Electrical Drives », IHK Nuremberg, 20 janvier 2009 [en allemand]
- VDMA / Roland Berger : « How the engineering sector contributes to energy efficiency », 2009 [en allemand]
- Règlement de la Commission européenne (CE) 640/2009 du 22 juillet 2009 mettant en application la directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil européen relative aux exigences en matière d'écoconception applicables aux moteurs électriques
- ZVEI, sur la base du rapport industriel rédigé en 2007 par McKinsey & Company, Inc. « Costs and Potentials of Greenhouse Gas Abatement in Germany »
- ZVEI, Measuring Technology and Process Automation Division (Division des technologies de mesure et de l'automatisation des processus), dans : ZVEI : Automation, with high-tech for environmental and climate protection – Automation: We make it energy efficient! », 2010 [en allemand]
- ZVEI, Division économique et statistique, 2009, dans ZVEI : Automation, with high-tech for environmental and climate protection – Automation: We make it energy efficient! », 2010 [en allemand]
- ZVEI, « Motors and closed-loop controlled drives – standards and legal requirements for low voltage three-phase motors », 2013 [en allemand]
- ZVEI : Automation, with high-tech for environmental and climate protection – Automation: We make it energy efficient! », 2010 [en allemand]

Eaton s'est fixée pour mission de vous fournir une alimentation fiable, efficace et sûre quand vous en avez le plus besoin. Grâce à leur connaissance incomparable de la gestion de l'alimentation électrique dans les différentes industries, les experts d'Eaton fournissent des solutions intégrées sur mesure qui permettent à leurs clients de relever les défis les plus difficiles.

Notre principal objectif est de vous apporter une solution parfaitement adaptée à votre application. Toutefois, les décideurs exigent bien plus que de simples produits innovants. Ils se tournent vers Eaton pour son engagement sans faille en matière d'assistance personnalisée, avec pour seul objectif de garantir le succès de ses clients. Pour en savoir plus, **rendez-vous sur le site www.eaton.eu/electrical**.

Pour contacter un représentant commercial ou un distributeur/revendeur local d'Eaton, rendez-vous sur le site www.eaton.eu/electrical/customersupport

Eaton Industries GmbH
Hein-Moeller-Str. 7-11
D-53115 Bonn/Allemagne

© 2014 par Eaton Corporation
Tous droits réservés
Imprimé en Allemagne 09/2014
N° de publication : WP040003EN
ip Septembre 2014
Réf. article : 173442



Eaton est une marque commerciale déposée de Eaton Corporation.

Toutes les autres marques commerciales appartiennent à leurs propriétaires respectifs.

SmartWire-DT® est une marque commerciale déposée de Eaton Corporation.



Powering Business Worldwide