Convertisseurs de fréquence

Cinq points importants relatifs à l'utilisation de convertisseurs de fréquence:

- En présence d'un besoin en **puissance variable fréquent** sur une installation: envisager l'utilisation d'un CF.
- Les CF ne doivent être utilisés qu'avec des **entraînements correctement dimensionnés**; ils ne constituent pas des remèdes au surdimensionnement des installations.
- Régulation du régime selon un **critère de besoin univoque à l'aide** des capteurs adéquats: pression, température, débit, volume etc.
- Les **moteurs relativement anciens**, non conçus pour fonctionner avec des convertisseurs, ne sont pas nécessairement appropriés à ceux-ci, en raison d'un risque de défauts d'isolation.
- **Paramétrage soigneux** des valeurs de consigne en fonction du besoin effectif.

Illustration 1: Convertisseur de fréquence (CF).

Le cahier technique 25 facilite la prise de décision lorsqu'il s'agit de déterminer si, pour des systèmes d'entraînement ayant des charges variables, l'intégration d'un convertisseur de fréquence (CF) est pertinente, rentable et permet d'économiser de l'énergie. Il permet également de rappeler les éléments à prendre en compte lors de la planification et de l'exploitation de CF. Un CF engendre toujours une perte d'énergie supplémentaire et réduit en outre le rendement du moteur. C'est pourquoi son utilisation doit être soigneusement étudiée et planifiée, de manière à réduire de façon optimale la consommation d'énergie électrique totale du système d'entraînement en termes de coût.

IMPACT ENERGY

suisseénergie

Le système d'entraînement électrique

Le convertisseur de fréquence est un élément de l'ensemble du système d'entraînement électrique, servant à la régulation électronique du régime. L'adaptation du régime à la valeur de la charge requise, et la réduction ainsi obtenue du besoin en puissance électrique, permettent d'économiser de l'énergie.

En général, un convertisseur peut être utilisé pour optimiser l'exploitation et pour économiser de l'énergie en amont de tout nouveau moteur. Toutefois, il existe également des cas dans lesquels il s'avère peu ou non pertinent.

- **S'il s'agit uniquement de permettre le démarrage progressif** d'un moteur, et que celui-ci peut ensuite fonctionner à la fréquence de secteur de 50 Hz, un démarreur progressif est la variante la plus avantageuse et la plus efficiente. Dans certaines applications, un CF est requis au démarrage, pendant un bref moment, pour un démarrage lent. Dans ce cas, pour des raisons d'efficience, le CF peut-être court-circuité à l'aide d'un circuit de dérivation après la synchronisation sur le secteur.
- **Lorsque des moteurs relativement anciens**, qui n'ont pas été conçus pour fonctionner avec un convertisseur, sont alimentés à l'aide d'un CF, les flancs de commutation de la tension qui se forment peuvent rapidement endommager l'isolation des bobinages de stator. Le surrégime est limité. En présence de régimes plus faibles, un refroidissement extérieur peut être requis. Lorsque de tels rééquipements comprennent un CF et un filtre sinus, les pertes supplémentaires par le filtre sinus peuvent amoindrir l'effet d'économie d'énergie.

En outre, dans le cas des anciens moteurs, le rendement est généralement moins bon. Un nouveau moteur IE3 est souvent la meilleure solution. C'est pourquoi il est généralement préférable de renoncer à rééquiper un ancien moteur avec un CF.

- **Des régimes constants définis de façon fixe** en dessous (ou parfois même au-dessus) de la fréquence de secteur peuvent être atteints avec un CF, mais peuvent également être obtenus de façon plus efficiente et plus économique avec la démultiplication fixe d'une courroie de transmission ou d'un entraînement.
- **Deux régimes constants fixes** (p. ex. nuit/jour) étaient auparavant souvent obtenus à l'aide de vannes papillon très peu efficientes, ou de moteurs à pôles commutables. Aujourd'hui, les CF permettent d'obtenir une régulation de charge variable en fonction de la pression, de la température, de la qualité de l'air et éventuellement du programme de production journalier etc.
- **Surdimensionnement:** Les systèmes d'entraînement qui, pour la charge d'exploitation maximale, n'atteignent jamais plus de 75% de la puissance nominale du moteur ou de l'application, et qui n'utilisent en outre au démarrage jamais plus de 120% de la puissance, sont surdimensionnés et fonctionnent avec des rendements défavorables. Un CF n'est ici d'aucune aide.

L'entraînement et l'application doivent être correctement dimensionnés, afin que le système d'entraînement fonctionne à son point d'exploitation optimal.

- **Remplacement des moteurs:** Les moteurs efficients possèdent, par rapport aux moteurs moins efficients ayant le même nombre de pôles, un régime légèrement

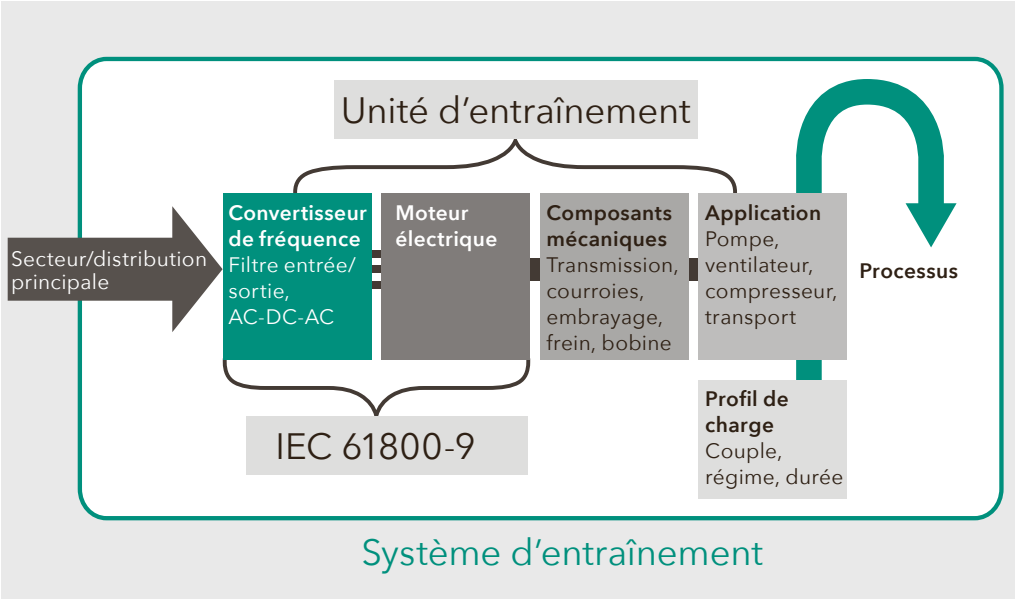


Illustration 2: Système d'entraînement électrique (Source: EMSA 2014). La norme IEC 61800-9-2 (2017) décrit les tests et les classes d'efficacité des convertisseurs de fréquence et des moteurs avec convertisseur de fréquence.

supérieur. Un nouveau moteur IE4 présente moins de glissement et tourne (sans CF) env. 1 à 3% plus vite que le vieux moteur inefficient. Il en résulte, par exemple dans le cas d'un ventilateur ou d'une pompe, un débit volumique trop élevé, c.-à-d. une fourniture inutilement trop importante et ainsi une consommation d'énergie excessive. Cela doit être pris en compte dans le cas d'une exploitation sans CF, car en présence de charges ayant des caractéristiques quadratiques (p. ex. pompes, ventilateurs), la puissance absorbée augmente à la puissance 3 par rapport au régime. Ce phénomène peut être évité par exemple à l'aide d'une adaptation ou d'un redimensionnement de la transmission. Sans une adaptation de la transmission ou l'utilisation d'un CF, l'économie d'énergie réalisée peut être réduite à néant par l'accroissement du régime. L'utilisation d'un CF uniquement à des fins de réduction continue du régime n'est pas pertinente.

Application parallèle (p. ex. circuit séquentiel de pompes avec plusieurs pompes, dans des installations de traitement des eaux usées avec nuit/jour 1:10; redondance): une analyse du système par des spécialistes est requise pour l'optimisation. La plupart du temps, il suffit de réguler en fonction de la charge, à l'aide d'un CF, l'une des nombreuses pompes connectées en parallèle, les autres pompes étant activées selon le besoin sous forme de puissance constante.

Introduction

Qu'est-ce qu'un convertisseur de fréquence?

Un **convertisseur de fréquence** (CF) permet de commander le régime des entraînements électriques, en générant à partir de la tension alternative (p. ex. 400 V) et de la fréquence (50 Hz) une tension alternative variable en fréquence et en amplitude, pour l'alimentation de moteurs électriques. Cela permet de réaliser un système de régulation doté de capteurs pour la pression, la température etc., qui fournit au bon moment la puissance précisément requise sous forme de débit volumique pour une pompe, un ventilateur etc.

Ce cahier technique aborde le thème de la commande électronique du régime par des convertisseurs de fréquence, pour des systèmes d'entraînement électriques dans l'industrie, les installations d'infrastructure et les grands bâtiments. Le présent cahier technique ne traite pas des applications suivantes: moteurs utilisés comme alternateurs, moteurs à courant continu, adaptateurs de charge avec entraînements mécaniques, moteurs à pôles commutables, démarreurs progressifs et systèmes d'entraînement des véhicules électriques. Ce cahier technique vise à réduire la consommation électrique des systèmes d'entraînement en équipant les installations d'un CF adapté de façon optimale à celles-ci. L'optimisation de l'ensemble du système d'entraînement comprenant le moteur, la transmission, l'application et le CF doit ainsi être précisément adaptée aux besoins mécaniques et temporels effectifs.

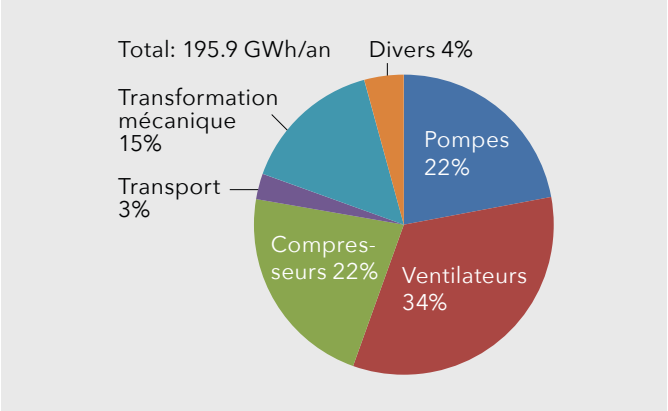


Illustration 3: Part des applications dans la consommation d'énergie pour 18 grandes entreprises industrielles, en 2014.

Public cible

Le public auquel s'adresse ce cahier technique comprend en premier lieu les exploitants et les constructeurs d'installations, les planificateurs, les techniciens et les ingénieurs, dans le domaine industriel et dans le domaine du bâtiment et des installations techniques. Les mandants des installations sont spécialement concernés car ils ont besoin de compétences de coordination et d'anticipation importantes pour planifier, commander, réaliser, moderniser, optimiser et exploiter des systèmes d'entraînement efficients dans les principaux domaines d'application (avec des pompes, des systèmes de ventilation, des compresseurs de froid et à air comprimé, des installations de transport et de processus) (illustration 3).

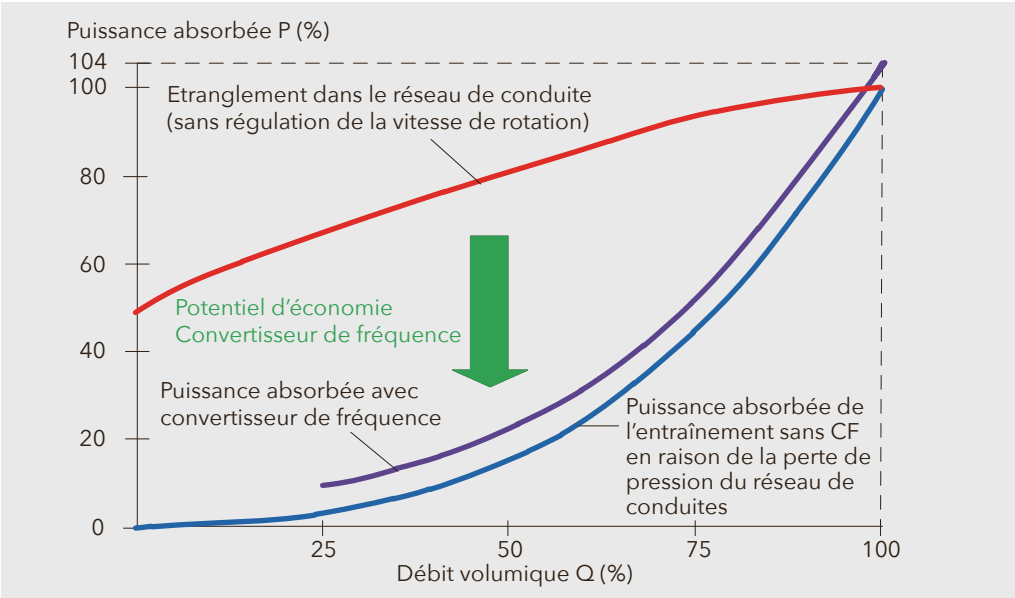


Illustration 4: Potentiel d'économie du transport de fluides avec un CF (source: Topmotors, Cahier technique Pompes 2012).

Importance des convertisseurs de fréquence

La régulation électronique de la charge dans les systèmes d'entraînement avec CF a pris une grande importance depuis l'invention des transistors en 1948, le développement des thyristors en 1958 et leur introduction dans des régulateurs de charge fabriqués en série il y a 50 ans. Elle concerne de larges applications, avec des charges toujours plus élevées. Dans les chemins de fer, les ascenseurs et les machines industrielles, la régulation progressive du régime a rapidement fait partie de l'état de la technique et a relégué à l'arrière-plan les technologies précédentes (p. ex. moteur à courant continu avec redresseur à thyristor ou engrenage à changement de vitesse mécanique). Aujourd'hui, les convertisseurs de fréquence ont leur place dans de nombreuses applications petites ou plus grandes, car ils permettent un démarrage progressif à un couple élevé, une accélération progressive et sans à-coups et une régulation en fonction de la charge permettant d'économiser de l'énergie électrique.

Les convertisseurs de fréquence possèdent un grand potentiel d'efficience pour des installations dont le couple suit une allure quadratique: pompes en circuit fermé, installations de ventilation etc.

Etonnamment, selon des études réalisées par Topmotors sur 4142 entraînements dans l'industrie suisse, seuls 20% env. de tous les systèmes d'entraînement sont équipés de CF (Illustration 5), bien qu'env. 50% d'entre eux soient appropriés à cela (2013). Il s'agit principalement d'installations récentes (âgées de moins de 25 ans) dans une plage de puissance moyenne, entre 1 et 100 kW.

Les CF ont également une grande importance dans les installations de production d'électricité (hydraulique, éolien) et en tant qu'onduleurs pour des installations photovoltaïques, dans lesquelles des apports variables de vent et de soleil doivent être transformés de façon optimale en courant alternatif adapté au secteur (ces cas ne sont pas traités ici). En outre, dans une exécution adéquate (avec Active End), ils peuvent également être utilisés dans des applications industrielles en tant que systèmes de freinage avec réinjection d'électricité.

Rôles des personnes concernées

Si l'on décide d'utiliser un CF, la liste suivante propose une répartition possible des rôles. Une personne ou une société peut assumer plusieurs de ces rôles.

- **Propriétaire de l'installation:** Définit les conditions d'utilisation (démarrage, durée d'exploitation, besoin en charge et tracé de la charge) ainsi que les conditions de service et d'entretien.
- **Exploitant de l'installation:** Mesure, pendant l'exploitation d'installations existantes, le besoin en puissance électrique en fonction de la charge requise, définit les profils de charge typiques au démarrage et dans la durée et définit les critères de régulation.
- **Ingénieur planificateur:** Mesure la puissance maximale de la machine et définit le type et la puissance du moteur et du CF, élabore et contrôle les coûts du cycle de vie des variantes avec et sans CF. Il établit les documents d'appel d'offres et réalise des comparaisons d'offres, surveille la mise en service.
- **Constructeur de l'installation:** Intègre le CF, le moteur (avec la transmission) et le concept de régulation dans l'installation, aide à la programmation de la charge et aux tests à la réception, optimise l'installation en termes d'efficience et d'économie de matériaux, est responsable de la qualité du produit.
- **Fournisseur du moteur:** Fournit un moteur approprié à une exploitation avec CF, contrôle le champ d'application et d'exploitation, aide au dimensionnement et met à disposition les données de rendement.
- **Fournisseur du CF:** Garantit la combinaison optimale entre le CF et le moteur, aide à la programmation confor-

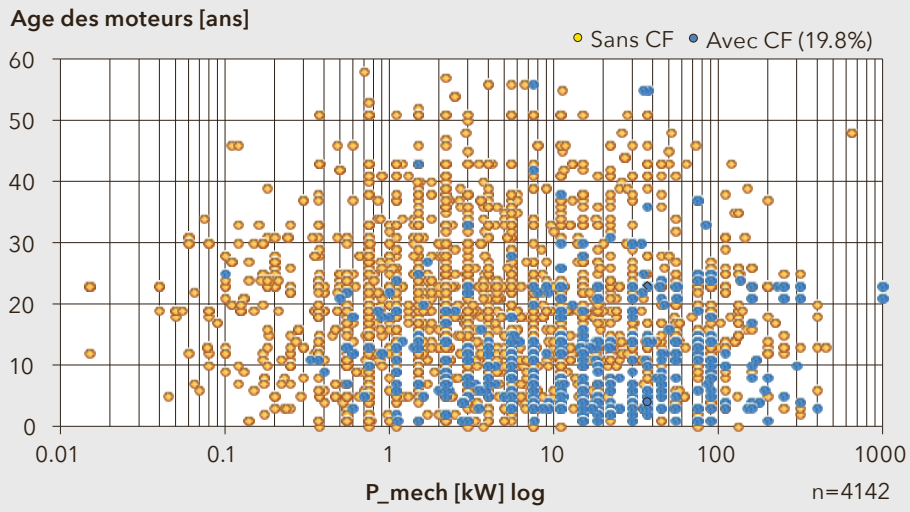


Illustration 5: L'exploitation de 4142 systèmes d'entraînement montre que 19.8% d'entre eux fonctionnent avec un CF (Source: Easy 2013).

mément au critère de régulation sélectionné. Il aide au réglage, au paramétrage et à l'optimisation des grandeurs de régulation, met à disposition les données de rendement relatives au CF.

Le fait qu'une personne ou une société soit à même de prendre en charge le plus de rôles possibles facilite la coopération, l'optimisation de l'installation et les éventuelles questions de garantie.

Concepts de base

Eléments de base

Un convertisseur de fréquence (CF) se compose de trois modules principaux: le convertisseur de courant (CC) côté moteur, le convertisseur de courant côté secteur et le circuit intermédiaire. Le circuit intermédiaire se compose principalement d'un condensateur, qui lisse la tension continue du circuit intermédiaire et découple ainsi la partie côté secteur de la partie côté moteur. Le convertisseur côté moteur est un onduleur. Il crée, à partir de la tension continue dans le circuit intermédiaire, une tension alternative triphasée dotée d'une amplitude et d'une fréquence réglables en fonction du régime souhaité du moteur. Le convertisseur côté secteur est chargé de créer, à partir de la tension alternative monophasée ou triphasée du réseau d'alimentation, la tension continue du circuit intermédiaire. Pour cela, différentes technologies peuvent être utilisées.

Le choix de la technologie du convertisseur côté secteur détermine notamment le comportement du CF en termes de rétroactions du secteur (harmoniques, cos φ) et de possibilités d'utilisation (p.ex. capacité de réinjection). Les différentes technologies sont expliquées et comparées ci-après. Pour effectuer la comparaison, on abordera surtout la capacité de réinjection, les harmoniques et le facteur de puissance ou cos φ.

Il existe également des convertisseurs avec circuit intermédiaire de courant (CI) et convertisseur direct. Ces deux éléments étant rares, nous nous concentrerons dans ce document sur le convertisseur le plus fréquemment utilisé avec circuit intermédiaire de tension.

Capacité de réinjection

Un moteur électrique peut en principe tourner dans les deux sens et fonctionner aussi bien en tant que moteur qu'en tant qu'alternateur. En d'autres termes, il permet d'entraîner une charge ou de la freiner. L'onduleur côté moteur peut également conduire l'énergie dans les deux sens. Le fait que le mode de freinage soit ou non possible avec un CF dépend de la construction du convertisseur côté secteur: celle-ci détermine si l'énergie de freinage peut être réinjectée dans le secteur, si elle est détruite dans une résistance ou si aucun freinage électrique n'est possible avec le CF.

La réinjection est également appelée récupération. Le mode à quatre quadrants (illustration 7) signifie que dans les deux sens de rotation, l'entraînement et le freinage sont tous deux possibles.

La réinjection est intéressante notamment lorsque des énergies cinétiques importantes doivent être fréquemment freinées. C'est notamment le cas pour les:

- Grues (abaissement de la charge)
- Systèmes de transports verticaux, obliques et horizontaux
- Centrifugeuses rapidement freinées
- Bancs d'essai (machines de charge avec freinage)
- Véhicules et téléphériques (non abordés ici)

La réinjection augmente le rendement total, et aucune chaleur à évacuer ensuite n'est produite lors du freinage. Etant donné que les convertisseurs capables de réinjecter du courant dans le secteur présentent des pertes légèrement plus élevées et génèrent des surcoûts, la capacité de réinjection n'est pas toujours intéressante. Par exemple, dans le cas des ventilateurs qui ne sont freinés électrique-

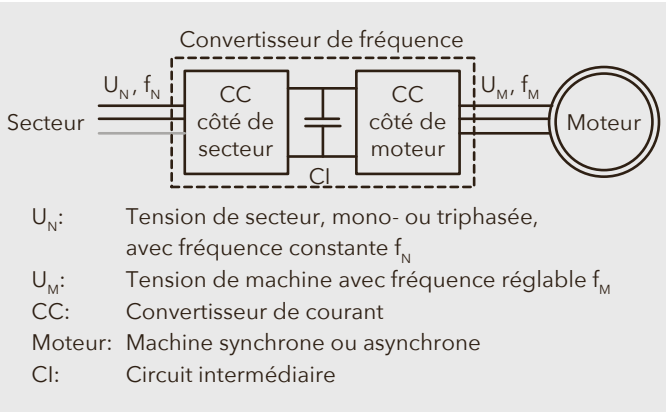


Illustration 6: Convertisseur de fréquence avec circuit intermédiaire de tension et moteur.

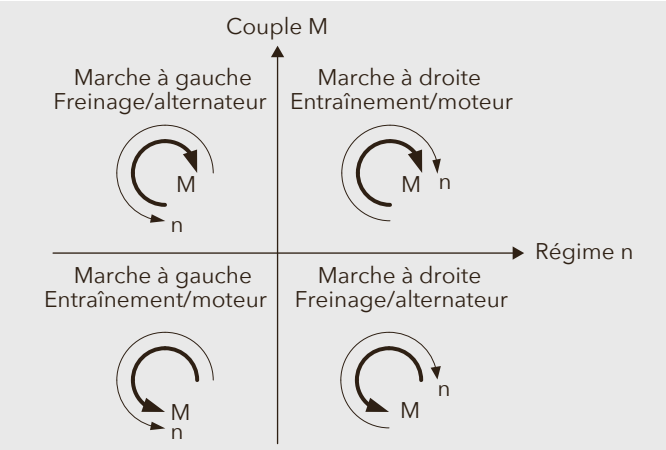


Illustration 7: Fonctionnement à quatre quadrants d'un moteur électrique.

ment que dans le cas d'un arrêt d'urgence, l'investissement n'est pas intéressant sur le plan financier et énergétique.

Harmoniques

Dans les courants d'entrée et de sortie d'un convertisseur de fréquence, on observe, outre la composante fondamentale souhaitée, également des harmoniques, car les différents convertisseurs de courant exécutent des processus de commutation (à haute fréquence). Une harmonique est une onde sinusoïdale dotée d'une fréquence correspondant à un multiple de la fréquence de la composante fondamentale.

Filtres sinus

Les moteurs relativement anciens, conçus pour une utilisation sur le secteur avec une tension sinusoïdale, tendent souvent à provoquer des défauts d'isolation en cas d'alimentation par un CF. C'est pourquoi il existe également des CF dotés de ce qu'on appelle des filtres sinus. Ceux-ci filtrent les harmoniques et créent, à partir de la tension hachée représentée en bas dans l'illustration 9, une tension quasiment sinusoïdale. Ces filtres possèdent toutefois également leurs propres pertes et engendrent des coûts supplémentaires. Néanmoins, les pertes dans le moteur sont réduites par l'absence des harmoniques.

Filtres CEM

La CEM (compatibilité électromagnétique) signifie que des appareils électriques ne se parasitent pas mutuellement en raison d'effets électromagnétiques. D'une part, ils ne doivent émettre aucun parasitage magnétique non admissible, et d'autre part ils ne doivent pas se laisser parasiter par leurs propres ondes électromagnétiques ou par les ondes électromagnétiques produites par d'autres appareils. Pour réduire l'émission des ondes électromagnétiques, on utilise souvent ce que l'on appelle des filtres CEM au niveau de l'entrée et/ou de la sortie du CF. Ceux-ci sont nettement plus petits que les filtres sinus et engendrent ainsi des pertes et des coûts plus faibles que ces derniers.

Filtres du/dt

Les filtres du/dt limitent la pente des flancs de tension au niveau de la sortie de l'onduleur.

Facteur de puissance et cos φ

Le facteur de puissance décrit le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Il est compris entre 0 et 1. Il est égal à 1 lorsque le secteur n'est pas sollicité par une puissance réactive. C'est pourquoi il doit rester le plus proche possible de 1.

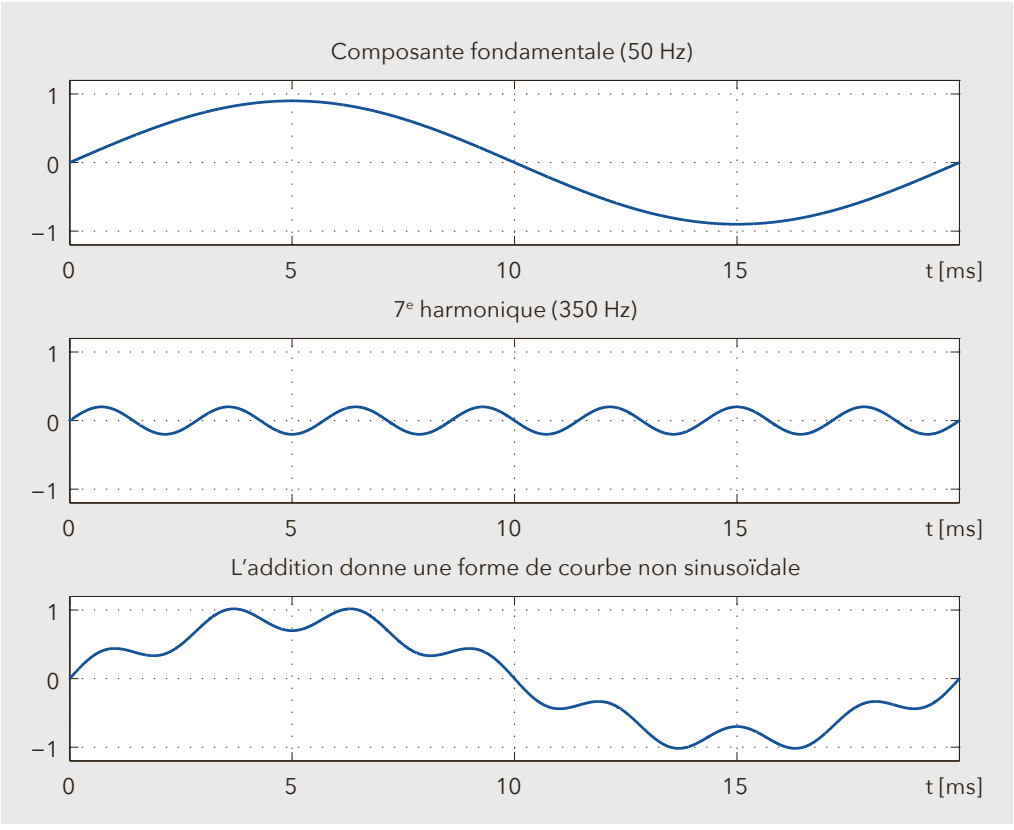


Illustration 8: Illustration d'un signal (en bas) composé d'une composante fondamentale (en haut) et d'un septième harmonique (au centre).

Le cos φ décrit, dans le cas d'une courbe de tension et de courant sinusoïdale, le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Lorsque aucun harmonique n'intervient, le facteur de puissance et le cos φ sont identiques. En présence d'harmoniques, le facteur de puissance est inférieur au cos φ. Généralement, seul le cos φ est indiqué. Les harmoniques sont prises en compte séparément.

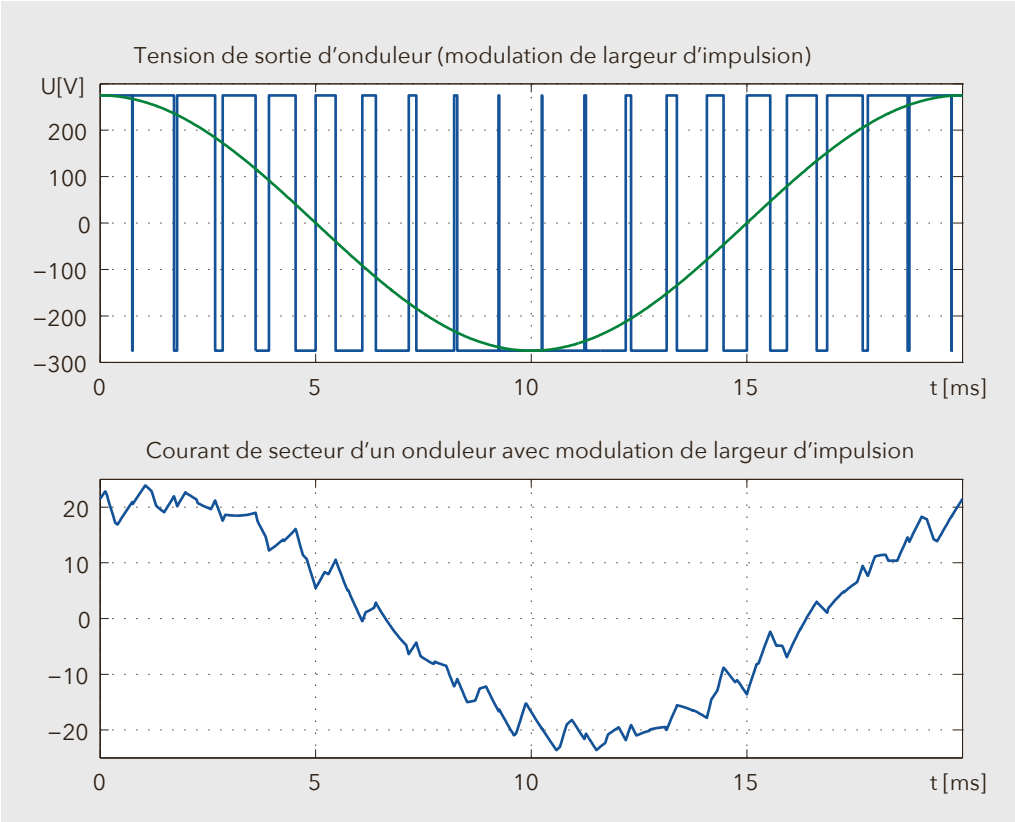


Illustration 9: Tracé temporel de la tension de sortie d'onduleur d'une phase (bleu). La modification de la largeur d'impulsion (modulation de largeur d'impulsion) permet d'imiter au mieux la composante fondamentale souhaitée (vert).
Etant donné que l'onduleur peut uniquement être commuté en va-et-vient, on observe, en plus de la composante fondamentale souhaitée, des harmoniques. Le courant de phase représenté en bas est déjà nettement plus sinusoïdal que la tension, mais possède encore des harmoniques. La fréquence de commutation, dans cet exemple, est relativement faible, à 1000 Hz.

Convertisseur avec circuit intermédiaire de tension

Comparaison des différents types de CF

L'illustration 10 montre un aperçu des différents CF avec circuit intermédiaire de tension. La comparaison concerne le côté secteur du convertisseur et ne dépend aucunement de l'utilisation d'un moteur synchrone ou asynchrone. Les variantes de CF présentées dans l'illustration 10, ainsi que leurs comportements, sont décrits plus précisément ci-après.

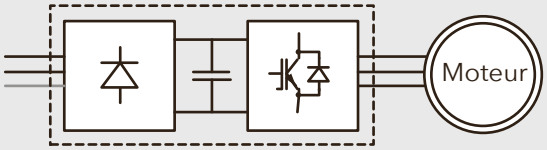
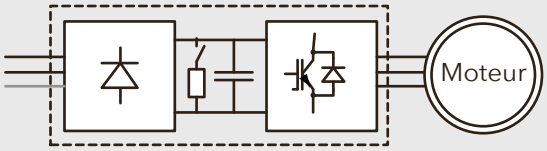
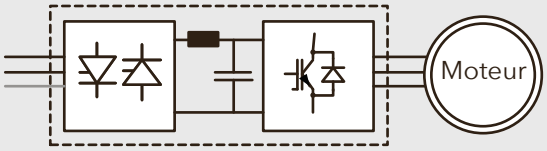
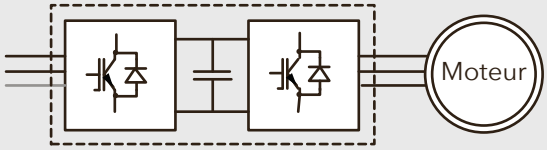
CF avec redresseur à diodes côté secteur

Le côté secteur d'un CF peut être réalisé à l'aide d'un redresseur à diodes. Cette solution présente l'avantage d'être simple, robuste, efficiente et bon marché. Une réinjection de l'énergie de freinage du moteur dans le secteur est dans ce cas impossible.

En présence de puissances inférieures à 2 kW, le pont de diodes est souvent monophasé, en présence de puissances supérieures il est conçu de façon triphasée.

Harmoniques

Le redresseur à diodes montre une forme de courant caractéristique avec des harmoniques typiques. Dans le cas du pont monophasé, tous les harmoniques impaires sont présentes dans le courant de secteur. Dans le cas du pont triphasé, il s'agit également des harmoniques impaires, mais les multiples de 3 sont manquants. Un redresseur a diodes triphasé possède ainsi, outre la composante fondamentale, une 5^{e}, 7^{e}, 11^{e}, 13^{e}, 17^{e} etc. harmonique dans le courant de secteur. Les amplitudes des harmoniques individuelles diminuent à mesure que leur numéro d'ordre

CF avec	Freinage électrique	cos φ	Harmoniques dans le courant de secteur
Redresseur à diodes			
	Non	Très bon	Toutes les impaires. Avec du triphasé, il manque les harmoniques des multiples de trois.
Redresseur à diodes avec hacheur de freinage			
	Oui, l'énergie de freinage est chauffée dans la résistance de freinage du hacheur de freinage.	Très bon	Comme les redresseurs à diodes sans hacheur de freinage.
Redresseur inverseur			
	Oui, avec réinjection de l'énergie de freinage dans le secteur.	Bon	Similaire aux redresseurs à diodes. Légèrement inférieur en raison de l'inductance de lissage dans le circuit intermédiaire.
Côté secteur actif avec onduleur			
	Oui, avec réinjection de l'énergie de freinage dans le secteur.	Très bon, réglable, compensation possible.	Plus la fréquence de découpage est élevée, plus elles sont faibles.

Explication des symboles

Diode. Elle symbolise ici un redresseur mono- ou triphasé doté de diodes.

Thyristor. Les deux thyristors parallèles symbolisent ici un redresseur inverseur doté de thyristors, capable de conduire l'énergie dans les deux sens.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) avec diode antiparallèle. L'IGBT est un semi-conducteur de puissance pouvant être désactivé. Six IGBT et la diode associée permettent de réaliser un onduleur triphasé.

Raccordement au secteur, mono- ou triphasé

Illustration 10: Comparaison de différents CF en fonction de leur comportement sur le secteur.

augmente. En présence de circuits à impulsions relativement élevées, certains harmoniques sont éliminés.
La distorsion totale du courant avec les redresseurs à diodes, également appelée THDI (Total Harmonic Distortion of Current), s'élève à plus de 30%. Il en résulte une distorsion de la tension jusqu'à 3%; des valeurs supérieures ne sont pas admissibles. La pratique montre qu'une distorsion trop élevée du courant donne une distorsion trop élevée de la tension, influence d'autres composants électroniques et installations sur le même secteur et entraîne des pertes accrues dans le secteur et dans les transformateurs.
Les harmoniques que l'on peut trouver dans le courant de secteur d'un CF dépendent en premier lieu du type de redresseur d'entrée utilisé dans le convertisseur.
La réduction des harmoniques peut s'effectuer par l'utilisation de filtres. Si l'on raccorde au secteur des CF côté secteur ou des CF dotés de plusieurs convertisseurs de courant d'entrée via des transformateurs ayant des tensions secondaires à décalage de phase, on obtient des circuits à 6, 12 ou 18 impulsions. Cette technologie permet d'éliminer ou au moins de réduire certains harmoniques.
Valeurs THDI typique pour les redresseurs:

- Redresseur à 6 impulsions: courant fortement distordu, THDI > 30%
- Redresseur à 12 impulsions: courant distordu, THDI > 12%
- Redresseur à 18 impulsions: forme d'onde correcte du courant,
- THDI > 6%

Facteur de puissance, cos φ

Dans le cas du redresseur à diodes, le cos φ est quasiment égal à 1. Dans les très grandes installations, il peut être inférieur de quelques pourcents, car la commutation provoque un léger décalage de phase entre les composantes fondamentales du courant et de la tension.

CF avec redresseur à diodes et hacheur de freinage avec résistance de freinage

Souvent, étant donné que le pont de diodes ne possède aucune capacité de réinjection, on intègre en supplément ce que l'on appelle un hacheur de freinage avec résistance de freinage. Celui-ci permet de freiner le moteur électriquement. L'énergie produite est transformée en chaleur dans la résistance de freinage. Les harmoniques et le cos φ sont les mêmes que dans la version du redresseur à diodes sans hacheur de freinage.

CF avec redresseur inverseur côté secteur

Un redresseur inverseur se compose de deux ponts de thyristors. Un pont est actif lorsque l'énergie passe du secteur au circuit intermédiaire, le second permet à l'énergie de circuler en sens inverse. Cette configuration permet un mode de freinage avec réinjection dans le secteur.

Harmoniques

Les harmoniques dans le courant de secteur d'un redresseur inverseur sont très similaires à ceux d'un redresseur à diodes. Etant donné que dans ce cas, une bobine de lissage doit obligatoirement être installée entre le redresseur et le condensateur, le courant de secteur devient rectangulaire et l'amplitude du x^e harmonique est environ égale à 1/x. Le 5^e harmonique du courant de secteur (250 Hz dans le secteur 50 Hz) possède ainsi une amplitude d'environ 1/5 = 20% du courant de la composante fondamentale, le 7^e environ 1/7 = 14%.

Facteur de puissance, cos φ

Les valeurs typiques du cos φ se situent, en exploitation nominale, entre 0,8 et 0,9. Si, pour des raisons d'efficience, à un faible régime moteur, la tension du circuit intermédiaire est abaissée, ce facteur est nettement inférieur.

CF avec onduleur côté secteur et côté moteur

Côté secteur du CF, on peut utiliser un onduleur. Celui-ci est également appelé «active front end», redresseur actif ou injection active. Techniquement, il s'agit d'un onduleur, comme celui utilisé côté moteur. Comme ce dernier, il peut conduire l'énergie dans les deux sens. Un mode de freinage avec réinjection de l'énergie dans le secteur est donc possible.

Harmoniques

Les harmoniques injectés dans le secteur par un onduleur sont influencés par la fréquence de découpage et le procédé de modulation. La fréquence de découpage prédit la fréquence à laquelle les différents semi-conducteurs sont activés et désactivés. En présence d'une fréquence de découpage élevée, les harmoniques dans le courant de secteur possèdent une fréquence plus élevée et leurs amplitudes sont plus faibles. Par conséquent, les pertes de commutation dans l'onduleur augmentent. Le procédé de modulation décrit la façon dont les commandes de commutation sont générées pour les différents semi-conducteurs. Avec la modulation de largeur d'impulsion, procédé le plus fréquemment utilisé, des harmoniques apparaissent en plus de la composante fondamentale dans la

plage de la fréquence de découpage et des multiples de celle-ci.

Facteur de puissance, cos φ

Un onduleur permet de régler non seulement la puissance active mais également la puissance réactive. La plupart du temps, celle-ci est réglée à zéro afin que le cos φ soit égal à 1. Une soustraction ou une émission de puissance réactive, c'est-à-dire une compensation, et toutefois également possible.

Commande et régulation

Régulation côté secteur

Dans le cas du convertisseur avec circuit intermédiaire de tension, la régulation côté secteur est chargée de maintenir la tension du circuit intermédiaire à la valeur souhaitée. Avec un redresseur à diodes, la tension du circuit intermédiaire est proportionnelle à la tension du secteur et ne doit pas être régulée. C'est seulement lors de l'activation qu'une logique de charge dotée d'une résistance de charge empêche des courants d'activation trop élevés. Le redresseur inverseur, lui, nécessite une régulation. Celle-ci régule la tension du circuit intermédiaire à la valeur souhaitée en plaçant les impulsions d'allumage correctement dans le temps pour l'activation des thyristors.

Lors de l'utilisation d'un onduleur actif, il est nécessaire de disposer d'une régulation qui, via la consommation ou l'émission de puissance active, régule la tension du circuit intermédiaire à la valeur souhaitée. En outre, la régulation peut également réguler la consommation ou l'émission de puissance réactive à une valeur souhaitée, généralement zéro. La puissance est régulée via le courant de secteur. La régulation et la modulation déterminent ainsi les commandes d'activation pour les semi-conducteurs de puissance, de manière à obtenir le courant souhaité et ainsi la puissance souhaitée.

Régulation vectorielle

Pour la régulation du courant, on utilise généralement une régulation vectorielle (Vector Control). Cela signifie que le courant triphasé mesuré est transformé en un pointeur (vecteur). Le régulateur de courant détermine la valeur de consigne de la tension de sortie de l'onduleur et transmet celle-ci à ce que l'on appelle le modulateur. Celui-ci génère les commandes d'activation pour les semi-conducteurs de puissance. Un PLL (phase locked loop) synchronise l'onduleur avec la tension de secteur.

Régulation côté moteur

Côté moteur, différentes méthodes de régulation sont possibles, selon le domaine d'utilisation.

Méthode des caractéristiques U/f

Dans cette méthode, on choisit la fréquence de sortie de l'onduleur en fonction du régime souhaité du moteur. La tension de sortie de l'onduleur est réglée au moyen d'une caractéristique (illustration 11).

Etant donné que la magnétisation du moteur est déterminée par le rapport de la tension sur la fréquence, la tension de sortie de l'onduleur doit être proportionnelle à la fréquence. Cela permet de garantir que le moteur, sur toute la plage de régime (0 jusqu'au régime nominal) fonctionne avec le flux magnétique nominal. Si la fréquence augmente au-delà de la fréquence nominale, la tension ne doit plus ou ne peut plus être davantage augmentée. On observe un affaiblissement du champ. Cela signifie que le

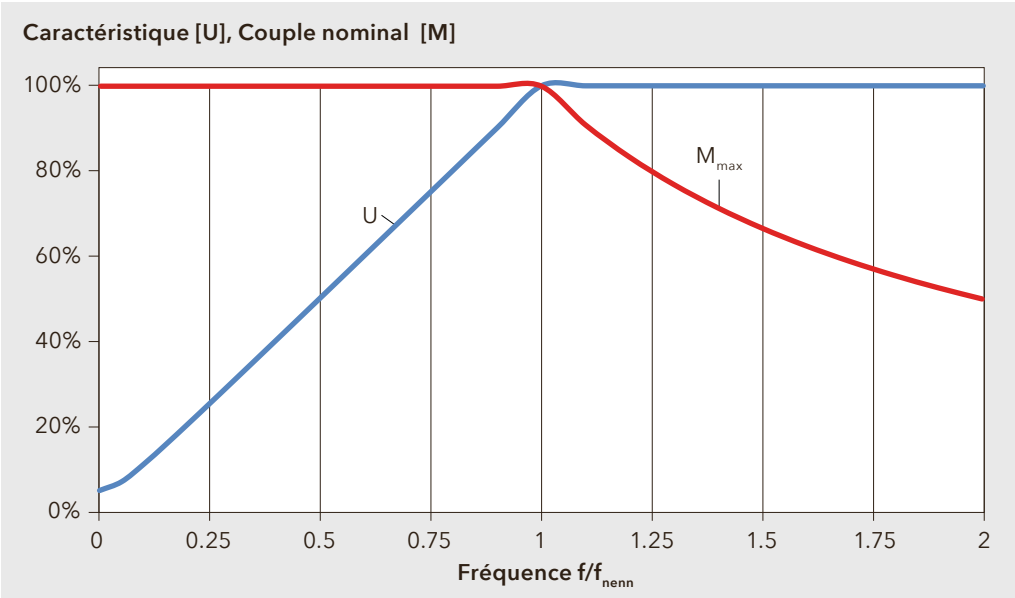


Illustration 11: Exemple d'une caractéristique U/f et du couple nominal M.

champ magnétique ou le flux magnétique est réduit. Par conséquent, le couple M pouvant être atteint est également réduit. Etant donné que la tension de sortie de l'onduleur est réglée en fonction de la fréquence de sortie souhaitée (de façon linéaire jusqu'à la fréquence nominale et la tension nominale), on parle d'une méthode des caractéristiques U/f. L'illustration 11 représente le tracé de la tension en fonction de la fréquence. Elle représente également le couple pouvant être atteint au courant nominal. Au-dessus de la fréquence nominale, celui-ci diminue avec 1/f, car le champ magnétique diminue avec 1/f.
Le moteur se comporte alors comme un moteur sur le secteur, hormis le fait que dans ce cas, en raison de la fréquence variable, le régime peut être réglé. Cette méthode est en réalité une commande. Pour respecter précisément un régime souhaité, une régulation du régime peut venir compléter cette méthode. Cette méthode simple est appropriée à des applications non hautement dynamiques, par exemple des ventilateurs ou des pompes. Très fiable, elle fonctionne même lorsque les paramètres du moteur ne sont pas précisément connus.

Régulation orientée champ (Vector Control)
En présence d'exigences dynamiques relativement élevées, on utilise souvent une régulation vectorielle (Vector Control). Si le système de coordonnées du vecteur est orienté sur le champ magnétique rotatif du moteur, on parle d'une régulation orientée champ. Le flux et le couple du moteur sont régulés via le courant. Une régulation du régime superposée au couple permet de réguler précisément le régime à la valeur souhaitée. Pour ce faire, on dispose de méthodes avec ou sans capteur de régime.
Pour que la régulation orientée champ fonctionne sans problème, les paramètres du moteur doivent être connus. Cela est encore plus important en cas de fonctionnement sans capteur. De nombreux convertisseurs modernes sont toutefois capables de mesurer automatiquement les moteurs lors de la mise en service.

Régulation directe du couple
Une autre méthode est la régulation directe du couple. Dans ce cas, la régulation détermine directement, à partir des écarts entre la valeur de consigne et la valeur réelle, les signaux de commutation pour l'onduleur. La régulation et le modulateur sont regroupés. Cette méthode montre un comportement comparable à celui de la régulation orientée champ avec modulation de largeur d'impulsion, en termes de dynamique, d'harmoniques et de cos φ.

Durée d'utilisation

Les convertisseurs compacts sont aujourd'hui très fiables et, s'ils sont correctement entretenus, sont conçus selon leur puissance pour une durée de vie de **12 à 20 ans**. Les composants exigeant une maintenance sont les ventilateurs de refroidissement et les condensateurs du circuit intermédiaire, ainsi que certaines platines conductrices. (Moteurs: env. 10 à 20 ans, en réalité toutefois quasiment le double; ventilateurs principaux 4 à 6 ans). Eléments critiques en termes de vieillissement: condensateurs (séchage). En fonction de la charge («la chaleur est destructrice»): heures de service élevées et cycles courts etc. Possibilité de remplacement des condensateurs pour les gros CF (au-dessus de 7.5 kW): démontables par des spécialistes. Informations sur les heures de service: requête via la fonction de maintenance. Electronique: les nouveaux appareils sont plus puissants, plus petits, plus intelligents, plus efficients, moins chers, («Demodation»).

La durée de vie est influencée par l'augmentation de la température de service due à une température ambiante accrue, l'augmentation du degré d'encrassement, de la hauteur des installations et de la sollicitation, surtout lorsque celle-ci est cyclique.

Les pannes les plus fréquentes sont dues à **trois phénomènes**; ceux-ci doivent être soigneusement pris en compte pour permettre des temps de fonctionnement suffisamment longs.

- Encrassement dû au non-respect de la classe de protection correspondante.
- Intervalle de nettoyage des nattes de filtration de l'armoire de commande insuffisant.
- Températures accrues de l'air de refroidissement au-dessus de 40 °C, en raison de températures ambiantes élevées ou d'une circulation d'air importante à l'intérieur de l'armoire de commande.

Rendement

Rendement du CF à la puissance nominale

Le rendement des convertisseurs de fréquence et des moteurs électriques est relativement élevé en exploitation nominale, pour un couple de 100% et un régime de 100%. L'illustration 12 montre la comparaison du rendement à charge nominale d'un moteur IE2 en exploitation sur secteur et en exploitation avec CF, d'un CF (classe d'efficience 1) et de l'ensemble du système d'entraînement, en fonction de la puissance nominale du moteur.

Les valeurs numériques précises du rendement d'un CF dépendent de la conception de celui-ci. De manière générale, on peut dire qu'un CF avec redresseur à diodes côté secteur présente des pertes plus faibles et ainsi un meilleur rendement qu'un CF comparable utilisant côté secteur un onduleur. La différence, en exploitation nominale, est typiquement de l'ordre de 1 à 2%. Un CF avec redresseur inverseur se situe entre les deux en termes de rendement.

Influence de la fréquence de découpage

La fréquence de découpage, c'est-à-dire la fréquence à laquelle les semi-conducteurs d'un onduleur sont activés, possède également une influence sur le rendement.

Plus la fréquence de découpage de l'onduleur côté moteur est élevée,

- plus les pertes de commutation dans les semi-conducteurs sont élevées.
- plus les harmoniques dans le courant moteur sont faibles.
- plus les pertes dues aux harmoniques dans le moteur sont faibles.

Plus la fréquence de découpage de l'onduleur côté secteur (le cas échéant) est élevée,

- plus les pertes de commutation dans les semi-conducteurs sont élevées.
- plus les harmoniques dans le courant de secteur sont faibles.
- plus les pertes dans le transformateur et le secteur sont faibles.

Le choix de la fréquence de découpage est ainsi un compromis entre les pertes dans le CF et les pertes dans le secteur et le moteur, causées par les harmoniques. En règle générale, le fabricant du CF prédétermine une fréquence de découpage appropriée. Avec certains CF, celle-ci peut être réglée via un paramètre, avec les conséquences décrites ci avant. Les pertes de commutation maximales admissibles fixent des limites supérieures à la fréquence de découpage.

La fréquence de découpage est également déterminante pour la production de bruit d'un moteur. Dans les entraînements fonctionnant dans la plage du kW, on utilise ainsi des fréquences de découpage entre 4 et 16 kHz, afin que les bruits causés par les harmoniques dans le courant soient le plus possible au-dessus de la plage audible. Plus la puissance d'un convertisseur est élevée, plus la fréquence de découpage possible est basse. Les convertisseurs dotés de puissances autour de 1 MW ont typiquement des découpages à 2 kHz, les convertisseurs de plusieurs MW de quelques centaines de Hz.

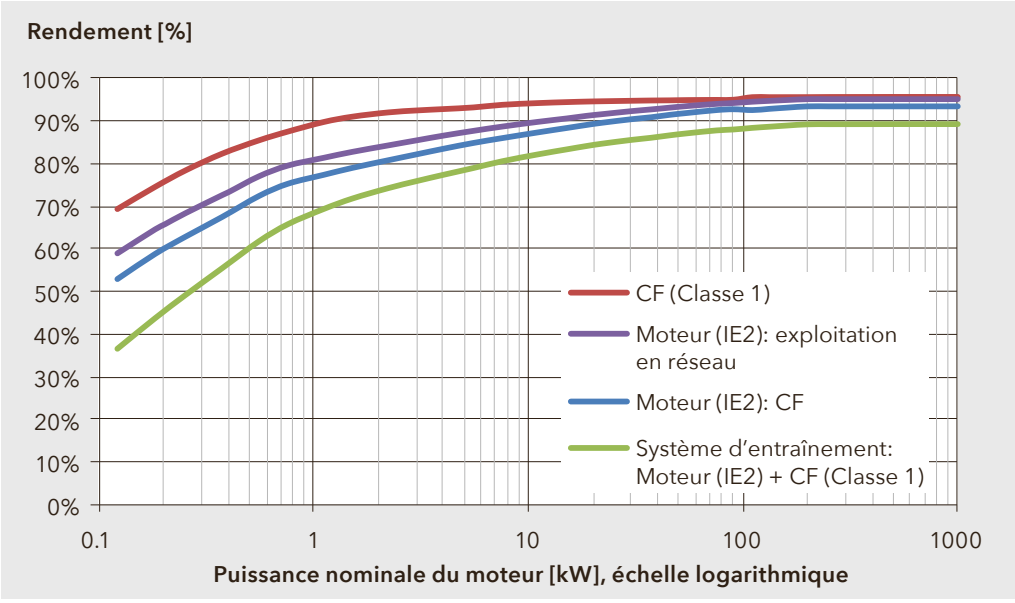


Illustration 12: Rendements du moteur, du CF et du système d'entraînement à la puissance nominale (Source: FprEN 50598-2 (version finale août 2014).

Pertes du CF en charge partielle

Si la puissance chute en dessous du point de fonctionnement nominal (< 30%), le rendement baisse fortement. Il est donc important que la puissance nominale du convertisseur de fréquence et du moteur soient adaptées à la puissance d'entraînement requise. L'illustration 13 montre le tracé typique du rendement de CF de 0.12 à 1 000 kW en fonction du couple M (newton-mètre, Nm) et du régime (tours par minute, tr/min) au niveau de l'arbre moteur. Une valeur de 100% correspond au couple nominal ou au régime nominal.

L'illustration 13 montre d'une part la forte dépendance du rendement en charge partielle du CF par rapport à la puissance: En dessous de 10 kW, les rendements en charge partielle, par exemple 50% du régime et 50% du couple (soit une charge partielle de 25%), sont déjà fortement réduits. L'illustration montre le tracé du rendement pour cinq différents cas de charge entre la puissance nominale (charge 100%) pour un régime de 100% et un couple de 100%, et 12.5% de la puissance nominale, pour un régime de 50% et un couple de 25%.

Rendement du système d'entraînement

Un CF possède ses propres pertes à la puissance nominale et fait fonctionner le moteur entraîné avec un rendement légèrement inférieur. Les pertes du CF sont de l'ordre de celles du moteur. Dans de nombreux cas, un CF peut nettement améliorer le rendement total d'un système (CF, moteur, processus), car il permet de mieux doser la puissance utile par la modification du régime. Il est important de bien dimensionner le CF, car le rendement baisse également au niveau de celui-ci en plage de charge partielle. Si l'on prend en compte le rendement total du système d'entraînement, les pertes dans les éventuels composants de filtration du CF doivent également être prises en compte. En outre, le refroidissement supplémentaire pour le CF doit également être considéré.

Selon l'application, l'efficience d'un système d'entraînement peut fortement dépendre du fait qu'en mode de freinage, l'énergie soit ou non réinjectée dans le secteur (voir page 6: Capacité de réinjection).

Les moteurs ayant des démarrages relativement fréquents et directement reliés au secteur présentent au démarrage des pertes plus élevées que lorsque le régime est augmenté en forme de rampe avec un CF.

Normes pour les CF

Les classes d'efficacité pour les convertisseurs de fréquence sont définies selon la norme IEC 61800-9-2:2017. La spécification technique de la IEC TS 60034-31:2021 décrit, en outre, l'utilisation de moteurs électriques à courant alternatif à efficacité énergétique à vitesse de rotation variable et fournit un document Excel permettant le calcul du rendement à charge partielle des systèmes d'entraînement.

Cette feuille de calcul permet de déterminer le rendement des moteurs normalisés (IE1-IE4) avec CF (IE1-IE3) à chaque couple et chaque vitesse de rotation entre une charge de 0 et 100%.

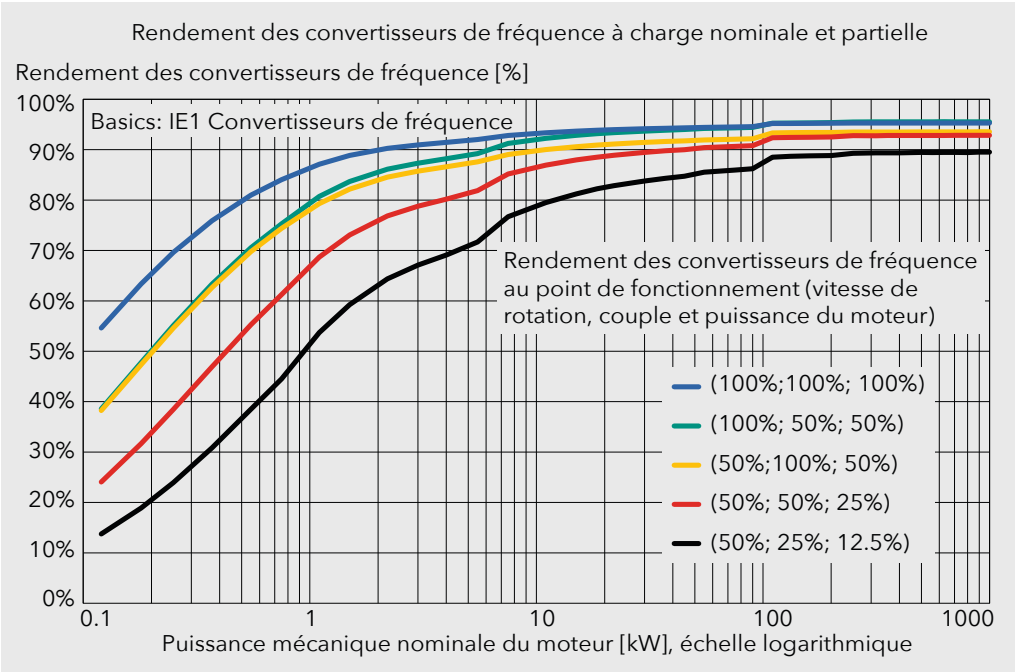


Illustration 13: Rendements de convertisseurs de fréquence à charge pleine et partielle en fonction de la puissance nominale du moteur, selon la norme CEI 61800-9-2: 2017, édition 1, base: classe d'efficacité IE1 pour convertisseur de fréquence. Les points de fonctionnement suivants sont observés: charge nominale (100% bleu) et charge partielle (puissance du moteur effective: 50% vert et jaune; 25% rouge, 12.5% noir).

Conditions environnantes

Classe de protection

En général, les convertisseurs de fréquence sont dotés de la classe de protection IP 21 et sont prévus pour une intégration dans l'armoire de commande. Les nattes filtrantes au niveau des portes de l'armoire de commande ne sont pas prescrites en cas d'installation dans un local électrique, mais sont toutefois recommandées car, en raison du besoin élevé en flux d'air de refroidissement, des quantités de poussière importantes peuvent s'infiltrer dans l'armoire de commande. Souvent, un montage décentralisé du convertisseur sur le mur à côté du moteur est exigé. Des appareils compacts sont disponibles pour de telles applications avec une classe de protection jusqu'à IP54, même pour des puissances élevées. Pour répondre à des exigences particulières, il existe éventuellement également des classes de protection plus élevées.

Air de refroidissement

Les convertisseurs de fréquence possèdent, avec un rendement pouvant atteindre 98%, une perte de puissance similaire à celle du moteur. Les appareils compacts intégrés dans l'armoire de commande nécessitent ainsi un volume d'armoire adapté et un acheminement d'air suffisant à travers l'armoire de commande. Pour empêcher l'apparition de turbulences dans l'armoire, la réalisation d'un cloisonnement doit permettre un certain guidage de l'air. Les pertes d'un ventilateur plus grand ou supplémentaire destiné à la ventilation de l'armoire doivent être prises en compte.

Température

Les données de puissance d'un CF sont en général indiquées pour une température ambiante de 40 °C. En présence de températures ambiantes > 40 °C, il convient de prévoir, comme habituellement dans la technique, une réduction de la puissance pouvant s'élever à env. 1% par °C. Les températures ambiantes maximales admissibles s'élèvent généralement à 50 à 55 °C. En présence de températures ambiantes < 40 °C, une petite réserve de puissance est disponible, car les semi-conducteurs de puissance peuvent alors conduire un peu plus de courant avant d'atteindre leur température critique.

Altitude d'installation

Les mêmes éléments doivent être pris en considération en ce qui concerne l'altitude d'installation. Les données de puissance sont dimensionnées pour une altitude d'installation de 1000 m, des altitudes d'installation jusqu'à 4000 m pouvant être atteintes avec une réduction standard (au-dessus de 1000 m: 1% de réduction de puissance tous les 100 m). En raison de la densité réduite de l'air, le refroidissement est alors moins efficace.

Planification et installation

Intégration dans la séquence du processus

Le convertisseur sert à la régulation du régime, donc du débit, et vise dans la plupart des cas également à économiser de l'énergie. Cela est dû à la possibilité de régulation progressive du régime, permettant la réduction temporaire de celui-ci. La régulation du régime présente également d'autres avantages, tels qu'un démarrage et un arrêt progressif, une régulation dynamique du régime pour le processus et l'exploitation de l'installation dans des points de fonctionnement optimisés.

Lorsque qu'il est installé ultérieurement, le convertisseur doit également être intégré dans la séquence du processus. La commande marche-arrêt du moteur (auparavant par contacteur) doit être complétée au moins à hauteur de la valeur de consigne du régime. Une valeur réelle de processus pertinente (température, pression, poids, charge, vitesse) doit être recherchée, et définie en fonction de la valeur de consigne du régime. La valeur de consigne du régime est ainsi déterminée par des valeurs de processus.

Recommandations relatives à l'installation

Lors de l'utilisation d'un convertisseur, il convient de veiller non seulement aux conditions environnantes déjà mentionnées, mais également à quelques éléments qui permettent de garantir une exploitation impeccable de l'installation.

Longueur de câble: Entre le CF et le moteur, il convient d'utiliser des câbles conçus et isolés de façon symétrique, afin d'éviter toute défaillance. Leurs coûts sont légèrement supérieurs à ceux des câbles traditionnels. Le câble lui-même engendre également des pertes et ne doit ainsi pas être choisi inutilement long. En principe, il est possible d'installer le CF directement à côté du moteur ou sur celui-ci. Toutefois, il faut alors veiller aux conditions environnantes (température, humidité etc.) ainsi que par exemple aux vibrations et aux chocs. Tous ces facteurs peuvent avoir une influence négative sur la durée de vie du CF. Souvent, on choisit un montage central du CF dans un local protégé à l'écart du moteur, dans lequel on parvient mieux à influer sur les conditions environnantes. Dans ce cas, la longueur de câble entre le CF et le moteur

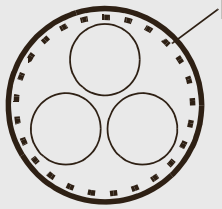
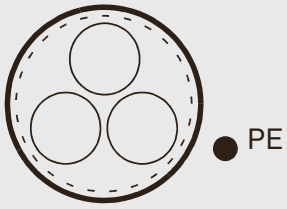
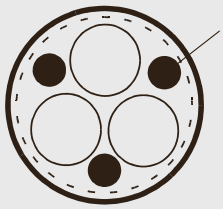
	Câble symétriquement isolé avec trois conducteurs de phase et un conducteur PE concentrique en tant qu'isolation. L'isolation doit répondre aux exigences de la norme IEC 61439-1. Veuillez vous informer sur les prescriptions électriques en vigueur.
	Câble symétriquement isolé avec trois conducteurs de phase et un conducteur PE concentrique en tant qu'isolation. Si l'isolation ne remplit pas les exigences de la norme IEC 61439-1, un conducteur PE séparé est requis.
	Câble symétriquement isolé avec trois conducteurs de phase et des conducteurs PE symétriques, ainsi qu'une isolation. Le conducteur PE doit répondre aux exigences de la norme IEC 61439-1.

Illustration 14: Types de câbles de puissance recommandés (source: ABB, 2014).

ne doit pas dépasser 100 m, sous peine de nécessiter des mesures supplémentaires telles qu'un filtre de sortie.

- En cas de montage mural, exécution IP54
- Filtre **CEM** 1er environnement (réseau public) ou 2e environnement (réseau industriel). Voir page 8: Filtres CEM.
- Câble à 3 conducteurs symétriquement isolé
- Prévoir une introduction de câble CEM pour le moteur
- Câblage conforme CEM au niveau du convertisseur
- Isoler les câbles de signaux et utiliser un câble de commande séparé pour chaque niveau de tension et type (analogique/numérique)
- Poser séparément le câble de commande et le câble moteur.
- Signal analogique pour la valeur de consigne, signal numérique pour les commandes de déclenchement marche-arrêt, bus de champ pour l'automate programmable, disjoncteurs selon les indications du fabricant, disjoncteurs automatiques de classe B ou C ou disjoncteur du moteur de classe 10 selon les prescriptions du fabricant.

	Question		Page
1	**Faut-il utiliser un CF?**		**2**
2	**Un freinage électrique est-il nécessaire?**		**7**
	Une réinjection de l'énergie de freinage dans le secteur est-elle intéressante?	Puissance de réinjection fréquente et importante	**7**
3	**Quel type de CF utiliser?**		**10**
	Applications	Souvent avec les pompes et les ventilateurs	**3**
	Refroidissement du CF	Pour une valeur > 0.75 kW, envisager un refroidissement supplémentaire dans l'armoire de commande à l'aide d'un ventilateur	**19**
	Fréquence de découpage	Souvent 4 kHz, attention à la production de bruit	**13**
	Réinjection	Injection active versus circuit en pont à 6 impulsions (harmoniques)	**7, 10 ff**
4	**Quelle doit être la dimension du CF?**		**2**
	Sortie CF	Doit garantir la puissance absorbée électrique du moteur. Dans de rares cas, lorsque le CF n'intervient qu'au démarrage, il peut éventuellement être dimensionné plus grand que le moteur.	**5**
5	**Où se trouve le CF?**		**19, 20**
	Dans l'armoire de commande	Avec les fusibles (garantir le refroidissement)	**20**
	Sur le moteur	Relier mécaniquement (éviter les vibrations)	**20**
	Entre les deux	Près du moteur, au mur etc.	**20**
6	**Quelles sont les conditions environnantes données?**		**19**
	Température ambiante	Minimale et maximale	**19**
	Classe de protection	Classes de protection IP (p. ex. IP54)	**19**
	Secousses	Montage direct jusqu'à 7.5 kW	**20**
7	**Entretien et durée de vie**	Moins longtemps à aussi longtemps que le moteur	**15**

Exemple d'économie d'énergie

Le CF permet d'adapter le fonctionnement d'une installation de ventilation aux besoins variables effectivement requis. Dans le même temps, il engendre des coûts d'investissement supplémentaires et des déperditions d'énergie. Pour déterminer si l'utilisation d'un CF est rentable, il convient d'étudier les conditions d'utilisation. Dans certains cas, le CF n'est utilisé que pour le démarrage de l'installation. Cette thématique n'est pas traitée ici. Nous comparerons, en termes de besoin en énergie électrique, une installation de ventilation existante surdimensionnée sans CF à une installation avec CF.

Besoin de puissance pour la ventilation

Le débit volumique de la ventilation dépend du régime des ventilateurs. Le besoin en puissance électrique pour la ventilation varie à la puissance 3 par rapport au débit volumique. Etant donné que le rendement du moteur électrique est plus faible en charge partielle, la réduction de la puissance électrique absorbée par le moteur est légèrement inférieure. Lorsque aucune indication n'est disponible à ce sujet, la norme SIA 382/1:2014 recommande l'utilisation de la puissance 2.5. Les rendements de charge partielle utilisés dans l'exemple correspondent à une puissance 2.8.

Dans le cas d'installations ayant des pertes de charge constantes (p. ex. régulateur de débit volumique), l'économie en mode de charge partielle est encore réduite. La norme SIA 382/1:2014 définit dans ces conditions, pour effectuer de premières estimations, une puissance 1.5. Dans cet exemple, on suppose dans la variante avec CF une perte de charge de 50 Pa. Conjointement avec les autres hypothèses de l'exemple, on obtient donc une puissance 2.3.

Profils des besoins

Conformément au Cahier technique SIA 2024:2006, des conditions d'utilisation des locaux typiques s'appliquent à différentes utilisations des bâtiments, et peuvent être utilisées pour l'estimation du besoin en puissance et en énergie. Le Cahier technique SIA a été remanié en 2015. Les valeurs actuelles figurent dans la version SIA 2024:2015. L'exemple se base sur les variations au cours de la journée de l'occupation de bureaux individuels et collectifs, conformément à l'illustration 15. Cela correspond dans le bureau individuel à 7.2 heures de pleine charge par journée de travail. Dans la variante avec CF, on utilise en supplément pour l'ensemble de l'installation le facteur de simultanéité indiqué dans le Cahier technique SIA 2024:2006, de 0.8. Si l'on prend en compte les week-ends sans exploitation, on obtient 1 500 heures de pleine charge par an.

Rendement du CF

Dans l'exemple d'un moteur de 11 kW et d'une application avec un tracé quadratique du couple (installation de ventilation), on obtient approximativement les rendements de CF de l'illustration 16.

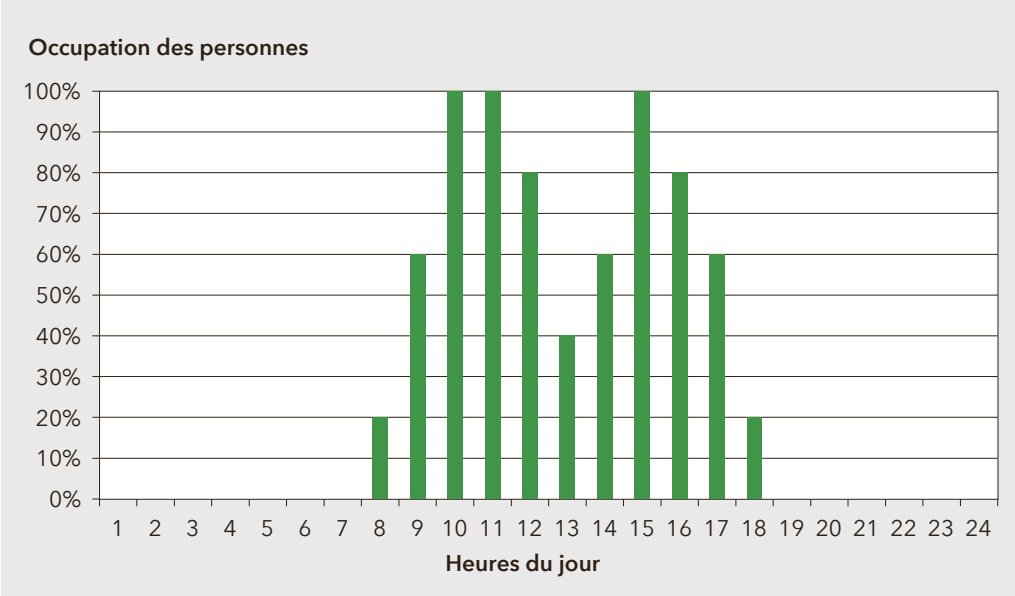


Illustration 15: Variations journalières de l'occupation des personnes dans des bureaux individuels et collectifs conformément au cahier technique SIA 2024:2006.

Rendement du ventilateur et du moteur

Les exigences en termes de rendement des ventilateurs dotés d'une puissance absorbée électrique des moteurs de 125 W à 500 kW ont été déterminées par l'UE sur la base de la directive 2009/125/CE du 21 octobre 2009 dans l'ordonnance (UE) n° 327/2011 du 30 mars 2011. Deux niveaux sont différenciés. Pour les installations qui entrent dans le champ d'application de la norme SIA 382/1:2014, il conviendra de remplir les exigences en matière d'efficience du 2e niveau à partir de 2015 (illustration 17).

L'exigence UE s'applique au système global constitué du ventilateur et du moteur (sans CF), au meilleur point de fonctionnement du ventilateur. Dans l'exemple, on se base sur un ventilateur qui présente dans son meilleur point de fonctionnement un rendement de 65% (rendement total du ventilateur et du moteur. Celui-ci se compose du rendement du ventilateur de 72% et du rendement d'un moteur IE2 de 90%).

Les ventilateurs sont décrits par un champ de caractéristiques dans lequel le rendement, dans un état de fonctionnement défini, est documenté avec la pression ou le débit volumique correspondant. Il revient aux planificateurs de choisir un ventilateur qui, dans toute la plage d'exploitation, fonctionne de façon stable et avec le meilleur rendement possible.

Dans l'exemple, on suppose que dans l'état d'exploitation concret de l'installation, à un régime de 100%, on atteint un rendement total du ventilateur et du moteur de 55%. La dégradation du rendement en mode de charge partielle résulte du facteur présenté dans l'illustration 18.

Dans l'exemple, conformément au Cahier technique SIA 2024:2006, on suppose pour le fonctionnement de la ventilation des différentes pièces une simultanéité de 80%. Le besoin maximal en puissance électrique est réduit en conséquence (illustration 20).

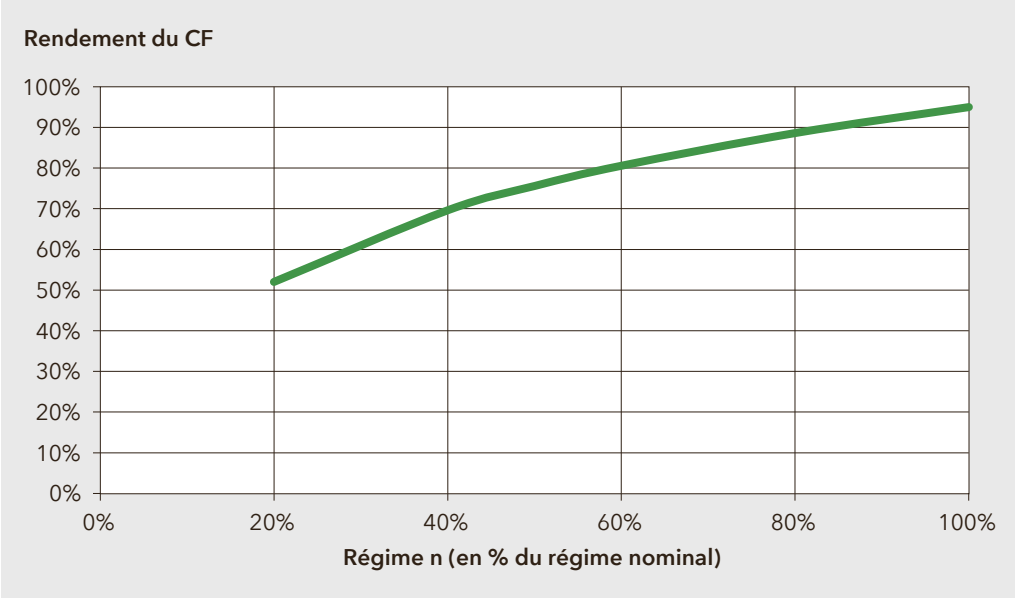


Illustration 16: Rendement du CF pour des applications avec tracé quadratique du couple. Exemple avec un moteur 11 kW.

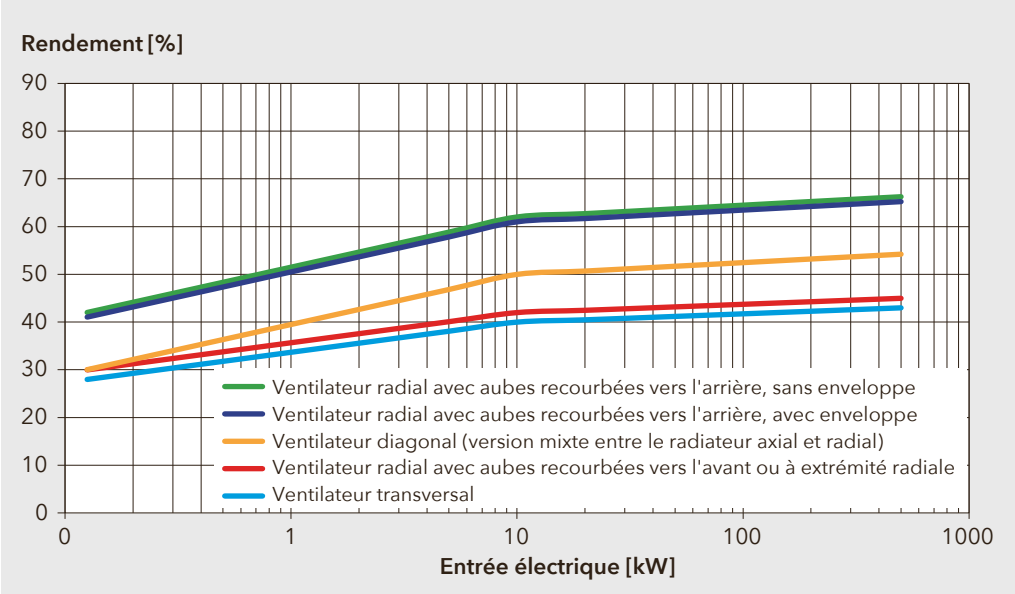


Illustration 17: Exigences en matière d'efficience de l'UE pour les ventilateurs de différents types (2e étape, 2015), rendement total y compris moteur. Les courbes se basent sur la combinaison du ventilateur avec un moteur IE2.

Exemple

Données de l'installation de ventilation

- Débit volumique maximal V_{max} 27 000 m³/h
- Pression différentielle pour V_{max} sans CF 800 Pa
- Pression différentielle pour V_{max} avec CF 850 Pa

(dont 50 Pa en tant que perte de charge constante)

- Rendement ventilateur + moteur pour V_{max} 55%

Réduction en mode de charge partielle

- Rendement du CF pour V_{max} 95%

Réduction en mode de charge partielle (conformément à l'illustration 16)

- Puissance absorbée du moteur IE2 pour V_{max} sans CF 10.9 kW
- Puissance absorbée du moteur IE2 V_{max} avec CF 11.6 kW
- Puissance absorbée du CF pour V_{max} 12.2 kW
- Puissance absorbée du CF (en prenant en compte une simultanéité de 80%) 6.4 kW

Dans le cas sans CF, la ventilation doit toujours fonctionner avec le débit volumique d'air maximal, indépendamment du degré d'occupation. Avec un CF, des régulateurs de débit volumique et une régulation adéquate, l'exploitation peut être adaptée progressivement aux besoins variables. L'illustration 19 montre le besoin en puissance électrique pour la ventilation dans la variante sans CF, c'est-à-dire avec un fonctionnement constant de l'installation. L'illustration 20 s'applique à la variante avec CF et à un fonctionnement adapté aux besoins. Dans les deux variantes, avant le début du travail, la ventilation préalable fonctionne une heure à 100%, ou deux heures à 40% du débit volumique d'air maximal.

Grâce au tracé quadratique du couple pour la ventilation, on réalise dans la variante avec CF des économies importantes dans le domaine de l'énergie de transport nécessaire. Avec le CF, la consommation d'énergie pour la ventilation s'élève à seulement un tiers de la valeur sans CF.

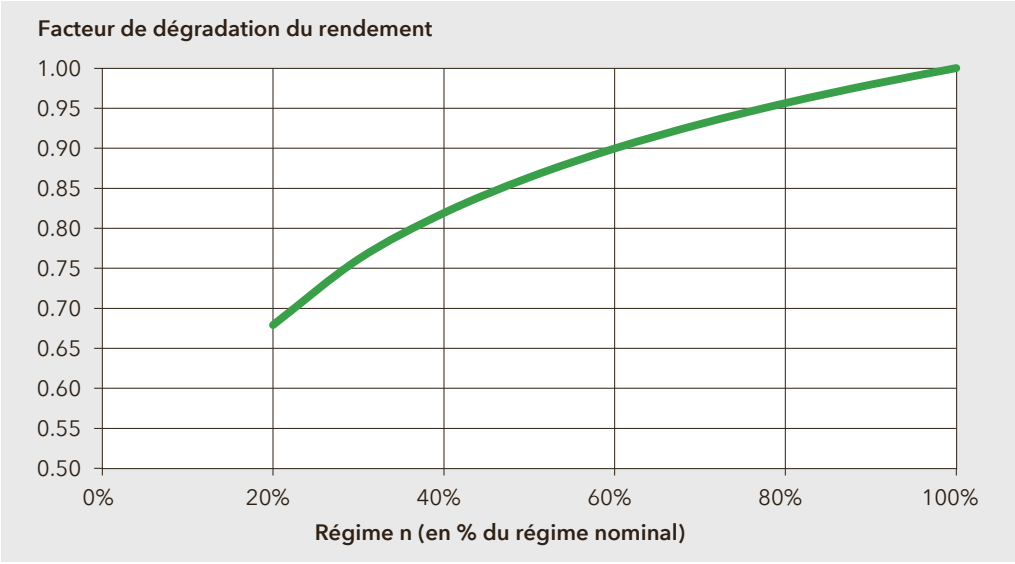


Illustration 18: Facteur de dégradation du rendement du ventilateur et du moteur en mode de charge partielle.

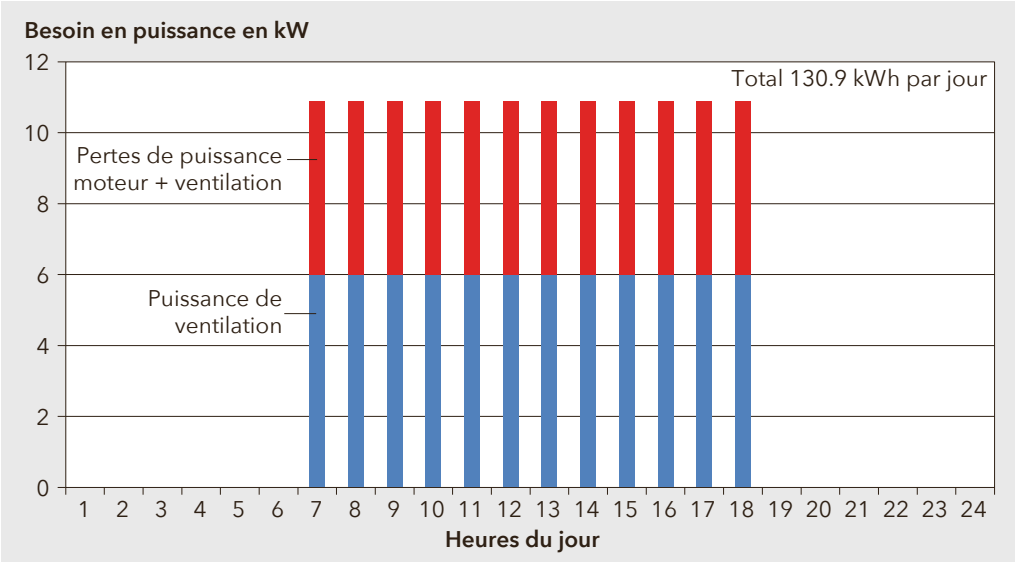


Illustration 19: Besoin en puissance électrique pour une exploitation constante sans CF. Total sur toute la journée de travail = 130.9 kWh (100%).

En outre, les débits volumiques d'air réduits entraînent également des dépenses réduites pour le traitement de l'air (filtres, refroidissement, chauffage, humidification et déshumidification etc.). Il convient de toujours prendre en compte les pertes supplémentaires du CF et la baisse de rendement du ventilateur en mode de charge partielle ainsi que du moteur avec CF en charge partielle. Ces effets sont toutefois d'une importance secondaire par rapport aux économies réalisées.

L'exemple présuppose une ventilation préalable avant le début du travail (2 heures à 40%). Cela permet de désactiver la ventilation directement après la fin du travail tout en garantissant malgré toute une bonne qualité de l'air à l'arrivée des personnes le matin suivant. Sans CF, la ventilation préalable doit s'effectuer au débit volumique d'air maximal. Avec CF, la ventilation préalable peut par exemple fonctionner à 80% de la valeur maximale, le besoin en énergie pour la ventilation descendant ainsi à 66%. Une réduction supplémentaire peut être obtenue lorsque le même volume d'air est apporté sur une plus longue période. Avec une ventilation préalable de 2 heures à 40% du débit volumique d'air maximal, le besoin en énergie baisse à 31% (ou 47% pour une heure à 80%) par rapport au fonctionnement initial sans CF (pendant une heure à 100%).

Lorsque, pour des applications avec un tracé quadratique du couple, le travail peut être réparti sur une période plus longue, cela est généralement avantageux sur le plan énergétique.

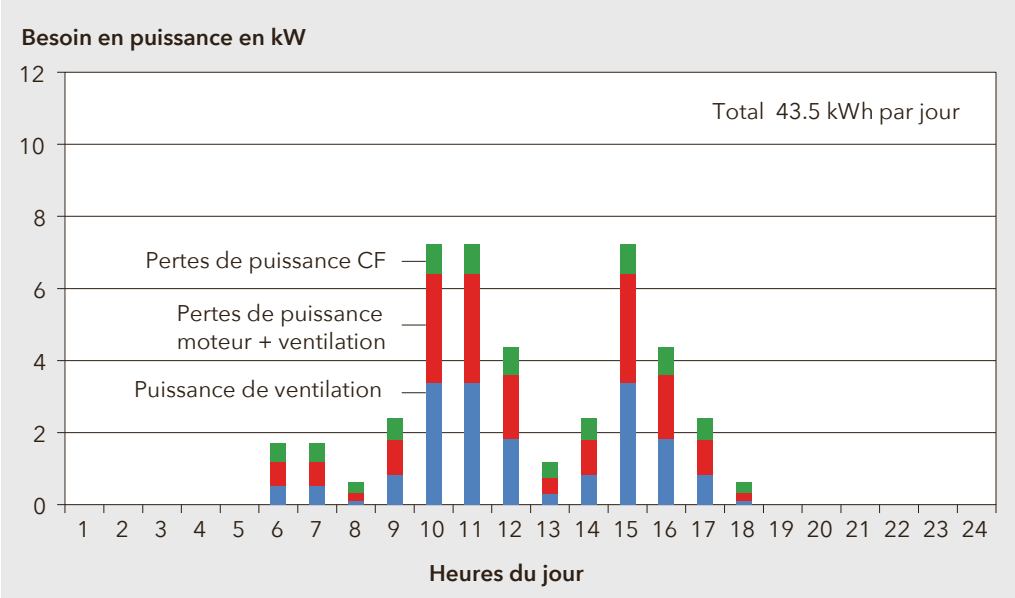


Illustration 20: Besoin en puissance électrique pour une exploitation en fonction des besoins avec CF. Total sur toute la journée de travail = 43,5 kWh (33%).

Informations complémentaires

Notions et unités

Désignation	Abréviation, symbole	Unité	Indices et explication
Cosinus φ	cos φ	–	
Couple	M	Nm	
Régime	n	1/min	
Convertisseur de fréquence	FU	–	
Classe de protection IEC	IP	–	
Puissance	P	W	Hydraulique, mécanique ou électrique
Modulation de largeur d'impulsion	PWM		
Tension	U	V	
Fréquence de découpage	f	Hz	
Régulation vectorielle			Vector Control
Rendement	η	%	Sortie, entrée

Normes, lois et sources

Normes suisses

- SIA 380/4:2006: L'énergie électrique dans le bâtiment
- SIA 382/1: Installations de ventilation et de climatisation:2014
- Cahier technique SIA 2024:2006: Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment, 2006

Standards internationaux

- IEC 60034-2-3: 2013: Rotating electrical machines - Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors
- FprEN 50598-2 (Final Draft, August 2014): Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics & their driven applications – Part 2: Energy efficiency indicators for power drive systems and motorstarters
- IEC 61800-9: Adjustable speed power electrical drive systems, energy efficiency of adjustable speed electric power drive systems, 2014 (new work item proposal)

Exigences légales en Suisse

Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique (OEEE RS 730.02, version du 1er juillet 2021):

- Annexe 2.7: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture de moteurs et de convertisseurs de fréquence
- Annexe 2.8: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des circulateurs sans presse-étoupe
- Annexe 2.9: Exigences relatives à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la mise en circulation et à la fourniture des pompes à eau

Exigences légales en Europe

Directive Ecoconception:

- Règlement (UE) 2019/1781, date d'application concernant l'efficacité énergétique des moteurs et des convertisseurs de fréquence: 1er juillet 2021, voir art. 12
- Règlement (UE) 2021/341: précision des dispositions du Règlement (UE) 2019/1781
- N° 641/2009: Circulateurs sans presse-étoupe 1 à 2500 W
- N° 327/ 2011: Ventilateurs entraînés par des moteurs dont la puissance électrique à l'entrée est comprise entre 125 W et 500 kW
- N° 547/2012: Pompes à eau

Bibliographie complémentaire

Motor Systems Tip Sheets, Industrial Technologies Program, Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Advanced Manufacturing Office, Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, 2012:

- Tip Sheet #11, Adjustable Speed Drive, Part-Load Efficiency,
- Tip Sheet #14, When Should Inverter-Duty Motors be Specified,
- Tip Sheet #15, Minimize Adverse Motor and Adjustable Speed Drive.

Note de l'éditeur

La fiche technique Convertisseurs de fréquence a été réalisée par S.A.F.E. dans le cadre du programme de mise en œuvre de systèmes d'entraînement efficients de Topmotors. Elle a été élaborée par Conrad U. Brunner et Rolf Tieben, S.A.F.E., Prof. Dr. Adrian Omlin, HSLU, Uwe Przywecki, ABB, avec la collaboration de Jürg Nipkow, S.A.F.E. et Urs Steinemann, Ingenieurbüro US en 2014 et a été partiellement mise à jour en 2021 (Normes, lois et sources).
Lectorat et mise en page: Faktor Journalisten
La fiche technique est disponible sur www.topmotors.ch en allemand, en français et en italien.
Topmotors est soutenu par SuisseEnergie.