

Nouvelles technologies des moteurs

Les cinq points essentiels

1. La bonne intégration du moteur dans l'ensemble du système d'entraînement et le bon dimensionnement sont essentiels.
2. Pour des systèmes tournant longtemps ou en continu à un régime constant, les moteurs asynchrones à haut rendement (IE3 ou IE4) sont les mieux adaptés.
3. Pour les systèmes d'entraînement avec puissance ou régime variables: il convient de recourir à un convertisseur de fréquence (CF) et à un moteur à haut rendement (IE3 ou IE4).
4. Pour les systèmes d'entraînement dont la puissance change rapidement: il convient de recourir à un moteur à aimant permanent (MAP) et à un moteur synchrone à réluctance (MSR) à haut rendement (IE3 ou IE4).
5. Des systèmes hybrides MAP et MSR offrant un rendement élevé en exploitation nominale sont disponibles pour un démarrage direct et une exploitation sur le réseau.

Objectif et public cible

Cette fiche technique N° 29 de Topmotors fournit un aperçu systématique et actuel des différentes technologies des moteurs électriques, de leurs propriétés et de leur importance énergétique dans le système d'entraînement. Elle montre les avantages et les inconvénients de différentes technologies telles que le moteur asynchrone (MAS), le moteur à aimant permanent (MAP) ou le moteur synchrone à réluctance (MSR), les compare et décrit les applications types des technologies respectives. La fiche technique s'adresse aux cercles intéressés par la technique (utilisateurs, planificateurs, installateurs, conseillers énergétiques, etc.) et aux fabricants de composants ou de systèmes d'entraînement complets.

Bases

Les moteurs électriques absorbent plus de la moitié de la consommation mondiale en énergie électrique. Ils constituent l'élément central de tous les systèmes d'entraînement pour pompes, ventilateurs, compresseurs, machines de transport et de processus, etc. (Illustration 1).

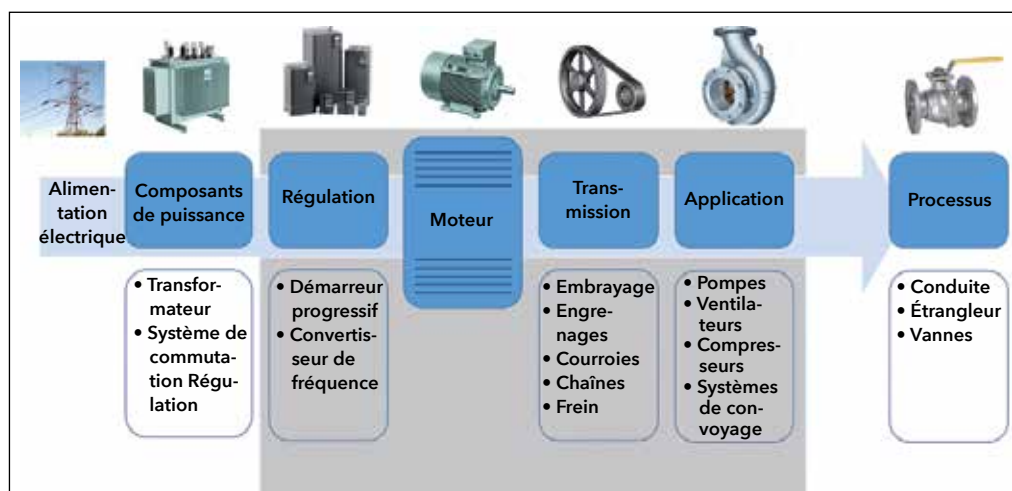


Illustration 1: Unité d'entraînement et ses composants (Source: CEI 60034-31, 2019)

Les moteurs électriques sont classés en différents types en fonction de leurs caractéristiques:

- Moteurs tournant sur une longue durée ou en continu à régime constant (S1 selon CEI 60034-1), à puissance constante et en partie aussi à puissance variable (couple)
- Moteurs à puissance fortement variable (régime ou couple) avec utilisation d'un convertisseur de fréquence, parfois aussi avec accélération rapide (p.ex. moteurs de véhicule)
- Moteurs à mouvements de rotation courts et rapides, en partie réversibles, destinés au positionnement (servo-moteurs).

Les moteurs électriques de 2 à 8 pôles et de puissances nominales comprises entre 0,12 kW et 1000 kW sont tes-

tés conformément à la norme CEI 60034-2-1 et répartis en fonction de leur rendement dans les classes de rendement suivantes (code IE selon la norme CEI 60034-30-1) (voir l'illustration 2):

- IE4 Rendement super-premium
- IE3 Rendement premium
- IE2 Haut rendement
- IE1 Rendement standard

La forte dépendance du rendement du moteur par rapport à la puissance nominale est manifeste: dans tout le champ d'application de la norme CEI, le rendement d'un moteur IE3 à 4 pôles est d'environ 65% à 0,12 kW jusqu'à 96% à 1000 kW de puissance nominale. En Suisse, seuls les moteurs IE3 et supérieurs (et IE2 avec convertisseur de

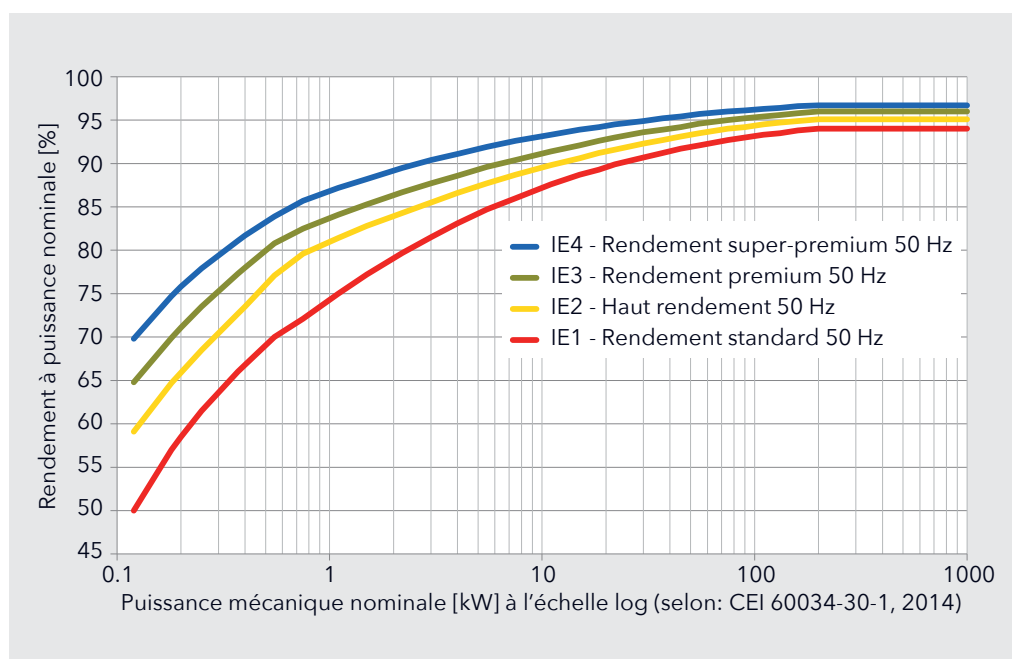


Illustration 2: Classes de rendement des moteurs selon CEI 60034-30-1

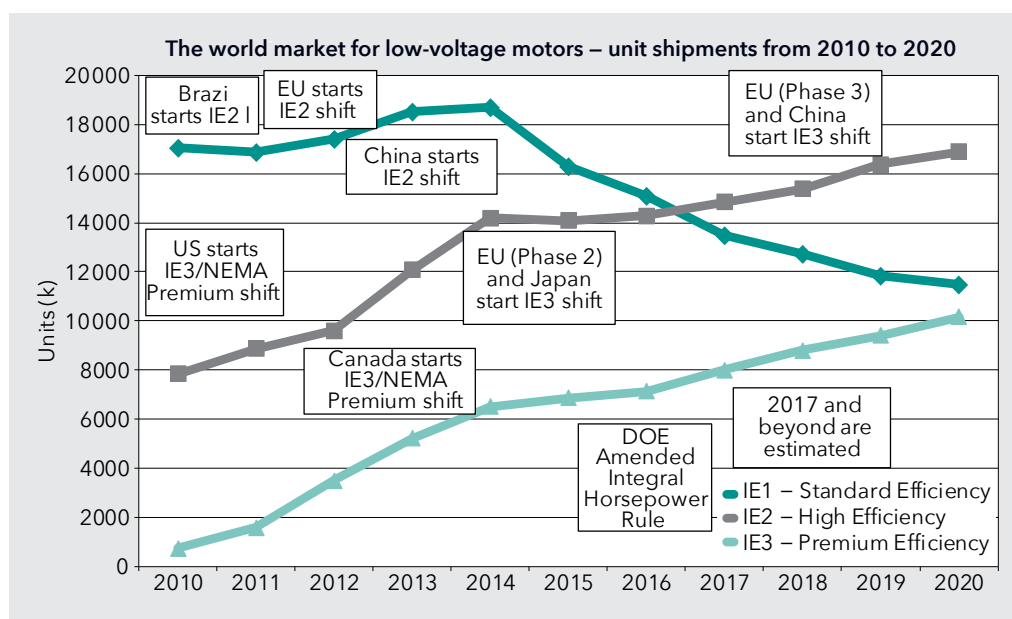


Illustration 3: Évolution des marchés globaux des moteurs. Jusqu'en 2016: analyse des marchés, à partir de 2017: estimation (Source: Motor Summit 2017, Zurich)

fréquence) sont autorisés dans de nouvelles installations. Les moteurs alimentés par un convertisseur de fréquence (CF) sont testés en tant que système conformément à la norme CEI 60034-2-3 et classés en fonction de leur rendement selon la norme CEI 60034-30-2. Les convertisseurs de fréquence sont testés selon la norme CEI 61800-9-2 depuis 2017 et divisés en classes de rendement.

Dans les systèmes comportant un grand nombre de moteurs, le rendement des moteurs utilisés est d'une grande importance. En particulier lorsque ceux-ci fonctionnent presque constamment à pleine charge, des dépenses supplémentaires de rendement sont en général amorties de manière particulièrement rapide.

Les marchés mondiaux sont en mutation: la tendance vers des moteurs à haut rendement et relevant de nouvelles technologies est imparable. L'illustration 3 montre la tran-

sition au niveau mondial des moteurs IE1 vers des moteurs IE2 et IE3 de plus en plus efficaces.

Selon le Topmotors Market Report 2018, les parts de moteurs par classe de rendement figurant dans l'illustration 4 ont été vendues en 2017 en Suisse. On constate clairement que les moteurs IE2 et IE3, répondant aux exigences minimales, dominent le marché.

Que les moteurs IE1 aient presque disparu du marché et que les moteurs IE4 gagnent régulièrement des parts de marché est une évolution positive. En résumant toutes les puissances nominales, la dominance des moteurs performants est encore plus prononcée (Illustration 5).

Cependant, la Suisse exploite toujours un grand nombre de moteurs de la classe de rendement IE0 et IE1, qui, en raison de leur technologie obsolète, offrent un potentiel d'efficacité considérable par rapport aux moteurs modernes.

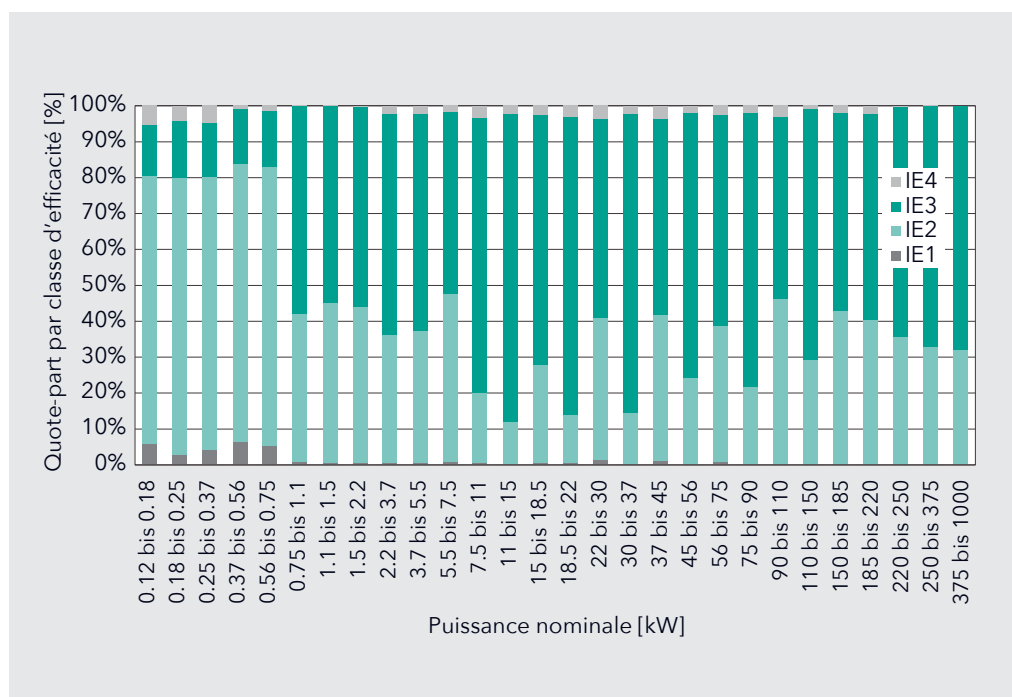


Illustration 4: Moteurs vendus en Suisse en 2017 par classe d'efficacité et puissance nominale (Source: Topmotors Market Report, 2018)

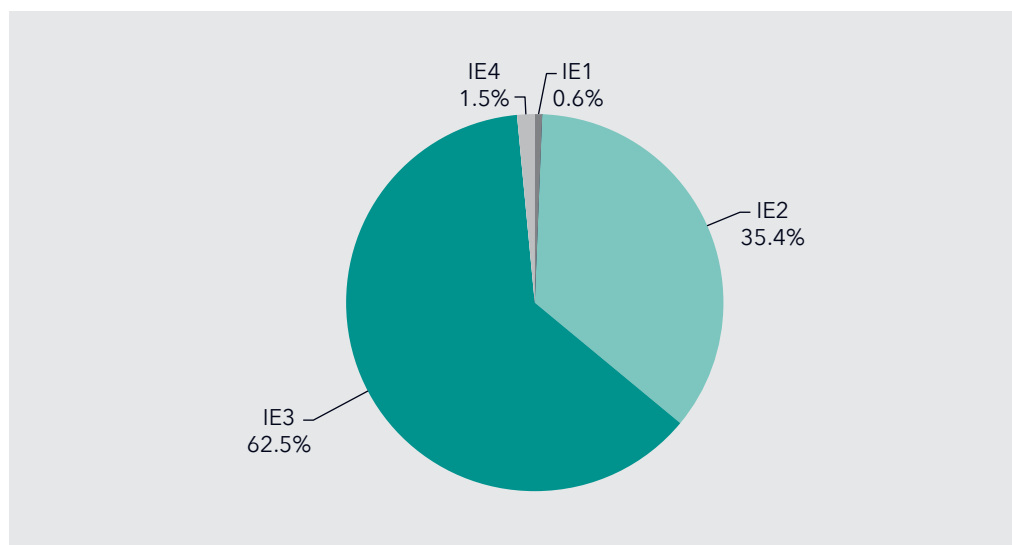


Illustration 5: Classes d'efficacité des moteurs vendus en Suisse en 2017 dans la plage de puissance resp. de validation de l'Ordonnance sur l'efficacité énergétique: 0,75 kW à 75 kW (Source: Topmotors Market Report, 2018)

Technologies des moteurs en un clin d'œil

Comme le montre l'énumération suivante des types de moteurs, les directives Ecodesign en Europe depuis 2008 et les exigences minimales qui en découlent en Suisse, ainsi que la demande d'efficacité énergétique élevée, ont eu un impact considérable sur le marché des moteurs performants. Le développement technique n'est toujours pas terminé et offre encore d'autres potentiels d'optimisation. Il convient pour l'utilisateur de clarifier la pertinence d'un moteur à haut rendement et régulé, ainsi que la technologie de moteur la mieux adaptée à l'application. Les technologies diffèrent par:

1. Coûts: voir le tableau 1
2. Rendement à régime différent: voir l'illustration 6
3. Rendement à des régimes et couples différents: voir l'illustration 8
4. Poids: voir l'illustration 7
5. Aptitude à des démarrages fréquents et rapides
6. etc.

Coûts

Des études de marché sur les coûts des moteurs IE2, IE3 et IE4 sont réalisées chaque année dans le cadre du Topmotors Market Report. Les coûts spécifiques par kW de puissance nominale (indépendamment de la technologie du moteur) sont déterminés, permettant de chiffrer les coûts supplémentaires de moteurs à plus forte efficacité énergétique. L'évaluation des données de vente de 2017 a révélé des coûts supplémentaires selon le tableau 1.

Rendement à régime variable

L'adaptation du régime à l'évolution des charges via un convertisseur de fréquence (CF) peut entraîner des économies significatives. Cependant, il faut toujours garder à l'esprit qu'un CF n'économise pas d'énergie en soi, bien au contraire. Comme tout composant d'un système d'entraînement, un CF présente également de propres pertes ayant un impact négatif sur l'efficacité énergétique. Par réduction du régime, il convient donc d'économiser plus d'énergie que l'entraînement supplémentaire en consomme. Mais c'est précisément dans les systèmes fermés tels que les systèmes de ventilation ou les circuits de pompe qu'une réduction de régime à la puissance 3

Classe	IE2	IE3	IE4
Prix relatif	100%	113%	131%

Tableau 1: Comparaison des prix des classes de rendement de moteurs: valeur moyenne des prix spécifiques IE2, IE3, IE4 de chacun 0,12 kW à 1000 kW (Topmotors Market Report, 2018)

impacte sur la puissance. L'illustration 6 montre le résultat des mesures effectuées sur des moteurs de 2,2 kW de différentes technologies. Les différences de rendement sont moins importantes en présence de puissances nominales supérieures.

Rendement à des régimes et couples différents

Les différentes technologies de moteur présentent des caractéristiques différentes en fonction de la charge variable (régime et couple). L'illustration 8 montre les résultats des mesures de rendement des technologies de moteurs, y compris le CF.

Poids

En fonction des différentes technologies de moteur et des matériaux associés, il en résulte différents poids pour une même puissance nominale. Suivant l'application, cela peut jouer un rôle dans la conception, qu'il s'agit donc d'examiner et le cas échéant de prendre en compte. L'illustration 7 montre le résultat d'une étude du poids relatif de chaque technologie de moteur par rapport à un moteur asynchrone IE3 de 11 kW.

Aptitude à des démarrages fréquents et rapides

Les moteurs sollicités par des démarrages fréquents et rapides nécessitent une faible inertie de masse, c'est-à-dire un rotor léger. Des servomoteurs sont utilisés pour les fonctions d'entraînement avec position angulaire précise

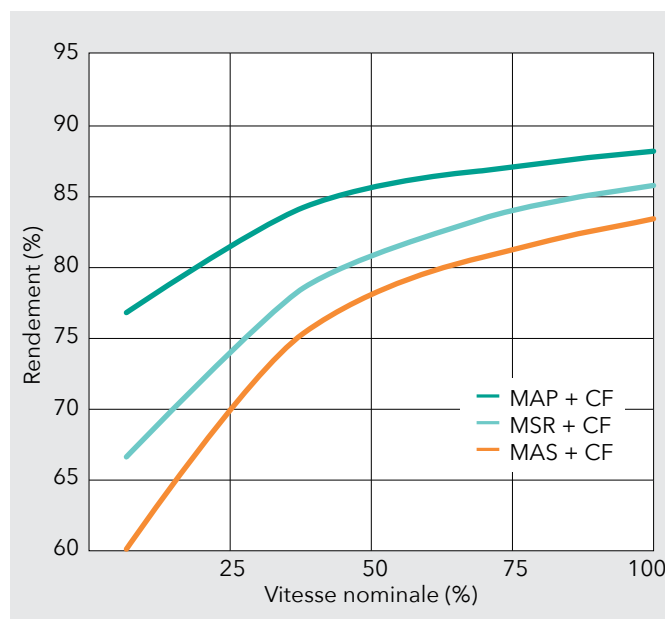


Illustration 6: Comparaison des moteurs à 4 pôles avec 2,2 kW, chargé d'un couple de 7 Nm (Source: Jorge Estima/EEMODS'17)

avec accélération et régime contrôlés. Un servomoteur est un moteur électrique commun (quelle que soit sa technologie) à haute dynamique, à faible moment d'inertie (rotor mince), doté d'une détermination de la position.

Moteur asynchrone (MAS)

Aujourd'hui encore, le MAS qui avait déjà été développé par AEG en 1889, est toujours le «cheval de trait» de l'industrie. Il est extrêmement robuste et fiable. Le développement des démarreurs progressifs et des convertisseurs de fréquence a nettement accentué la tendance au MAS. Le démarreur progressif permet d'accélérer en douceur le moteur dans le délai voulu et réduit ainsi le courant de démarrage. Après avoir démarré et atteint la vitesse nominale, le démarreur progressif est généralement court-circuité; le moteur est alors directement commuté au cou-

rant secteur. De même, le moteur peut être arrêté pendant un temps prédéterminé. Un démarreur progressif est donc idéal pour démarrer et arrêter des applications à régime constant. Un convertisseur de fréquence s'impose lorsque le régime du moteur doit pouvoir être modifié pendant l'exploitation. Cela permet non seulement un démarrage et un arrêt contrôlés, mais également un contrôle précis et économe en énergie du régime du moteur.

Le MAS est une forme simple de moteur à induction et consiste en un stator fixe dans lequel le rotor tourne. Le stator est généralement le boîtier en même temps. Il est constitué dans le cas des moteurs électriques d'un empilement de tôles d'acier avec des fentes servant de noyau commun aux enroulements statoriques. Dans les fentes du stator se trouvent des enroulements en fil de cuivre, interconnectés en fonction du nombre de pôles du moteur.

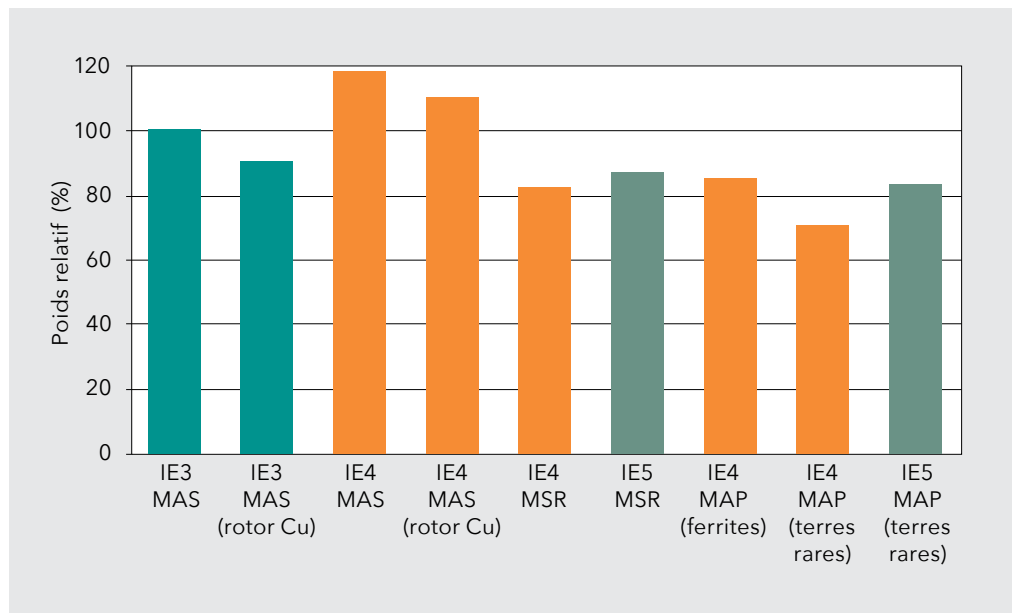


Illustration 7: Comparaison du poids des moteurs de différentes technologies (base: Moteurs 11 kW, IE3, MAS; 1500 tr/min; boîtier en aluminium) (Source: Anibal de Almeida, MS'18)

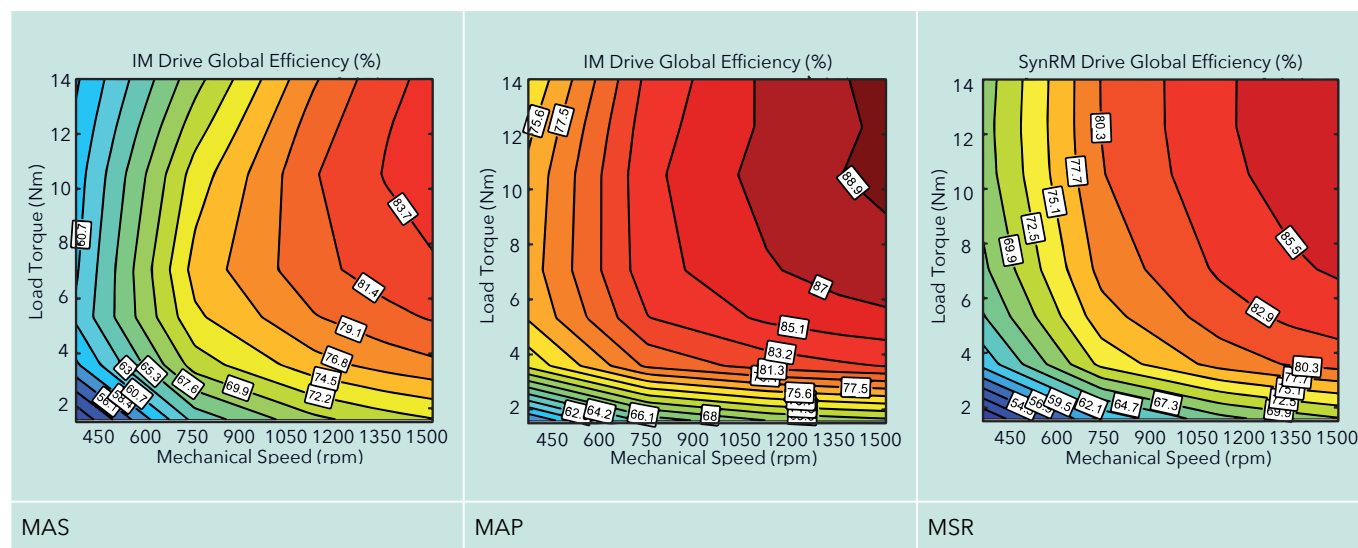


Illustration 8: Courbes des mêmes rendements en fonction du couple et du régime pour les moteurs asynchrones, à aimants permanents et synchrones à reluctance, chacun avec convertisseur de fréquence, puissance 2,2 kW (Source: Jorge Estima/EEMODS'17)

Le nombre de pôles du moteur définit sa vitesse synchrone (voir tableau 2).

Le déphasage du réseau triphasé crée un champ tournant dans le stator, agissant sur le rotor. Des rendements plus petits (< 2 kW) peuvent également être exploités à l'aide d'un condensateur sur le réseau monophasé 230 V.

Le rotor d'un moteur électrique est constitué de l'arbre et du bobinage. En règle générale, le bobinage consiste en un paquet de tôles d'acier dans lesquelles sont noyées des tiges de cuivre ou d'aluminium - la cage. Il existe un entrefer étroit entre le rotor et le stator. Le champ magnétique circulant dans le stator induit un courant dans le rotor via l'entrefer, ce qui crée un champ radial tournant qui génère le mouvement de rotation dans le rotor. En raison des courants induits dans le rotor, on parle de moteur à induction. La vitesse du rotor dépend de la charge et est inférieure à celle du champ tournant du stator en rotation. La vitesse réelle du rotor à la charge nominale est indiquée sur la plaque signalétique du moteur. Au ralenti, il est très proche de la vitesse synchrone. La différence entre la vitesse synchrone due à la fréquence du secteur (champ tournant du stator en rotation) et la vitesse du rotor (vitesse nominale du moteur) est appelée glissement. Le moteur asynchrone doit son nom au fait qu'il ne tourne pas de manière synchrone avec la fréquence de réseau du champ tournant du stator.

Pour améliorer le rendement, des tôles magnétiquement meilleures, plus grandes ou en plus grand nombre sont utilisées dans la construction du stator et du rotor. En pratique, cela peut en partie conduire à des moteurs de plus grandes dimensions. Cependant, tous les fabricants s'efforcent de respecter les cotes de raccordement normalisées CEI (selon IEC 60072-1/-2/-3) afin d'assurer la compatibilité avec les moteurs largement utilisés dans les systèmes existants. Par conséquent, les cotes de raccordement normalisées (distance entre pieds, hauteur d'arbre,

diamètre d'arbre) sont généralement les mêmes, seul le stator est en partie plus grand (plus long).

Avant de remplacer un moteur, il convient de vérifier si un échange s'impose. Un MAS âgé de dix ans peut souvent avoir un rendement suffisant, alors que d'autres composants du système peuvent être remplacés à moindre coût. Fondamentalement, la norme moteur CEI 60034-30-1 part du principe que la classe de rendement IE4 avec MAS est possible. Il sera beaucoup plus difficile d'atteindre l'IE5 dans des moteurs alimentés par le secteur.

Une variante du moteur asynchrone standard à rendement élevé est le MAS avec une cage en cuivre dans le rotor au lieu d'une cage en aluminium. Il a la même structure et le même principe de fonctionnement, mais diffère dans le matériau du rotor. Le bobinage de cuivre a une résistance électrique inférieure à celle de l'aluminium et réduit ainsi les pertes dans le rotor. Le moteur peut donc facilement atteindre la classe de rendement IE3, voire IE4. Le MAS avec rotor en cuivre peut également être utilisé directement sur le réseau ou avec un convertisseur de fréquence. Sa conception permet des moteurs de classe de rendement allant jusqu'à IE4 dans les tailles standard CEI. Dans certains cas, ce type de moteur peut atteindre la puissance requise même avec une taille plus petite. Ces avantages sont compensés par des inconvénients dans la production. En effet, la température de fusion élevée du cuivre (environ 1100 °C) par rapport à l'aluminium (environ 660 °C) nécessite des outils et du matériel de moulage sous pression de qualité supérieure et augmente le coût des matériaux et de la production du moteur. De plus, le cuivre est nettement plus cher que l'aluminium. En raison de la résistance plus faible, les moteurs à rotor en cuivre ont souvent un courant de démarrage plus élevé et un couple de démarrage plus faible. Ceci doit être pris en compte lors de la conception et du remplacement d'anciens MAS.

Nombre de pôles	Pairs de pôles	Vitesse synchrone n_{sync} à 50 Hz tr/min
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10	5	600
12	6	500
14	7	429
16	8	375

Tableau 2: Vitesse synchrone selon le nombre de pôles



Illustration 9: Schéma d'un MAS (Source: Danfoss)

Moteur à aimants permanents (MAP)

Comparé au MAS, le MAP n'a pas d'enroulement de rotor, mais des aimants permanents qui reposent sur le rotor ou y sont intégrés. Dans le cas le plus simple, le stator est construit de manière analogue au MAS en tant que bobinage triphasé réparti.

Le MAP est un moteur synchrone, ce qui signifie qu'il n'y a pas de glissement entre le champ tournant du rotor et du stator comme dans le MAS. Les aimants permanents fournissent l'aimantation nécessaire de l'ensemble du moteur, ce qui s'effectue sans perte. Cela augmente le rendement du moteur par rapport au MAS qui présente des pertes de résistance plus importantes en cuivre (aluminium) ou dans le stator et le rotor, causées par le courant nécessaire à l'aimantation. Cette technique est utilisée depuis longtemps déjà dans les servomoteurs. Ce qui est nouveau, toutefois, est l'application en tant que moteur normalisé CEI et la conception associée en raison de son rendement plus élevé.

Pendant une courte période entre 2000 et 2010, les prix des aimants ont été très élevés, car les terres rares à haute teneur nécessaires à leur fabrication sont onéreuses. Aujourd'hui, les prix des terres rares ont à nouveau fortement chuté à la suite de l'exploitation de nouvelles mines pour ces matières premières ou de la disponibilité de substituts moins coûteux. Les fabricants examinent si des aimants avec ferrites peuvent éventuellement être utilisés à la place des terres rares. Les premiers tests sont très prometteurs.

Un inconvénient des MAP est la nécessité d'utiliser un convertisseur de fréquence pour le fonctionnement. De plus, ce convertisseur doit recevoir un retour d'information de position pour adapter de manière optimale le champ magnétique à la position des aimants permanents et pour générer la rotation.

Deux autres inconvénients des moteurs sont le risque de démagnétisation à courant et température élevés, ce qui est rare dans la pratique, et un problème d'entretien des

moteurs: en raison des puissants aimants présents dans le rotor, il est difficile d'extraire et de maintenir le stator avec l'outil spécial approprié.

En pratique, les MAP actuels atteignent les classes de rendement IE3 et IE4. Pour que le MAP puisse également être utilisé avec pertinence dans des applications à régime constant sans convertisseurs de fréquence et leurs pertes propres, un MAP spécial à démarrage en ligne a été développé. Il s'agit d'une solution hybride de MAS et MAP. Il est équipé d'un rotor à cage dans lequel des aimants sont intégrés entre la surface et l'axe. Il en résulte une construction plus complexe du rotor, ce qui rend le moteur plus cher. Cependant, il présente un avantage significatif par rapport à un MAP conventionnel: il peut être démarré et exploité directement sur le réseau sans convertisseur de fréquence. L'enroulement de la cage est actif au démarrage. Lorsque le moteur a accéléré à la vitesse spécifiée par la fréquence du secteur, il se comporte comme un MAP et passe en mode de fonctionnement synchrone.

Cette forme de démarrage présente également un inconvénient: le moteur peut tourner en arrière au démarrage (pour un demi-pas polaire maximum). Ce couple alternant au démarrage est également présent sur le MAS raccordé au réseau. Cependant, il est beaucoup plus prononcé avec le MAP à démarrage en ligne. De plus, les pics de couple au démarrage peuvent être très élevés - dans les cas extrêmes, jusqu'à 17 fois le couple nominal. Le type de moteur ne maîtrise pas le démarrage en service intensif et ne possède pas de plage dynamique élevée. De plus, le moteur peut tomber en désynchronisation lors de pics de charge ou sous une charge un peu trop élevée, ce qui dégrade considérablement le rendement. Il réagit également de manière sensible à la sous-tension, comme cela peut être le cas lors de fluctuations du secteur.

En exploitation de réseau, les MAP à démarrage en ligne atteignent les classes de rendement IE3 et IE4. Il convient de noter qu'avec une exploitation recourant à un convertisseur, possible en principe, les rendements peuvent sou-



Illustration 10: Deux MAP, à gauche avec aimants incorporés, à droite avec aimants montés en surface (Source: Danfoss)

vent chuter de 5% à 10% par rapport au fonctionnement sur secteur. La raison en est l'enroulement de la cage qui agit comme un enroulement amortisseur. Les formes de construction disponibles sont conformes à la norme CEI ou sont légèrement plus petites. De plus, des problèmes d'approvisionnement en terres rares se posent dans ce moteur, car des aimants permanents sont utilisés ici aussi. L'utilisation de MAP à démarrage en ligne doit être examinée de manière critique, car IE4 peut également être réalisé avec un MAS en cuivre.

Electronically commutated motor (ECM)

Le ECM existe dans la pratique sous de nombreuses variantes. Par exemple, il est utilisé comme un petit actionneur de quelques watts, mais également dans le chauffage, la ventilation et la climatisation comme un rotor extérieur dans les ventilateurs ainsi que dans les circulateurs à rotor noyé. Il est souvent déclaré par les fabricants comme un moteur extrêmement efficace. Cela est particulièrement vrai pour les micro-entraînements, où le ECM, par exemple, le moteur universel ou à bague de déphasage (rendement inférieur à 30%) est clairement supérieur. Selon la version, les rendements des moteurs EC actuels sont comparables à ceux des moteurs asynchrones IE2 à IE4.

Semblable au MAP, le rotor est équipé d'aimants et le stator porte le bobinage triphasé. Dans le concept original, le moteur EC fonctionnait avec un courant continu à commutation électronique (Direct Current, DC), qui ne circulait toujours qu'entre deux brins, d'où le nom BLDC (moteurs CC sans balai) ou ECM (Electronically Commutated Motor). Technologiquement, le BLDC fait partie des moteurs à courant alternatif. Il s'ensuit que le terme BLDC peut facilement induire en erreur.

Pour compenser les inconvénients du concept BLDC tels que le courant de phase plus élevé et l'ondulation de couple, les fabricants ont mis au point de meilleures méthodes de contrôle. Des méthodes sans capteur sont disponibles entre-temps. Les deux concepts - le BLDC ainsi que le nouveau contrôle sinusoïdal à modulation de largeur d'impulsion (modulé PWM) - se retrouvent sous le terme de moteur EC. Par conséquent, il est difficile pour l'utilisateur de distinguer s'il s'agit d'un BLDC ou d'un concept amélioré, de type MAP. En raison des aimants permanents, les éléments déterminants concernant les terres rares et la maintenance sont les mêmes que dans le MAP.

Le moteur synchrone à réductance (MSR)

Les moteurs synchrones à réductance, qui se passent d'aimants coûteux, sont une autre variante des moteurs triphasés. Ils utilisent la force de réductance résultant de la variation de la résistance magnétique en fonction de la

position du rotor. Cette technique n'est pas nouvelle, mais revient sur le marché aujourd'hui. En effet, les constructeurs n'ont pas encore optimisé le rendement énergétique de ces moteurs. Des découpes spéciales des tôles du rotor guident les lignes magnétiques à l'intérieur du rotor et créent ainsi un moment de réductance à haut rendement énergétique. Des rendements allant de IE2 à IE4 sont actuellement disponibles dans la pratique, et plutôt IE2 pour des puissances plus petites. Les moteurs n'atteignent la classe de rendement IE4 qu'à partir d'une puissance d'environ 15 kW. En outre, ils présentent un très bon comportement à bas régime.

Pour fonctionner sur le réseau, les moteurs synchrones à réductance, comme le MAP, nécessitent un convertisseur de fréquence. Actuellement, ces moteurs sont encore préférentiels par des coûts plutôt élevés. Il faut toutefois s'attendre à une chute des prix avec l'augmentation des quantités, car la construction et la production sont relativement simples.

À l'instar du MAP à démarrage en ligne, le moteur MSR «Direct-on-Line» (DOL) utilise le principe du rotor à cage. Il remplit les zones ouvertes de la plaque de rotor avec de l'aluminium et les court-circuite aux extrémités. Là encore, le gros avantage est que ce moteur peut être démarré et exploité directement sur le réseau. En même temps, il en résulte un meilleur $\cos \varphi$. L'inconvénient est que l'amortissement supplémentaire de l'enroulement de la cage génère à nouveau des pertes plus élevées en fonctionnement avec un convertisseur de fréquence.

Avantages et inconvénients des moteurs très efficaces

Une plus grande Efficacité accrue du moteur est fondamentalement une contribution positive à l'économie d'énergie électrique. Les coûts supplémentaires qui en résultent doivent être compensés par les économies d'énergie réalisées pendant le fonctionnement. C'est généralement le cas après plus de 2000 heures de fonctionnement par an en moins de 5 ans. De plus, un dimensionnement correct

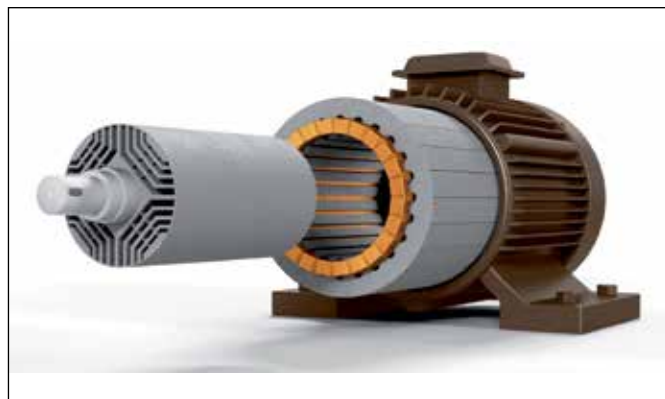


Illustration 11: Schéma d'un MSR (Source: Danfoss)

et une exploitation adaptée à la charge sont toujours économiques et réduisent le coût total. Certaines technologies de moteur peuvent utiliser des moteurs plus petits et plus légers offrant les mêmes performances et un rendement plus élevé. Des pertes plus faibles et donc des températures plus basses ont généralement un effet positif sur la durée de vie technique et les coûts d'exploitation.

Lorsque le rendement augmente, la vitesse nominale des MAS et MAP augmente légèrement. Cet effet est dû au glissement plus faible entre la fréquence du secteur et la vitesse du rotor. Lors d'un remplacement en l'état d'un ancien moteur par un nouveau moteur de taille égale (sans exploitation avec CF), il convient de considérer que les pompes et les ventilateurs, par exemple, fonctionneront à un régime légèrement supérieur et transporteront ainsi davantage d'air ou d'eau qu'auparavant. Cela peut entraîner une consommation électrique plus élevée en dépit d'un moteur plus efficace 3^{ème} puissance à la vitesse. Cet effet peut être évité en ajustant la transmission (rapport de vitesse) ou en utilisant un CF.

Les économies réalisées grâce au passage d'IE3 à IE4 sont moins importantes que celles d'IE1 à IE2 il y a quelques années, c'est-à-dire que l'utilité marginale pour un rendement encore plus élevé diminue.

Un moteur IE4 peut ne pas être conseillé pour toutes les applications en raison de coûts initiaux plus élevés ou dans les applications avec de nombreux cycles de charge du fait de moments d'inertie éventuellement plus élevés. Cependant, un MAP avec un moment d'inertie de masse inférieur à celui d'un MAS peut être monté.

Certains des inconvénients des différentes technologies de moteur peuvent être atténués par des optimisations - par exemple, le comportement au démarrage du MAP à démarrage en ligne démarré directement sur le réseau. L'optimisation doit être effectuée dans l'ensemble de l'entraînement (moteur, CF, engrenage, transmission et application). Un bon moteur ne suffit pas à améliorer le rendement du système global, d'autres mesures peuvent également y contribuer: dimensionnement plus précis, réglage correct des composants individuels, meilleure adaptation de la charge pendant le fonctionnement, entraînement direct au lieu d'une transmission et engrenage, meilleur rendement de l'application (pompe, ventilateur, compresseur, etc.).

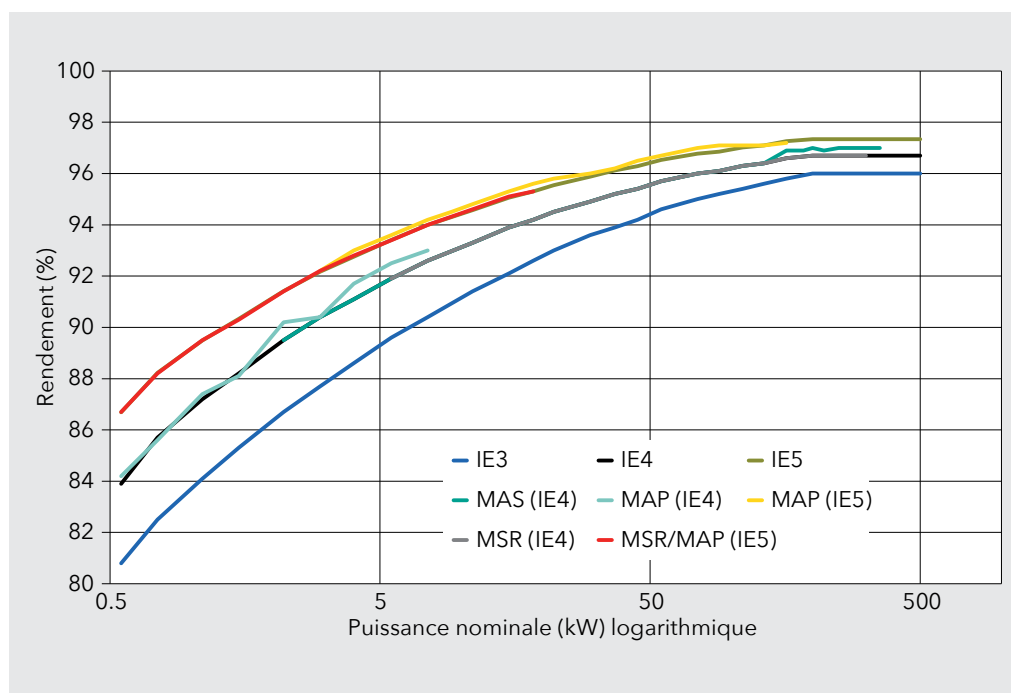


Illustration 12: Données de mesure de différentes technologies de moteur par rapport aux classes IE (Source: Anibal de Almeida, Motor Summit 2018)

Informations complémentaires

Notions et unités

Désignation	Abréviation	Unité	Indices, explication
Moteur asynchrone	MAS		
Moteur à aimants permanents	MAP		
Moteur à commutation électronique	ECM		
Moteur à courant continu sans balais	BLDC		
Moteur à réluctance synchrone	MSR		
Convertisseur de fréquence	CF		aussi: VFD (Variable Frequency Drive)
Direct-On-Line	DOL		directe sur le réseau
Line-Start			Démarrage à partir de la fréquence du réseau (sans CF)
Hybride	utilisable avec DOL ou CF		
Courant continu	CC	A	Direct Current
Courant alternatif	CA	A	Alternating Current
Puissance	P	kW	él: électrique m: mécanique
Rendement	η (eta)	-	
Couple	M	Nm	
Code IE	IE1, IE2, IE3, IE4		Classes de rendement des moteurs électriques selon CEI 60034-30-1

Normes et lois

Normes CEI pour classes de rendement des moteurs et tests de rendement

	Moteur avec vitesse fixe	Moteur avec vitesse régulée	Convertisseur de fréquence
Conditions générales, tolérances	IEC 60034-1	IEC 60034-1	
Test de rendement	IEC 60034-2-1	IEC 60034-2-3	IEC 61800-9-2
Classe d'efficacité	IEC 60034-30-1	IEC 60034-30-2	IEC 61800-9-2
Dimensions	IEC 60072-1/-2/-3		

Directives européennes

■ Règlement (UE) 2019/1781 de du 1^{er} octobre 2019, début de validité concernant l'efficacité énergétique des moteurs et des convertisseurs de fréquence: 1^{er} juillet 2021; voir art. 12. Le Règlement (CE) n° 640/2009 est abrogé à compter du 1^{er} juillet 2021.

Exigences minimales suisses

■ Loi sur l'énergie, Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE) du 1^{er} novembre 2017 (état au 1^{er} mars 2021).

■ Moteurs électriques alimentés par le secteur, annexe N° 2.7, Berne; en ce qui concerne l'efficacité énergétique des moteurs électriques, l'adoption du règlement (UE) 2019/1781 renforce progressivement les exigences minimales le 1^{er} juillet 2021 et le 1^{er} juillet 2023.

Sources et bibliographie complémentaire

■ Michael Burghardt, Offenbach, Deutschland: Motoren-Technologien im Effizienz-Check, 2014, www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/107212/8/

■ Jorge Estima: CISE - Electromechatronic Systems, Research Centre, Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P - 6201-001 Covilhã, Portugal, in: EEMODS 2017, Rom

■ John Petro: Future Trends in Motor System Efficiency, in: Motor Summit, 2018, Zurich

■ Anibal de Almeida: Electric Motors and Variable Speed Drives Efficiency - Adjusting MEPS to Technology Developments, in: Motor Summit, 2018, Zurich

■ Preston Reine: IHS Markit, A global update on the market for motor-driven systems, in: Motor Summit, 2018, Zurich

■ Impact Energy: Topmotors Market Report 2018, Zurich, www.topmotors.ch/fr/MarketReport

Note de l'éditeur

La fiche technique N°29 Nouvelles technologies de moteurs a été réalisée par Impact Energy dans le cadre du programme de mise en œuvre de systèmes d'entraînement efficaces de Topmotors. Elle a été élaborée par Conrad U. Brunner (iE), Michael Burghardt et Norbert Hanigovszki (Danfoss), Prof. Andrea Vezzini (BFH), Jürg Nipkow (ARENA), Rolf Tieben et Petar Klingel (iE). Lectorat et mise en page: Faktor Journalisten AG.