

> de puissance à faible coût, les ingénieurs ont obtenu avec ces moteurs plutôt simples et robustes des réactions à la commande meilleures encore que celles obtenues avec des moteurs à courant continu.

Le premier moteur triphasé construit était la « machine synchrone à excitation bobinée » que l'Allemand Friedrich August Haselwander développa en 1888 en modifiant un moteur à courant continu. Il ne nécessite pas d'aimants permanents coûteux, mais un rotor relativement complexe (voir l'encadré page 70). Un tel moteur équipe aujourd'hui par exemple la ZOE et la Kangoo Z.E., véhicules électriques de la marque Renault.

À peu près à la même époque a été inventé le premier moteur asynchrone. Son nom traduit un autre principe de fonctionnement : alors qu'une machine synchrone fonctionne à la fréquence de son champ magnétique tournant, un moteur asynchrone est construit de telle façon qu'il ne développe de couple que si son rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ tournant du stator. C'est l'Italien Galileo Ferraris qui introduisit ce concept, lors d'un exposé très remarqué en mars 1888, à Turin. Quelques mois plus tard, à New York, le Croate Nikola Tesla annonçait des principes similaires et fit fonctionner deux prototypes simples. Finalement, c'est le Russe Mikhaïl Dolivo-Dobrowolsky qui, à partir de 1889, développa au sein de la société allemande AEG le moteur asynchrone sous la forme que nous lui connaissons.

Aujourd'hui, presque tous les systèmes ferroviaires et les industries exploitent des

moteurs asynchrones. Le modèle S de la marque Tesla est aussi motorisé avec une machine asynchrone.

Le principe de moteur électrique le plus récent sur le plan historique est la machine synchrone à aimant permanent, qui n'a été pleinement développée qu'à la fin du siècle dernier, lorsque de puissants aimants à base de terres rares sont devenus disponibles. À poids égal, les moteurs à aimants permanents ont les meilleures performances, ce qui explique qu'ils motorisent aujourd'hui la plupart des voitures électriques. Ils sont particulièrement adaptés aux vitesses basses et moyennes, tandis que les moteurs asynchrones sont plus avantageux aux vitesses élevées. Un bon compromis entre les deux est offert par les moteurs synchrones à excitation bobinée déjà mentionnés, bien qu'ils soient un peu plus complexes à construire (leur rotor doit intégrer des bobines et deux bagues collectrices).

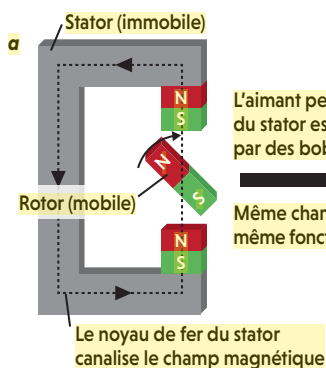
UN STATOR À CHAMP MAGNÉTIQUE TOURNANT

Dans les moteurs triphasés, des courants alternatifs sinusoïdaux alimentent les bobines du stator. Typiquement, trois courants déphasés de 120 degrés alimentent trois bobines réparties autour de la circonférence du stator. La superposition des trois champs magnétiques associés produit un champ magnétique d'amplitude constante tournant de façon uniforme autour de l'axe du rotor. Comme celui qui traverse un aimant, ce champ résultant présente un pôle nord et un pôle sud. Afin de le rendre plus uniforme, on utilise souvent

LE PRINCIPE DU MOTEUR ÉLECTRIQUE MULTIPHASÉ

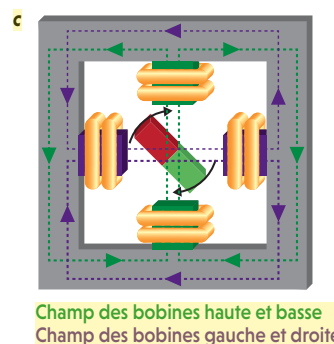
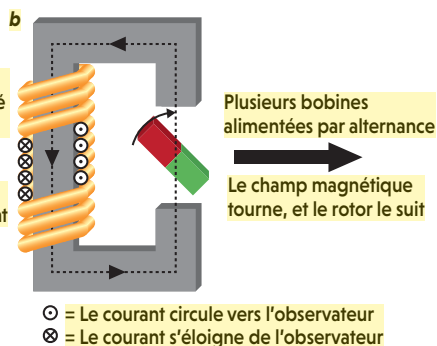
Les moteurs électriques exploitent les forces magnétiques pour transformer de l'énergie électrique, puis magnétique, en énergie mécanique. Soumis au champ magnétique d'un aimant permanent intégré au stator, un aimant permanent mobile (rotor) s'aligne avec ce champ (a). Le champ statorique peut aussi être créé par un électroaimant,

un bobinage où circule un courant continu et qui entoure un noyau de fer, lequel canalise le champ (b). Toutefois, dans ces deux configurations, le rotor s'immobilise une fois que les pôles se sont alignés. Pour le faire tourner, on peut placer sur le noyau une série de bobines alimentées par des courants alternatifs, déphasés de façon à créer un champ



L'aimant permanent du stator est remplacé par des bobinages

Même champ, même fonctionnement



pour chaque phase non pas une bobine, mais un groupe de deux ou trois bobines. De plus, les groupes ne sont pas déphasés de 120 degrés, mais plutôt de 90, voire de 60 degrés. Toute la circonférence du stator se retrouve alors occupée par des groupes de bobines, ce qui augmente le nombre de pôles magnétiques. On construit ainsi des machines asynchrones à deux paires de pôles (deux pôles nord et deux pôles sud) et des machines synchrones à trois ou quatre paires de pôles.

La force et, par conséquent, le couple et la puissance produits résultent du jeu qui s'établit entre le champ du stator et celui du rotor, qui constitue le «champ d'excitation». C'est par l'intermédiaire de ce dernier que sont transmises les forces qui se développent. Une métaphore éclaire cette transmission: tout se passe comme lorsqu'un véhicule en tracte un autre tombé en panne à l'aide d'une corde. Ce lien, qui équivaut au champ d'excitation, doit avoir une grande résistance, laquelle équivaut à la densité d'énergie de ce champ. C'est pourquoi les trois types de moteurs à champ tournant se distinguent les uns des autres par la façon dont le champ d'excitation est engendré. Dans un moteur synchrone à aimants permanents, le champ d'excitation est créé par des aimants... permanents; dans un moteur synchrone à excitation bobinée, il est créé par des... bobines.

Il existe aussi ce que l'on nomme des moteurs électriques asynchrones à cage d'écureuil. Leur rotor n'est pas fait de spires enroulées, mais plutôt d'une cage cylindrique dont les barres de cuivre, disposées entre deux anneaux qui les court-circuitent, sont

«torsadées» (voir l'encadré page suivante). Lorsque ce dispositif est plongé dans le champ tournant (donc variable) du stator, des courants sont induits dans la masse conductrice des barres (ce que l'on nomme des courants de Foucault), de telle façon à créer un flux magnétique s'opposant au flux du stator; et comme ce flux tourne, la cage suit ce mouvement. Ce fonctionnement explique pourquoi les moteurs asynchrones sont aussi nommés moteurs à induction.

DES AIMANTS PERMANENTS DE PLUS EN PLUS PUISSANTS, À BASE DE TERRES RARES

Le développement des moteurs synchrones à aimants permanents n'a été possible que parce qu'au cours du siècle dernier, les chercheurs ont mis au point des matériaux à l'origine d'aimants permanents toujours plus performants. Le premier d'entre eux était l'alliage aluminium-nickel-cobalt (AlNiCo). Dès les années 1940, on lui faisait atteindre des densités d'énergie magnétique de 150 kilojoules par mètre cube. Cependant, en raison de sa faible coercitivité, c'est-à-dire du faible champ magnétique nécessaire pour annuler son aimantation, l'aluminium-nickel-cobalt ne convient pas à la construction de moteurs électriques. Arrivée dans les années 1960, la ferrite a une densité d'énergie quelque trois fois plus faible, mais sa coercitivité élevée la rend utilisable dans les moteurs électriques. Elle a aussi l'avantage d'être peu coûteuse, de sorte qu'on l'emploie souvent dans les moteurs synchrones à aimants permanents simples et dans les moteurs à courant continu.

Depuis les années 1970, les aimants à base de terres rares sont devenus de plus en plus puissants. On a d'abord utilisé des alliages samarium-cobalt (SmCo), qui atteignent une densité d'énergie de 300 kilojoules par mètre cube, puis, à partir de 1990, du néodyme-fer-bore (NdFeB), dont la densité d'énergie magnétique peut aller jusqu'à 450 kilojoules par mètre cube. La stabilité en température des aimants au néodyme oblige à utiliser aussi un autre élément, également une terre rare, le dysprosium, qui est environ dix fois plus cher que le néodyme. En raison du monopole de la Chine, qui est de loin le plus gros producteur mondial de terres rares, le prix du dysprosium a connu dans le passé de brusques embardées. C'est pourquoi de nombreux grands constructeurs automobiles se préparent à introduire des moteurs électriques sans aimant permanent, c'est-à-dire des machines synchrones à excitation bobinée ou à cage d'écureuil.

Une autre caractéristique critique des aimants au néodyme est leur teneur élevée en fer (60%), et l'oxygène atmosphérique peut donc les oxyder. Une fois les aimants produits, >

magnétique tournant, mais d'amplitude constante (c). Soumis à ce champ, le stator tourne pour rester aligné avec lui. Pour ce faire, on utilise trois bobines réparties dans le stator et alimentées par des courants sinusoïdaux déphasés de 120 degrés (d).

