

Machines synchrones à double excitation

Les machines synchrones à double excitation sont constituées de deux sources d'excitation, à savoir des aimants permanents et des enroulements inducteurs. Ainsi, elles peuvent, dans une certaine mesure, combiner les avantages des machines à aimants permanents et des machines à excitation bobinée, notamment le rendement élevé, et la densité de couple élevée des machines à aimants permanents, et la souplesse de contrôle du flux des machines à excitation bobinée. Il existe de nombreuses topologies de machines synchrones à double excitation selon la répartition des deux sources d'excitation par aimants permanents, et par les enroulements inducteurs. On trouve ainsi des machines synchrones à double excitation série ou parallèle, comme il est possible de trouver des structures bidimensionnelles et tridimensionnelles. L'utilisation de l'excitation bobinée permet de contrôler le flux dans l'entrefer, et les performances en fonction des conditions de fonctionnement, ce qui est bénéfique pour de nombreuses applications, telles que les véhicules électriques, avec le fonctionnement à vitesse variable. Par rapport aux machines à aimants permanents conventionnelles, une flexibilité supplémentaire peut être utilisée pour ajuster le flux inducteur par le courant d'excitation. Par conséquent, un couple plus élevé à basse vitesse et une plage de vitesse de fonctionnement plus large, ainsi qu'un rendement élevé sur une large zone de fonctionnement peuvent être obtenus en employant des stratégies de commande appropriées. La double excitation fournit également une technique d'atténuation unique pour les défauts de surtension incontrôlés lors d'un fonctionnement à grande vitesse.

Les auteurs de cet ouvrage travaillent sur la conception et le contrôle des machines synchrones à double excitation depuis de nombreuses années. Ils sont à l'origine du développement de plusieurs nouvelles topologies de machines synchrones à double excitation. L'ouvrage est intéressant en ce qu'il inclut non seulement les structures de

machines synchrones à double excitation, mais également leurs stratégies de contrôle. Quelle satisfaction de voir que les aspects expérimentaux sont également abordés ! Actuellement, les machines synchrones à double excitation présentent encore certains défis, tels que des structures compliquées et une densité de couple relativement faible. Nous sommes persuadés que cet ouvrage servira très bien les chercheurs, les étudiants et les ingénieurs dans leurs recherches ultérieures pour diverses applications.

Professeur Z.Q. ZHU
Membre *fellow* de l'Académie royale des ingénieurs, de l'IEEE et de l'IET
Université de Sheffield, Royaume-Uni

Introduction

L'utilisation de plus en plus importante de l'énergie électrique dans le fonctionnement de nos sociétés, liée à la transition vers des usages propres et pérennes de l'énergie, nécessite de développer des outils et des méthodes permettant d'étudier les objets électrotechniques, de manière à assurer leur bon fonctionnement le plus longtemps possible. Ce qui suppose de disposer d'outils permettant d'appréhender leur comportement, en tant que composant, ainsi que dans les systèmes où ils se trouvent, sur l'ensemble de leur cycle de vie, et donc dans toutes les conditions de fonctionnement.

Les machines électriques en tant qu'organes de conversion électromécanique sont au cœur des systèmes électrotechniques et des chaînes de conversion énergétique. En amont, elles sont utilisées comme source d'énergie électrique (générateurs électriques). En aval, elles permettent de transformer l'énergie électrique en travail mécanique (moteurs et actionneurs électriques). Ces machines assurent ces fonctions de manière très efficace.

Le but de cet ouvrage est de présenter aux chercheurs et aux étudiants en génie électrique des outils leur permettant d'analyser le fonctionnement des machines synchrones sur l'ensemble du plan d'opération.

Dans cette monographie, l'accent est mis sur les machines synchrones à double excitation (MSDE). La thématique des MSDE, bien que n'étant pas une problématique fondamentale à proprement dit, permet d'apporter des réponses à des problématiques qui ne le sont pas moins : « défluxage » des machines à aimants permanents, optimisation énergétique, et enfin augmentation du coût des aimants permanents.

Parmi tous les types de machines électriques, les machines synchrones à aimants permanents sont celles ayant le meilleur rendement, lorsque le fonctionnement ne

nécessite pas de « défluxage ». Elles le doivent aux aimants permanents qui produisent un flux d'excitation quasiment sans pertes. Ce flux puissant créé par les aimants est cependant un inconvénient pour les fonctionnements à hautes vitesses, nécessitant un « défluxage ».

D'un point de vue fonctionnel, les MSDE permettent d'allier les avantages des machines à aimants permanents (très bon rendement énergétique) à ceux des machines à excitation contrôlable (facilité de fonctionnement à vitesse variable). Le flux d'excitation dans ces machines est la somme d'un flux créé par des aimants permanents et d'un flux d'excitation créé par des bobines. Cette hybridation permet une plus grande souplesse pour le fonctionnement à vitesse variable, et en parallèle, une optimisation du rendement énergétique de certains entraînements.

Les auteurs travaillent sur les MSDE depuis plus de deux décennies, et cet ouvrage est, en même temps, un recueil de leurs travaux sur le sujet et une réactualisation des travaux menés sur les entraînements à base de machines synchrones (Lajoie-Mazenc et Viarouge 1991 ; Amara *et al.* 2009). Il peut être utile autant à des chercheurs confirmés qu'à des étudiants désireux d'approfondir leurs connaissances sur les machines synchrones.

L'étude des machines synchrones à double excitation permet d'appréhender le comportement des autres familles de machines synchrones. Les machines synchrones à aimants permanents peuvent être considérées comme un cas particulier des MSDE, où l'excitation bobinée n'est pas mise à contribution ; les machines à excitation bobinée correspondent à des MSDE où les aimants sont remplacés par de l'air ; et enfin, les machines synchrones à réluctance variable correspondent à des MSDE où les aimants sont remplacés par de l'air, et l'excitation bobinée non utilisée.

Cette monographie débute par une présentation du principe de la double excitation pour les machines synchrones. Ce premier chapitre permettra de délimiter les contours de ce qui est entendu par le concept de machines à double excitation, et de le situer dans la riche famille des machines électriques. Un état de l'art actualisé est présenté, où l'accent est mis sur le composant MSDE. Différentes structures rencontrées dans les littératures scientifique et technique seront analysées.

Le second chapitre est consacré au comportement des MSDE lorsqu'elles fonctionnent en mode moteur. Une étude originale du comportement de ces machines, dans leur environnement, est présentée. Elle permet d'analyser le fonctionnement des MSDE en tenant compte de leur alimentation (De Doncker *et al.* 2011). Des modèles de type circuits électriques seront utilisés à cet effet. L'approche purement analytique sera privilégiée pour la détermination des grandeurs de contrôle, pour différentes lois de commande, selon les jeux de paramètres des modèles utilisés. Lorsqu'il devient

complexe de pousser plus avant les approches analytiques, les *scripts* permettant de les finaliser numériquement seront mis à disposition des lecteurs. Le comportement des MSDE est analysé sur l'ensemble de leur plan de fonctionnement.

Cette monographie se termine par une présentation de quelques structures conçues, réalisées et étudiées dans nos laboratoires respectifs (SATIE et GREAH). Ce chapitre permettra d'illustrer concrètement les concepts et les développements théoriques précédents.

Nous espérons que cette monographie contribuera à une meilleure compréhension du fonctionnement des MSDE et à un éveil de nouvelles idées dans nos laboratoires de recherche.