

Avant-propos

La commande des machines électriques est un domaine de travail très dépendant du contexte et de l'environnement des moteurs employés. En effet, c'est l'utilisation de la machine qui détermine ses lois de commande. Celles-ci sont fortement liées à la nature de la charge, aux grandeurs que l'on veut contrôler, aux régimes de fonctionnement recherchés et donc, par voie de conséquence, aux modèles adoptés.

La nature même de la charge conditionne largement le choix d'une loi de commande et les techniques de sa mise en œuvre. Les couples de charge les plus courants sont les couples d'inertie, constants ou variables, éventuellement aléatoires. Les premiers ont pour origine des masses tournantes homogènes et symétriques, jouant le rôle de volant d'inertie, ou hétérogènes et dissymétriques, induisant des fluctuations de couple et des vibrations. La variabilité des inerties est engendrée, soit par une déformation géométrique de la charge comme dans le régulateur de Watt ou un bras articulé, soit par une variation de sa masse tournante comme dans une bobineuse.

Les couples de charge non inertiels s'ajoutent en général aux précédents. La pesanteur, dans les appareils de manutention en particulier, est à l'origine de couples de charge qui se cumulent avec les couples d'inertie créés par le mouvement. La viscosité du milieu ambiant est responsable de couples résistants proportionnels à la vitesse (couples de frottement visqueux) que l'on rencontre dans l'utilisation des ventilateurs, des hélices de navire et, en général, dans tous les dispositifs mécaniques lubrifiés comme les paliers. Les frottements secs induisent des efforts déterminés par les états de surface des matériaux en contact et la vitesse du déplacement. Etant très complexes à modéliser, ils sont délicats à prendre en compte dans les équations. Il en résulte des couples mal maîtrisés et une imprécision dans le positionnement.

L'entraînement des charges par les moteurs électriques s'opère presque toujours par l'intermédiaire d'une transmission dont le rôle est, soit de modifier la gamme de vitesses ou de couples accessibles, soit de transformer la nature du mouvement (rotation/translation). Ces transmetteurs modifient notablement les propriétés des charges car, non seulement ils affectent l'ordre de grandeur des couples, mais ils introduisent des non-linéarités qui peuvent perturber le fonctionnement du système.

C'est pourquoi cet ouvrage débute par une présentation des principaux problèmes rencontrés dans les transmissions mécaniques.

Nous verrons ensuite les moyens dont on dispose pour commander un ensemble « convertisseur-machine-transmissions-charge ». Cela vise à donner au lecteur les informations les plus utiles et les plus récentes sur les techniques permettant d'élaborer les lois de commande les mieux adaptées au problème que l'on se propose de résoudre.

En général, dans les applications classiques, on s'efforce d'asservir trois grandeurs mécaniques : la vitesse, la position ou le couple (séparément ou simultanément). Pour cela, on fait appel aux techniques de l'automatique. Si les commandes linéaires classiques (continues ou discrètes, PID) sont encore très utilisées (à juste titre, compte tenu de leurs avantages), des méthodes plus récentes et plus efficaces dans les cas difficiles peuvent être mises en œuvre. Les commandes optimales (linéaires quadratiques, linéaires quadratiques gaussiennes, etc.), les commandes adaptatives (avec ou sans modèle de référence), les commandes par modes glissants ou les commandes « bang-bang » permettent d'aboutir à des solutions satisfaisantes mais nécessitent souvent des modèles plus complets et plus détaillés que la commande linéaire. Les commandes prédictives, la commande par réseaux de neurones et par la logique floue permettent d'affiner la commande et d'améliorer les performances des asservissements quand les modèles sont très mal connus.

Enfin, puisque les modèles utilisés dans la commande des machines impliquent plusieurs disciplines (automatique, électrotechnique, informatique et mécanique) un mode de représentation commun de ces modèles paraît souhaitable. Les graphes à liens ou *bond graphs* remplissent parfaitement ce rôle et peuvent rendre des services appréciables comme outils utiles à la commande. Nous n'en parlerons pas ici, car un ouvrage spécialisé¹ traite entièrement le problème dans la même collection.

La commande et la modélisation ne sont applicables qu'avec des valeurs numériques de paramètres correctes. C'est donc le rôle de l'identification, appliquée

1. Geneviève Dauphin-Tanguy, *Les bond graphs*, Traité IC2, Série Systèmes automatisés, Hermès, Paris, 2000.

aux machines électriques, de fournir ces données. Bien que de nombreuses méthodes de mesure permettent d'accéder à certaines grandeurs, la plupart des modèles employés en commande font apparaître des constantes qui regroupent plusieurs grandeurs électriques et ne sont donc pas mesurables directement. De plus, les valeurs nécessaires sont des valeurs dynamiques, impossibles à obtenir par des mesures classiques. C'est pourquoi nous avons consacré un chapitre aux méthodes d'identification les mieux adaptées au domaine qui nous concerne.

Le bon fonctionnement de la machine électrique est un élément déterminant dans les applications. Il est abordé dans cet ouvrage par le biais du diagnostic des défauts de la machine. Cette technique est fondée sur l'identification permanente du système et la surveillance des variations de ses paramètres. Le diagnostic et la commande adaptative sont des domaines où les techniques d'identification sont indispensables.

Les techniques de commande font appel à des notions classiques en automatique telles que la stabilité, la robustesse et les observateurs, ces derniers étant indispensables pour utiliser certaines grandeurs non accessibles à la mesure. Il n'est cependant pas question de développer ici ces notions fondamentales qui prendraient une part importante de l'ouvrage pour une trop grande spécificité et peu d'originalité.

Enfin, nous aborderons la commande de systèmes animés par un ensemble de machines électriques nécessitant une coordination des actions de chacun des éléments. Chaque moteur est commandé par les mêmes lois que celles qu'on lui appliquerait s'il était isolé mais, au niveau des consignes, apparaît une coordination (donc un couplage) entre machines. Afin de pouvoir réaliser des opérations complexes comme des déformations de la courbure de surfaces importantes, des usinages simultanés, des mouvements de bras articulés ou des ouvertures à géométrie variable, plusieurs modes de coordination sont utilisés.

Le plus évident est la synchronisation, qui est une coordination par le temps. Elle impose, à des instants donnés, des vitesses ou des déplacements spécifiques à chaque moteur. Les lois de commande individuelles de chaque actionneur sont alors couplées, soit de manière discrète par un système de rendez-vous, soit de façon continue quand les durées des actions sont imposées par des contraintes de fonctionnement du système.

La position est aussi une variable de couplage dans les systèmes multimoteurs. La consigne de position donnée à l'un d'entre eux va réagir sur les consignes des autres moteurs. C'est le cas, par exemple, des ouvertures à géométrie variable utilisées en médecine pour l'irradiation de tumeurs ou du VLT (*Very Large Telescope*) dont les gigantesques miroirs se déforment sous leur propre poids. Ils sont placés sur une multitude de petits vérins électriques qui permettent une

correction très précise du rayon de courbure, nécessitant le couplage en position d'un millier de moteurs.

Enfin, la vitesse est aussi un moyen de coordination des commandes d'un ensemble de moteurs. C'est ainsi que sur les machines-outils (et bien d'autres dispositifs) les vitesses d'avance et de rotation de broches ne sont pas indépendantes et doivent être coordonnées comme les positions. On rencontre aussi ce type de coordination dans les chaînes de montage et les dispositifs de convoyage où le changement de vitesse d'une bande transporteuse doit être répercuté sur toutes les autres.

Compte tenu de la difficulté d'élaborer une théorie générale à ce niveau, nous avons préféré présenter des exemples de systèmes multimoteurs illustrant les principaux types de coordinations. La coordination par le temps (le robot), la coordination par la position (le collimateur multilame), la coordination par la vitesse (les machines-outils).

La présentation du contenu de cet ouvrage a été choisie pour rendre accessible au plus grand nombre les concepts qui y sont développés. Ce livre s'adresse surtout aux lecteurs qui sont confrontés à des problèmes à la marge de leur spécialité et qui trouveront ici une réponse à leurs interrogations, permettant ainsi une meilleure approche de la conception de systèmes complexes. C'est un outil facilitant le dialogue entre experts de spécialités différentes, mais aussi un moyen commode d'accroître la culture scientifique de base de tout ingénieur.

René HUSSON