

# Chapitre IV : Commande de la machine asynchrone



Objectifs intermédiaires du chapitre :

- Présenter les stratégies de contrôle scalaire et vectoriel (savoir)
- faire une commande de l'actionneur selon un cahier de charge (savoir faire)

Les pré-requis pour ce chapitre regroupe :

- Principe de fonctionnement du moteur asynchrone
- Principe de fonctionnement des onduleurs
- Calcul d'un régulateur

On distingue deux types de commandes ; les commandes scalaires et les commandes vectorielles.

Commande scalaire	Commande vectorielle
• Basée sur le modèle régime permanent	• basée sur le modèle transitoire
+ Simple à implanter	+ Précise et rapide
- Dynamique lente	+ Contrôle du couple à l'arrêt
Contrôle des grandeurs en amplitude	Contrôle des grandeurs en amplitude et en phase

## 1. Exercice

[solution n°7 p.24]

Dans un onduleur de tension à commande adjacente avec diviseur capacitif et fil neutre

Chaque interrupteur est fermé durant

- $T/2$
- $2T/3$

## 2. Exercice

[solution n°8 p.24]

Dans un onduleur de tension à commande adjacente avec diviseur capacitif et fil neutre

Les interrupteurs doivent être bidirectionnels

- en tension
- en courant
- les deux

## 3. Commande Scalaire

Plusieurs commandes scalaires existent selon que l'on agit sur le courant ou sur la tension. Elles dépendent surtout de la topologie de l'actionneur utilisé (onduleur de tension ou de courant). L'onduleur de tension étant maintenant le plus utilisé en petite et moyenne puissance, c'est la commande en  $V/f$  (V sur f) qui est la plus utilisée.

Cf. "commande scalaire"

### Méthode

---

Le principe est de maintenir  $V/f = \text{Constant}$  ce qui signifie garder le flux constant.

Le contrôle du couple se fait par l'action sur le glissement.

le couple est directement proportionnel au carré du rapport de la tension sur la fréquence statorique.

En maintenant ce rapport constant et en jouant sur la fréquence statorique, on déplace la courbe du couple électromagnétique (en régime quasi-statique) de la machine asynchrone

En fait, garder le rapport constant revient à garder le flux constant. Quand la tension atteint sa valeur maximale, on commence alors à décroître ce rapport ce qui provoque une diminution du couple que peut produire la machine. On est en régime de "défluxage". Ce régime permet de dépasser la vitesse nominale de la machine, on l'appelle donc aussi régime de sur-vitesse

A basse vitesse, la chute de tension ohmique ne peut pas être négligée. On compense alors en ajoutant un terme de tension  $V_0$

### Remarque

---

On ne néglige  $R_s$  ici que pour avoir une écriture simple du couple, pour montrer certaines propriétés ainsi que le principe de la commande. On discutera de la compensation des chutes ohmiques par la suite.

## 4. Commande Vectorielle

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps [BLA 72]. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations... ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique.

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courants et donc du couple.

Une fois que l'on maîtrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. On parle alors de régulation en cascade ; les boucles sont imbriquées l'une dans l'autre. Il est évident que pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif, pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparaît alors clairement que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit à son tour être imposé par l'application des courants.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. On se retrouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple.

La commande vectorielle vient régler ce problème de découplage des réglages du flux à l'intérieur de la machine de celle du couple.

Cf. "commande vectorielle"

## 4.1. Histoire

K. Hasse, de l'université de Darmstadt, et F. Blaschke, de l'université technique de Brunswick, sont les pères de la commande vectorielle des moteurs à courant alternatif. Le premier propose la commande vectorielle indirecte en 1968, le second en proposant la commande vectorielle directe en 1971. Werner Leonhard, de l'université technique de Brunswick pose les bases de la commande à flux orienté et contribue à rendre les moteurs à courant alternatifs compétitifs face aux moteurs à courant continu.

Ce n'est cependant qu'avec la commercialisation des microprocesseurs dans le début des années 1980, que la commande des moteurs à courant alternatif se démocratise. Au départ, la commande à flux orienté est plus coûteuse, plus complexe et moins facile à maintenir que la commande des moteurs à courant continu. En effet, les premières demandaient encore de nombreux capteurs, amplificateurs et autres composants électroniques pour leur fonctionnement.

La transformée de Park est utilisée largement pour analyser et modéliser les machines synchrones et asynchrones. Elle est la clé de voute de la commande à flux orienté. La publication de Robert H. Park de 1929 a d'ailleurs été classée en 2000 comme étant la deuxième en termes d'influence au xxe siècle dans le domaine de l'électronique de puissance.. Son apport principal a été de permettre le remplacement des équations différentielles linéaires par des coefficients constants dans le temps.

## 4.2. Principe

Par construction, la machine à courant continu produit un champ magnétique statorique toujours perpendiculaire au rotor, la position de ce dernier agissant sur la manière dont le stator est alimenté. La commande vectorielle cherche à reproduire cette configuration dans le cas des machines alternatives, qui sont globalement plus compactes et plus simples à construire.

Les machines à courant continu à excitation séparée, la vitesse de rotation du moteur  $\Omega$  et le couple  $C$  sont découplés. La première ne dépend que de la force contre-électromotrice  $E$ , elle-même égale à une constante multipliée par le courant d'excitation, tandis que le second ne dépend que du courant  $I_i$ .

Par rapport à une commande scalaire  $U/f$ , elle présente l'intérêt de permettre la commande séparée du couple et du flux, et donc de garder le couple dans une plage définie en toute circonstance.

### 4.3. Hypothèses d'application

Pour que la transformée de Park simplifie les équations et permettent l'utilisation de la commande à flux orienté, il faut que les hypothèses suivantes soient satisfaites:

le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé, autrement dit le flux varie de manière linéaire avec le courant ;

les pertes par courants de Foucault sont négligées ;

Les courants, tensions et flux sont sinusoïdales

Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor. Elles sont homogènes ;

la machine doit être alimentée, comme on le fait dans la pratique, par un système de tensions triphasées sans neutre. Dans ce cas, la somme des 3 courants est forcément nulle et la composante homopolaire est nulle.

### 4.4. Commande à flux orienté directe, indirecte et sans capteur

Les méthodes de commande vectorielle, directe et indirecte, se différencient principalement par la méthode de détermination de l'angle de Park qui représente la phase du flux orientée dans le repère lié au stator.

Dans la commande indirecte, le courant statorique et la vitesse du rotor,  $\omega_r$  et  $\omega_s$ , sont mesurés. La première mesure donne la pulsation statorique  $\omega_s$ , la seconde l'angle de Park. Grâce à la connaissance de  $\omega_r$  et  $\omega_s$ , on peut calculer le glissement. Il est nécessaire de connaître de façon précise la position du rotor pour pouvoir déterminer de la même façon la position du flux rotorique. L'estimation du flux rotorique par rapport au rotor se fait en boucle ouverte. Elle sera donc d'autant plus précise que les paramètres utilisés pour son calcul correspondront aux paramètres réels de la machine.

Dans la commande directe, l'amplitude des flux et l'angle de Park sont déterminés par le calcul directement à partir de la mesure des tensions et des courants.

La méthode indirecte est plus courante car elle permet de se passer d'un calculateur ou capteur de flux. De plus, elle fonctionne correctement sur toute la plage de vitesse.

La commande sans capteur présente des avantages en termes de coûts et de fiabilité. Elle déduit la vitesse de rotation du rotor et l'amplitude du flux de la mesure des tensions et courants statoriques. Elle requiert pour cela un estimateur en boucle ouverte ou un observateur en boucle fermée.

Le défaut principal de la boucle ouverte est que le couple maximal ne peut être délivré pour une vitesse trop faible, typiquement 0,8 Hz, alors que pour la boucle fermée, celui-ci peut être délivré à l'arrêt.

#### 4.5. Modulation à largeur d'amplitude : en source de courant ou de tension

La commande à flux orienté utilise généralement un onduleur à modulation de largeur d'impulsion qui gère donc la commutation des transistors du variateur de vitesse électrique en fonction de la consigne de tension ou de courant qui lui parvient. En effet, l'onduleur peut fonctionner soit en source de tension soit en source de courant. La première a plusieurs défauts : elle requiert un circuit extérieur pour la protection contre les courts-circuits, la montée en tension ( $\frac{dv}{dt}$ ) est très brutale, un court-circuit interne peut se produire en cas de tension transitoire à cause d'une mauvaise injection de courant dans la gâchette de l'IGBT.

Dans une commande à flux orientée, la fréquence de commutation est généralement constante.

#### 4.6. Régulation

Des régulateur PI classiques sont utilisés pour l'asservissement des commandes à flux orientés. Des filtres passe-bas sont parfois ajoutés, afin d'éviter que les oscillations du courant causées par la commutation des transistors ne soient amplifiées par le régulateur et perturbent la commande. Cet ajout détériore toutefois les performances du système. Dans le cas des variateurs de vitesse à hautes performances, comme les servo-drive, une fréquence de commutation très élevée (typiquement 10 kHz) est requise pour pouvoir se passer de filtres.

Si un régulateur PI est utilisé, la réponse à un échelon présente un dépassement.

#### 4.7. Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

La commande vectorielle a les avantages suivants :

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique)
- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase

Elle a également certains inconvénients :

- Coûteuse (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP...). Le processeur doit être capable de calculer l'algorithme environ toutes les millisecondes.
- Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique
- Nécessité d'un modulateur pour la commande rapprochée de l'onduleur qui provoque des retards, surtout basse fréquence de modulation (grande puissance). Ces retards sont responsables d'une augmentation du temps de réponse en couple, ce qui pénalise les variateurs utilisés en traction.
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle  $\theta_s$  estimé.
- La vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.
- De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple.

Par rapport à la commande directe du couple, l'algorithme de la commande vectorielle doit être calculé moins fréquemment. Le capteur de courant ne doit pas être aussi bon dans le cas de la commande vectorielle que pour une commande directe du couple. La première est donc globalement moins coûteuse que la seconde.

## 5. Exercice :

Un moteur asynchrone à cage d'écureuil connecté en étoile présente les caractéristiques et paramètres suivantes:

400V, 50 Hz, 4 pôles, 1370 tours / minute,  $R_s = 2\Omega$ ,  $R_r' = 3\Omega$ ,  $X_s = X_r' = 3,5\Omega$ .

Le moteur est contrôlé par un onduleur avec un rapport  $V / f$  constant. En supposant que les courbes de couple de vitesse du moteur soient des lignes droites parallèles, calculez:

- 1) La vitesse pour une fréquence de 30 Hz et 80% du couple à pleine charge.
- 2) La fréquence pour une vitesse de 1000 tr / min et un couple à pleine charge.
- 3) Le couple pour une fréquence de 40 Hz et une vitesse de 1100 tr / min.