

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

---

## III.1 Introduction

La difficulté majeure rencontrée dans la commande de la machine asynchrone réside dans le fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une d'elles se répercute sur l'autre. Dans la machine à courant continu à excitation séparée, ces deux variables sont naturellement découplées, ce qui explique la relative simplicité de la commande de cette machine.

En effet le control vectoriel permet de contrôler les valeurs instantanées des grandeurs électriques de la machine asynchrone ce qui permet d'avoir une dynamique assez élevée grâce au découplage du flux et du couple. Un des grands avantages de la commande vectorielle est l'obtention d'un couple élevé, pendant les transitoires, ce qui se traduit par une réponse rapide aux changements de charge ou de consigne de vitesse. Dans la littérature spécialisée , on dénombre beaucoup de techniques employées pour la C.V des MAS entre outre, la plus utilisée est celle par orientation du flux rotorique qui sera présentée dans ce chapitre[43].

Le présent chapitre consiste à introduire la méthode du contrôle vectoriel indirecte par orientation du flux rotorique. La méthodologie consiste, en premier lieu, à présenter les équations du modèle de la machine, représentés sous forme de schémas bloc, puis à adjoindre la commande sur cette dernière formulation[44].

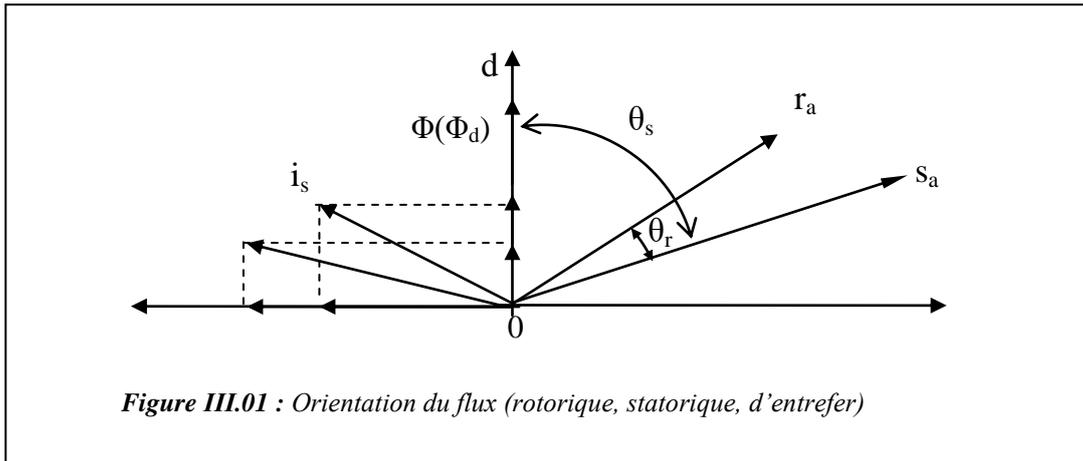
## III.2 la commande vectorielle par orientation du flux

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques qui présentent un couplage complexe entre les grandeurs de la machine. L'objectif de la commande par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple. Mathématiquement, la loi de commande consiste à établir l'ensemble des transformations pour passer d'un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l'indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée[44].

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe «d.q» et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. La composante transversale  $i_{qs}$  du courant statorique fixe le flux et la composante en quadrature  $i_{qd}$ , le couple. On retrouve le comportement d'une machine à courant continu.

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

La liaison du repère «d.q» avec le champ tournant  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$  est assurée par l'autopilotage de la machine [45]. Un choix judicieux de l'angle de l'axe d'orientation du repère «d.q» entraîne l'alignement de l'axe d sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme l'indique la figure ci-dessous.



Le flux ( $\Phi$ ) peut représenter:

- 1 Flux rotorique :  $\Phi_{rd} = \Phi_r$  ;  $\Phi_{rq} = 0$
- 2 Flux statorique :  $\Phi_{sd} = \Phi_s$  ;  $\Phi_{sq} = 0$
- 3 Flux d'entrefer :  $\Phi_{rg} = \Phi_g$  ;  $\Phi_{gq} = 0$

Dans les trois cas, le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux [46].

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique [44]. Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

### III.3 Principe de la commande vectorielle par orientation flux rotorique

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe d d'une référence solidaire au champ tournant de vitesse  $\omega_s$ , donc on peut remarquer les propriétés suivantes:

- La composante transversale du flux rotorique est nulle.
- L'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique.

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

---

La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

D'après ces propriétés on peut écrire:

$$\Phi_{rq} = 0$$

$$\Phi_{rd} = \Phi_r = cst$$

$$i_{rd} = 0$$

Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \tag{III.01}$$

Les flux dans le référentiel de Park sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_{sc} I_{ds} + Msr I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_{sc} I_{qs} + Msr I_{qr} \\ \phi_{dr} = Msr I_{ds} + L_{rc} I_{dr} \\ \phi_{qr} = Msr I_{qs} + L_{rc} I_{qr} \end{cases} \tag{III.02}$$

En tenant compte de ces équations, la puissance mécanique  $P_m$  peut s'écrire :

$$P_e = \frac{3}{2} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r)$$

Avec :

$$\frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) = p\Omega$$

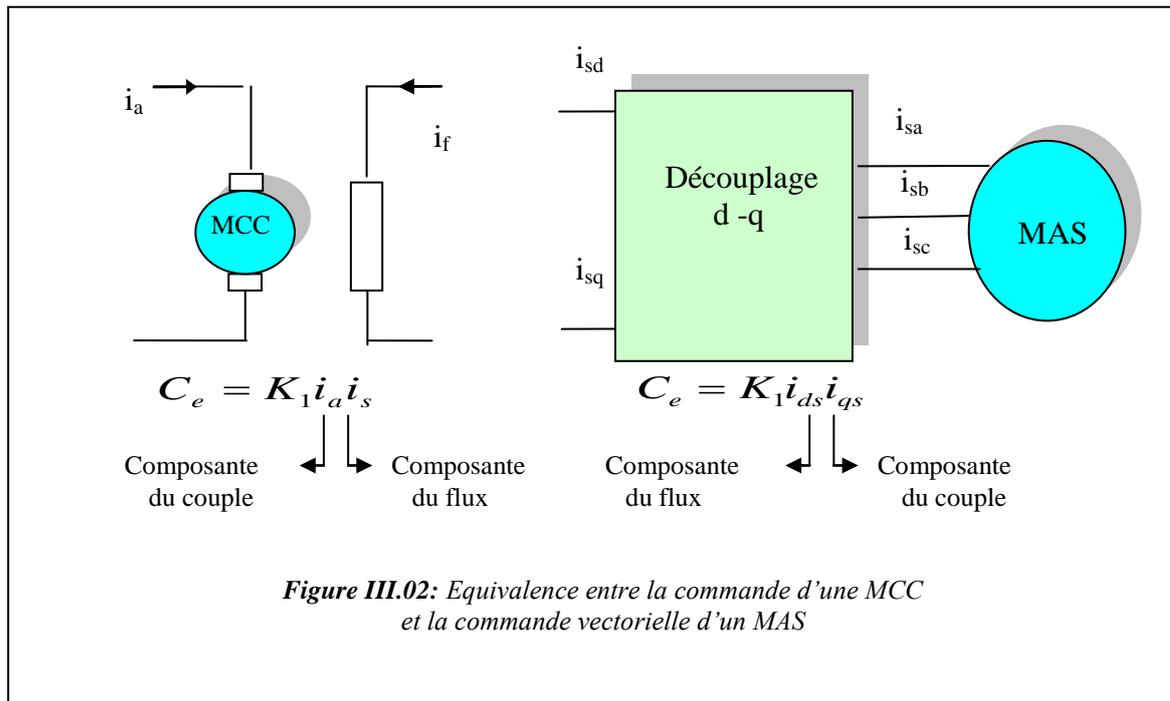
Or la puissance mécanique est égale à  $C_e \cdot \Omega$  , on en tire l'expression du couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{3}{2} (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \tag{III.03}$$

La présente expression est analogue à celle des couples d'une machine à courant continu. La figure (III.02) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une machine asynchrone.

Ainsi le système balais-collecteur dans la machine à courant continu est remplacé, dans le cas de la machine asynchrone par le système d'autopilotage qui permet de réaliser une harmonie entre la fréquence de rotation et celle des courants induits dans le rotor.[\[45\]](#)

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes .la première appelée méthode directe qui à été développé par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par k.Hasse.

### III.4 Modèle de la machine asynchrone en vue de sa commande

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés aux modèles de la machine asynchrone qui permettent de simuler son fonctionnement en régimes transitoires ainsi, qu'à ceux qui débouchent sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel par orientation de flux rotorique ou statorique. Nous verrons par la suite le modèle qui permet de tenir compte de défaillance au rotor.

Pour la mise en équation, nous retenons les mêmes hypothèses et les mêmes transformations (**Clark et Park**) utilisées dans le 2<sup>ème</sup> chapitre.

Les équations qui lient le flux, le couple et le courant statorique découlent du modèle de Park à quatre paramètres .En effet, le choix du repère d-q tournant à  $\omega_s$  (repère lié au champ tournant) et calé sur le flux rotorique revient à poser que :

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{qr} = 0 \tag{III-04}$$

Les équations correspondantes au modèle de commande de la machine alimentée en tension par orientation du flux rotorique s'écrivent comme suite:

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \varphi_{dr} = \varphi_r \\
 V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \sigma L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} \\
 V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \sigma L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}} \varphi_r + \omega_s \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} \\
 T_r \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = \frac{3}{2} M_{sr} \cdot I_{ds} \\
 \omega_r = \frac{\frac{3}{2} M_{sr}}{T_r \cdot \varphi_r} \cdot I_{qs} \\
 C_e = \frac{3}{4} p \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{L_{rc}} \cdot \varphi_r \cdot I_{qs}
 \end{array} \right. \quad (III-05)$$

avec :

$$T_s = \frac{L_{sc}}{R_s} \quad \text{et} \quad T_r = \frac{L_{rc}}{R_{rdq}}$$

Appliquons la transformation de Laplace, les équations précédentes peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \varphi_r = \varphi_{dr} \\
 V_{ds} = (R_s + s \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{ds} + s \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2 \cdot L_{rc}} \cdot \varphi_r - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} \\
 V_{qs} = (R_s + s \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{qs} + \omega_s \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2 \cdot L_{rc}} \varphi_r \\
 \varphi_r = \frac{\frac{3}{2} M_{sr}}{1 + s \cdot T_r} \cdot I_{ds} \\
 \omega_r = \frac{\frac{3}{2} M_{sr}}{T_r \cdot \varphi_r} \cdot I_{qs} \\
 C_e = \frac{3}{4} p \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{L_{rc}} \cdot \varphi_r \cdot I_{qs}
 \end{array} \right. \quad (III-06)$$

Il existe des méthodes de commande vectorielle directe et indirecte :

Dans la commande indirecte, l'angle de Park  $\theta_s$  est calculé à partir de la pulsation statorique, elle-même reconstituée à l'aide de la vitesse de la machine et de la pulsation rotorique  $\omega_r$ . En ce qui concerne la commande directe, l'angle de Park est calculé directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées. Dans notre étude on va adopter la commande vectorielle indirecte.

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

---

La commande vectorielle est dite à boucle ouverte s'il n'y a pas de régulation de flux. Le flux est imposé dans ce cas par  $I_{ds}$ , de plus la pulsation statorique peut uniquement être estimée par la relation III-06. Dans la version boucle fermée, cette pulsation est estimée à partir de la valeur du flux rotorique ou du courant magnétisant. Dans ce cas, on tient compte de la constante de temps rotorique  $T_r$ .

### III.4.1 commande vectorielle directe

Elle nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa position. Celui-ci doit être vérifié quel que soit le régime transitoire effectué. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du système. La mesure directe permet de connaître exactement la position du flux. Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple, quel que soit le point de fonctionnement. Toutefois, il nécessite l'utilisation d'un capteur de flux, ce qui augmente considérablement le coût et rend plus fragile son utilisation. L'application de cette méthode impose les inconvénients, parmi ces inconvénients:

- ✓ non fiabilité de la mesure du flux.
- ✓ problème du filtrage du signal mesuré.
- ✓ précision de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- ✓ coût de production élevé (capteurs + flux) [47].

### III.4.2 Commande vectorielle indirecte

La commande vectorielle indirecte est la plus utilisée d'une manière générale. Ceci s'explique par le fait que dans la méthode indirecte, la connaissance de la position du flux rotorique n'est pas nécessaire. Toutefois, elle exige une bonne connaissance des paramètres de la machine, plus particulièrement de la constante de temps rotorique, qui varie considérablement avec la température et le niveau de la saturation. Une mauvaise estimation de la constante de temps rotorique implique donc une erreur dans le calcul de la vitesse de glissement et par conséquent apporte une dégradation des performances de la commande qui se traduit par des oscillations au niveau du couple de la machine.

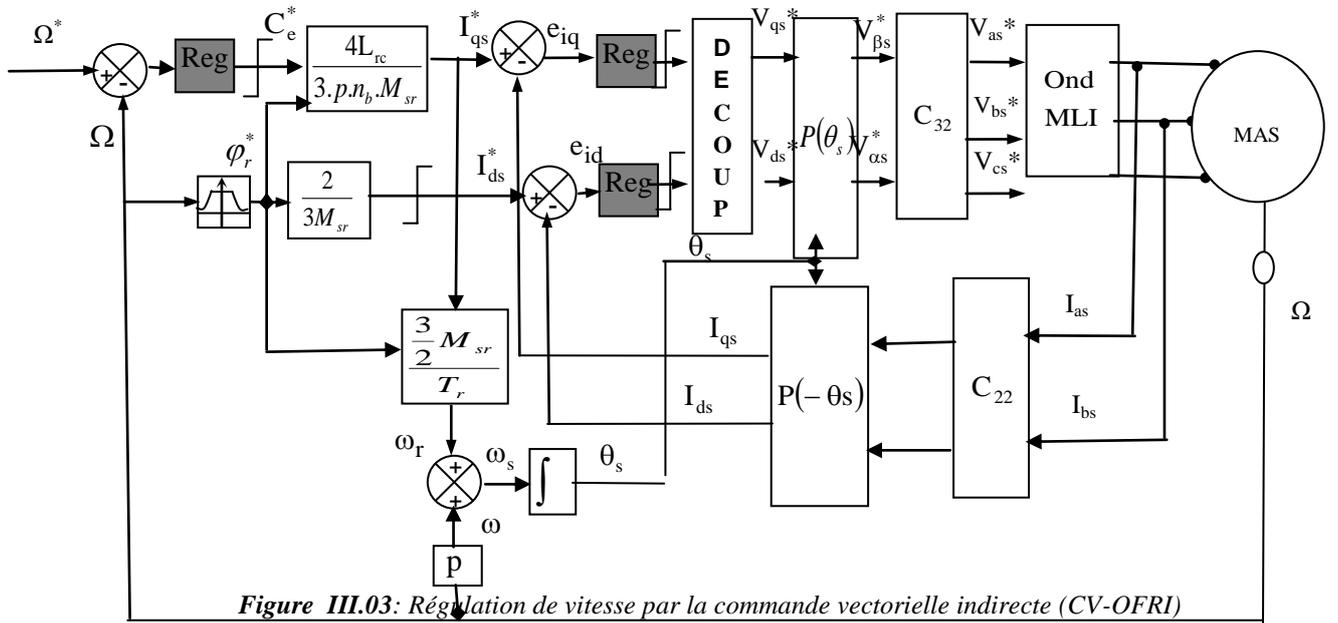
La figure III.03 représente le schéma bloc de la commande vectorielle à orientation du flux rotorique indirect (CV-OFRI) de la machine asynchrone, avec la régulation de vitesse et la régulation des deux courants  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  dans le repère  $(d, q)$ .

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Le calcul de  $\theta_s$  se fait en sommant la "pulsation rotorique" avec la vitesse électrique ( $\omega_s = \omega_r + p.\Omega$ ), ce qui donne la "pulsation statorique" puis en intégrant cette dernière, on obtient  $\theta_s$  :

$$\theta_s = \int \omega_s . dt = \int \left( p.\Omega + \frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{T_r . \varphi_r^*} . I_{qs}^* \right) . dt \quad (\text{III-07})$$

Le schéma complet de la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté est le suivant :



- **Estimation**

Cette fonction est chargée d'élaborer le vecteur du flux et les composantes du courant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  à partir de la résolution numérique du système (machine asynchrone).

- **Découplage**

Les tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  sont couplées, les équations s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{ds} = \sigma L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} + \left( R_s + R_{dqr} \frac{3.n_b.M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \right) I_{ds} - \omega_s . \sigma . L_{sc} . I_{qs} - R_{dqr} \frac{3.n_b.M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \varphi_r \\ V_{qs} = \sigma L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} + \left( R_s + R_{dqr} \frac{3.n_b.M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \right) I_{qs} + \omega_s . \sigma . L_{sc} . I_{ds} + \omega \frac{n_b.M_{sr}}{2L_{rc}} \varphi_r \end{cases} \quad (\text{III-08})$$

Avec:

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

$$\varphi_r = \frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{1 + s \cdot T_r} \cdot I_{ds} \tag{III-09}$$

$$\omega_r = \frac{3}{2} \frac{M_{sr}}{T_r \varphi_r} \cdot I_{qs}$$

Ces expressions peuvent- être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle ; mais elles ont un gros inconvénient : les tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  influent à la fois sur  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  donc sur le flux et le couple (couplage entre les actions sur les axes d et q). Il est donc nécessaire de réaliser un découplage entre  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  qui permet de contrôler de manière indépendante (le couple par la composante  $I_{qs}$  et le flux rotorique par la composante  $I_{ds}$ ).

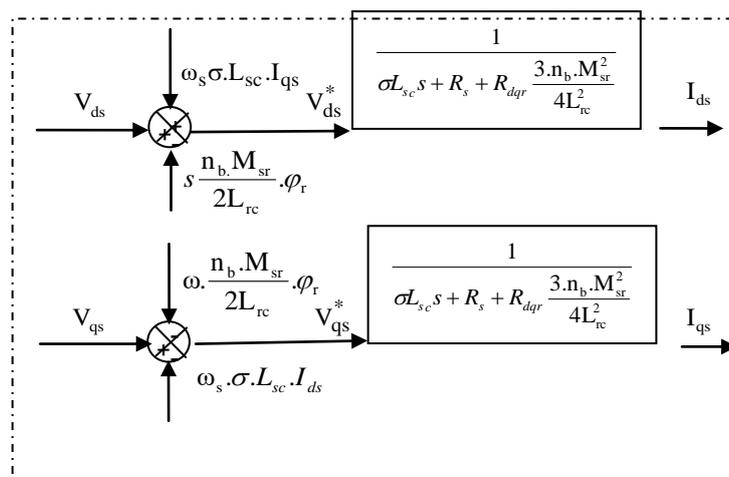
Il existe différentes techniques de découplage:

- ✓ découplage utilise un régulateur.
- ✓ découplage par retour d'état
- ✓ découplage par compensation.

Dans notre étude on va adopter la méthode de découplage par compensation. Cela revient à définir deux nouveaux variables de commande  $V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  qui sont les termes de découplage dans l'élaboration de.

Ces termes de découplage s'écrivent à partir des équations de la machine. Après ce découplage, le calcul des correcteurs ( $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ ) s'en trouve simplifié.

Le schéma bloc de la figure III.02 représente la machine avec le couplage entre les axes d et q.



*Figure III.04: Description du couplage*

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

A partir des expressions (III-08), il est possible de définir les termes de découplage  $\omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs}$ ,  $s \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}} \cdot \varphi_r$  et  $\omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds}$  et  $\omega \cdot \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}} \cdot \varphi_r$  qui sont considérés, dans la suite, comme des perturbations vis-à-vis de la régulation. Pour ne pas compliquer cette étude, nous considérons le cas de décomposition des tensions.

Les équations sont de la manière :

$$\begin{cases} V_{ds} = V_{ds}^* + e_{ds} \\ V_{qs} = V_{qs}^* + e_{qs} \end{cases} \quad \text{(III-10)}$$

Appliquons la transformation de Laplace sur les équations (IV-05), on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \left( \sigma L_{sc} s + R_s + R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \right) I_{ds} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} - R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \varphi_r \\ V_{qs} = \left( \sigma L_{sc} s + R_s + R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \right) I_{qs} + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} + \omega \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}^2} \varphi_r \end{cases} \quad \text{(III-11)}$$

Par identification entre les équations (III-10) e (III-11), on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = \frac{1}{A(s)} I_{ds} \\ V_{qs}^* = \frac{1}{A(s)} I_{qs} \end{cases} \quad \text{(III-12)}$$

$$\begin{cases} e_{ds} = -\omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} - R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4L_{rc}^2} \varphi_r \\ e_{qs} = +\omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} + \omega \frac{n_b \cdot M_{sr}}{2L_{rc}^2} \varphi_r \end{cases}$$

Avec :

$$A(S) = \frac{1}{\sigma L_{sc} s + R_s + R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4L_{rc}^2}}$$

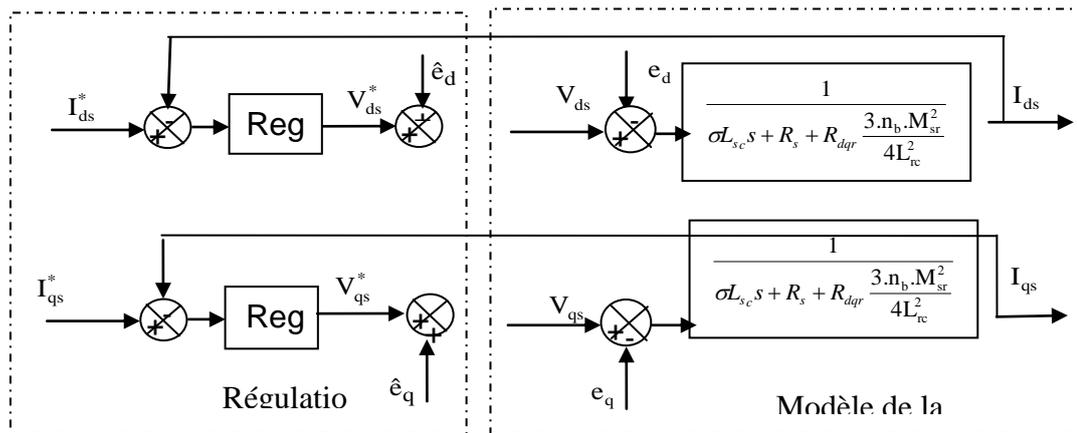
$V_{ds}^*$  et  $V_{qs}^*$  Sont les tensions de réglage.

$e_{ds}$  et  $e_{qs}$  Sont les forces électromagnétiques de couplage.

Les perturbations  $e_{ds}$  et  $e_{qs}$  sont compensées par un terme identique de manière à ce que la fonction de transfert équivalente soit celle indiquée dans (III-12).

Enfin, le schéma bloc suivant représente la régulation découplée souhaitée :

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



**Figure. III.05 :** Découplage par addition des termes de compensation

Les structures des régulations sont choisies pour répondre à plusieurs nécessités. Il convient d'abord de régler la machine de façon à imposer à la charge la vitesse, la position ou le couple. Il est également nécessaire d'assurer certaines fonctions supplémentaires les plus importantes concernent les sécurités.

Pour s'assurer que les courants réels suivent les courants de consigne, des régulateurs de courants agissant sur les tensions de commande sont indispensables (cas d'une alimentation en tension).

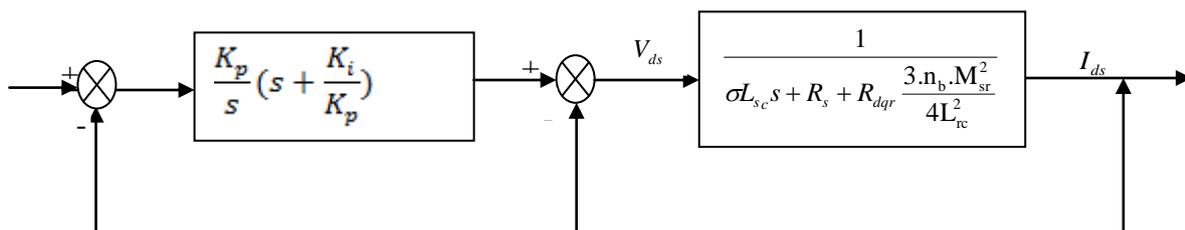
Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus et les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes ont l'avantage d'être simples et faciles à mettre en œuvre.

Dans le cas de notre étude on se limite à la technique du contrôle (PI).

### III.4.3 Régulation des courants

Pour chaque boucle de courant un régulateur proportionnel-intégral est adopté où l'action proportionnelle permet de régler la rapidité et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne.

D'après les équations de la machine associées au découplage par compensation, le schéma fonctionnel du contrôle du courant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  est représenté par la figure suivante :



**Figure. III.06 :** Boucle de régulation du courant

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

---

On pose :

$$A(s) = \frac{1}{\sigma L_{sc} s + R_s + R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4 L_{rc}^2}} = \frac{b}{s + a}$$

D'où :

$$a = \frac{R_s + R_{dqr} \frac{3 \cdot n_b \cdot M_{sr}^2}{4 L_{rc}^2}}{\sigma L_{sc}} \quad \text{et} \quad b = \frac{1}{\sigma L_{sc}}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte  $F_{d0}(s)$  est comme suit:

$$F_{TBO}(s) = A(s) \cdot K_p \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) = \frac{1}{R_s + R_{dq} \frac{3 n_b \cdot M_{sr}^2}{4 L_{rc}^2}} \cdot K_i \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) = \frac{A_0}{1 + \tau s} K_i \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)$$

$$\text{avec } A_0 = \frac{1}{R_s + R_{dq} \frac{3 n_b \cdot M_{sr}^2}{4 L_{rc}^2}} \quad \text{(III-13)}$$

avec

$$\frac{K_p}{K_i} s + 1 = 1 + \tau s \Rightarrow \tau = \frac{K_p}{K_i} = \frac{1}{a}$$

Avec :

$\tau$  : la constante de temps dans la boucle interne.

La fonction de transfert en boucle fermée  $F_{TBF}(s)$  est :

$$F_{TBF}(s) = \frac{\frac{A_0}{1 + \tau s} K_i \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right)}{\left( s + \frac{A_0}{1 + \tau s} K_i \left( \frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \right)} \Rightarrow \tau_{BF} = \frac{1}{A_0 K_i} \quad \text{(III-14)}$$

Les paramètres du régulateurs sont alors donnés par :

$$\begin{cases} K_i = \frac{1}{A_0 \tau_{bf}} \\ K_p = \frac{\tau}{A_0 \tau_{bf}} \end{cases} \quad \text{(III-15)}$$

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Les mêmes valeurs des coefficients sont adoptés pour les deux boucles de courant  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ .

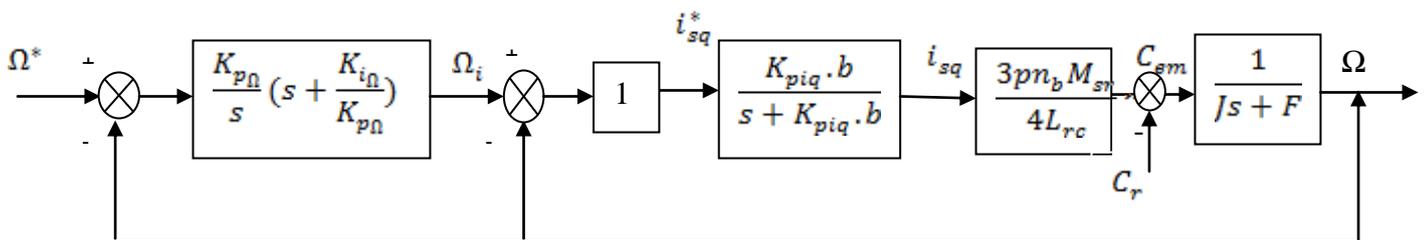
Les boucles des courants jouent un rôle primordial puisque, tout en assurant le contrôle vectoriel, elles garantissent les protections nécessaires à l'ensemble convertisseur- machine.

Ainsi, l'introduction de limitations sur les références des courants  $I_{ds}^*$  et  $I_{qs}^*$  assure la maîtrise des courants même s'il apparaît un problème sur les boucles de régulation externe.

### III.4.4 Régulation de vitesse

Le réglage du couple se fait par l'action sur le courant  $I_{qs}$  plutôt que par une action sur le flux. Par conséquent, la sortie du régulateur de la boucle externe (vitesse) constitue la référence (l'entrée) de la boucle interne (courant  $I_{qs}$ ).

La correction intégrale proportionnelle est largement utilisée pour la commande vectorielle des machines asynchrones, en raison de ses bonnes performances : simplicité et facilité d'implémentation.



*Figure. III.07 : Boucle de régulation de la vitesse*

Le schéma de réglage de la vitesse est représenté par la figure suivante :

A cause de l'existence du pôle lent ( $-F/J$ ) proche de l'axe imaginaire (comportement proche d'un intégrateur), il vaut mieux utiliser un régulateur PI.

La fonction de transfert en boucle fermée de la boucle de réglage interne est :

$$\frac{\Omega}{\Omega_i} = \frac{3.K_v.K_q.b.p.n_b.M_{sr}.\varphi_r / (4.L_{rc}.J)}{s^2 + \left(K_p.b + \frac{F}{J}\right)s + \frac{K_p..b.F}{J} + \frac{3.K_p.b.p.n_b.M_{sr}.\varphi_r}{4.L_{rc}.J}} \quad (\text{III-16})$$

La fonction est de la forme standard  $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi.\omega_n.s + \omega_n^2}$ , d'où on aura :

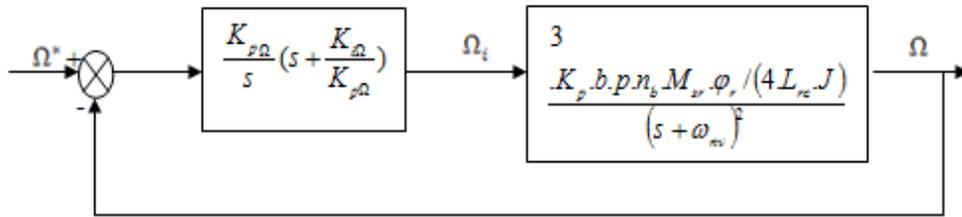
## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

$$\begin{cases} 2\xi\omega_{nv} = K_p \cdot b + \frac{F}{J} \\ \omega_{nv}^2 = \frac{K_p \cdot b \cdot F}{J} + \frac{3 \cdot K_p \cdot b \cdot F \cdot n_b \cdot M_{sr} \cdot \varphi_r}{4 \cdot L_{rc} \cdot J} \end{cases}$$

La fonction de transfert en boucle interne peut s'écrire comme suivant :

$$\frac{\Omega}{\Omega_i} = \frac{3K_p \cdot b \cdot p \cdot n_b \cdot M_{sr} \cdot \varphi_r / (4 \cdot L_{rc} \cdot J)}{(s + \omega_{nv})^2}$$

Le schéma de réglage devient :



*Figure. III.08 : Boucle définitive de régulation de vitesse*

Par compensation de zéro introduit par le régulateur avec un des deux pôles du système on a :

$$\frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} = \omega_{nv} \tag{III-17}$$

La fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{3 \cdot K_{p\Omega} \cdot K_p \cdot b \cdot p \cdot n_b \cdot M_{sr} \cdot \varphi_r / (4 \cdot L_{rc} \cdot J)}{s^2 + \omega_{nv} s + \frac{3 \cdot K_{p\Omega} \cdot K_p \cdot b \cdot p \cdot n_b \cdot M_{sr} \cdot \varphi_r}{4 \cdot L_{rc} \cdot J}} \tag{III-18}$$

Par identification avec l'équation standard  $\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$ , on aura :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_{n\Omega} = \omega_{nv} \\ \omega_{n\Omega}^2 = \frac{3 \cdot K_{p\Omega} \cdot K_p \cdot b \cdot p \cdot n_b \cdot M_{sr} \cdot \varphi_r}{4 \cdot L_{rc} \cdot J} \end{cases}$$

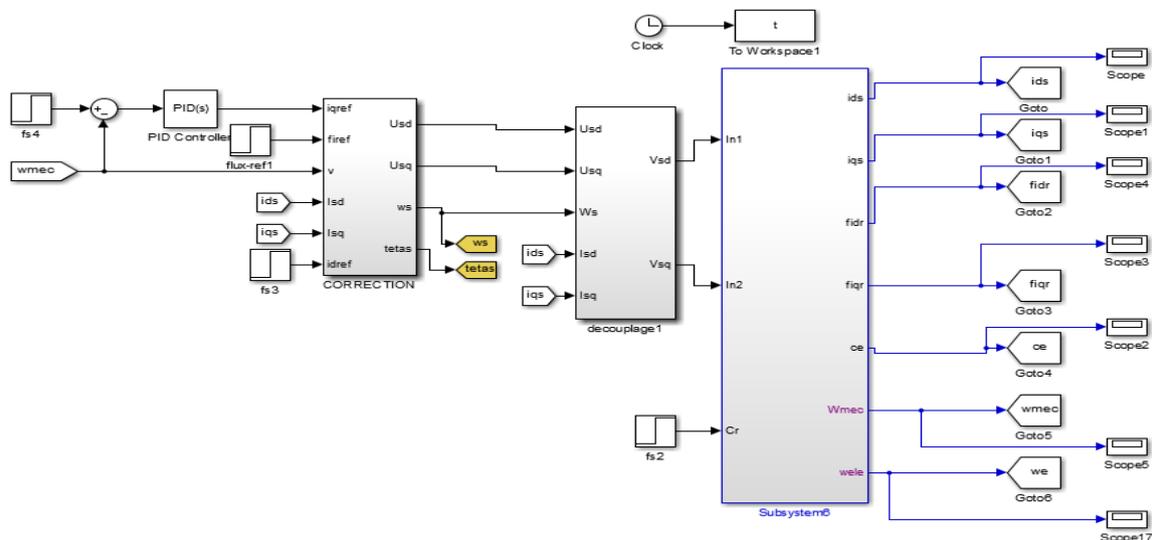
# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

On trouve :

$$\begin{cases} K_{p\Omega} = \frac{4.L_{rc}.J.\omega_{n\Omega}^2}{3.K_{piq}.b.p.n_b.M_{sr}.\varphi_v} \\ K_{i\Omega} = K_{p\Omega}.\omega_{nv} \end{cases}$$

## III.5 Présentation des résultats de simulation

Avant de présenter les résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte en tension de la machine asynchrone, nous devons signaler que la simulation est effectuée dont le schéma-bloc de la simulation est représenté par la figure (III-09).

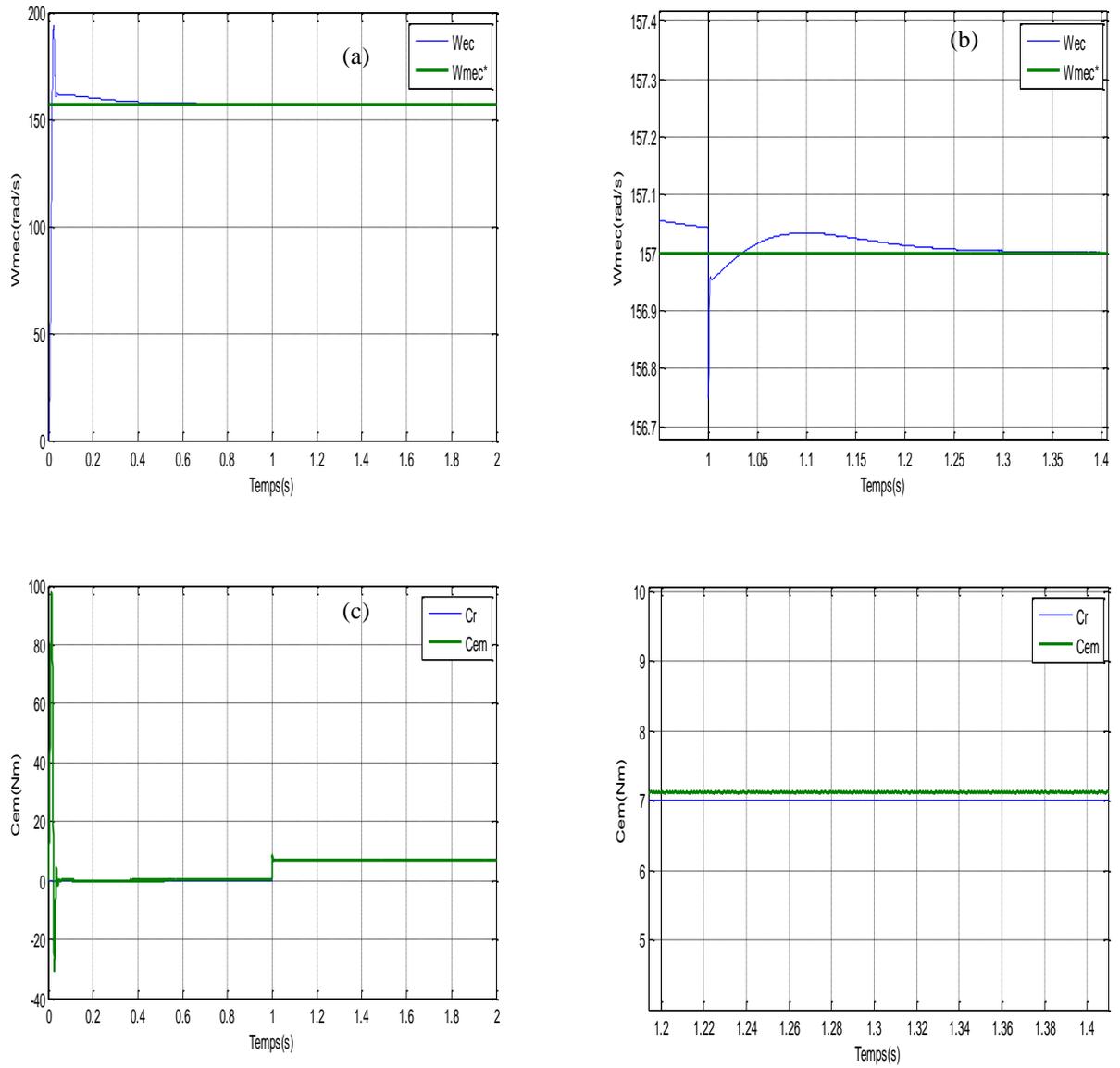


*Figure III.09: Schéma de simulation*

### ● Fonctionnement sain de la machine

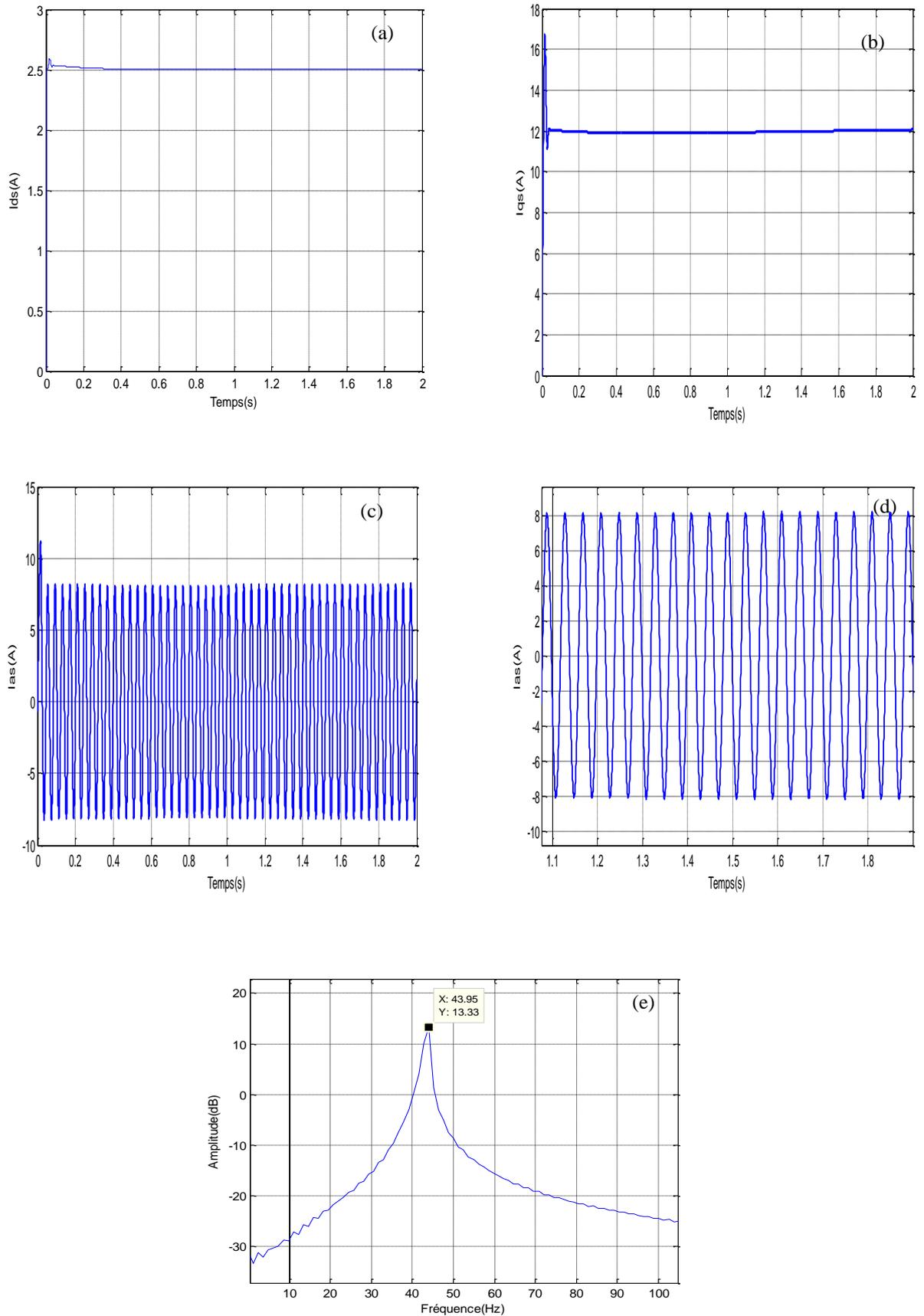
Afin de tester les performances de la commande, différents essais sont effectués. La figures III.10 .présentent séparément un essai de suivi de trajectoire de la vitesse, l'évolution du courant statorique, les courants de Park et l'écart de l'entrée des correcteurs de ces courants dans la commande vectorielle. Comme le montre les résultats, la vitesse rotorique suit bien sa référence et comme celle-ci est une grandeur contrôlée, on ne constate aucun changement notable, cela peut être expliqué, par la performance ou la robustesse de la commande appliquée. On remarque aussi que le courant  $I_{sd}$  reste constant lorsque la machine est à vitesse variable (bon découplage).

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



**Figure III.10:** (a) vitesse de rotation (c) le couple électromagnétique, (b) (d) leurs zooms respectivement, sous une charge de 7Nm ( $g=0.12$ ),  $W_{mec}^*=157$ rad/s

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



**Figure III.11:** (a) le courant  $I_{ds}$  (b) le courant  $I_{qs}$ , (c) et (d) le courant statorique et leurs zooms (e) Analyse spectrale du courant, sous une charge de 7Nm ( $g=0.012$ )

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

- Test de robustesse pour la variation de la vitesse

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la vitesse ( $\Omega_{\text{ref}} = 120\text{rad/s}$ ) montre que cette variation entraîne une variation de la fréquence statorique ce qui influe sur les courants, les flux et le couple.

On remarque que le système répond positivement à ce test, la vitesse suit sa nouvelle référence, le couple subit un pic de transction lors du passage d'un mode à l'autre, puis rejoint sa valeur avec une petite erreur.

Le découplage existe toujours, donc la régulation est robuste de point de vue contrôle de vitesse.

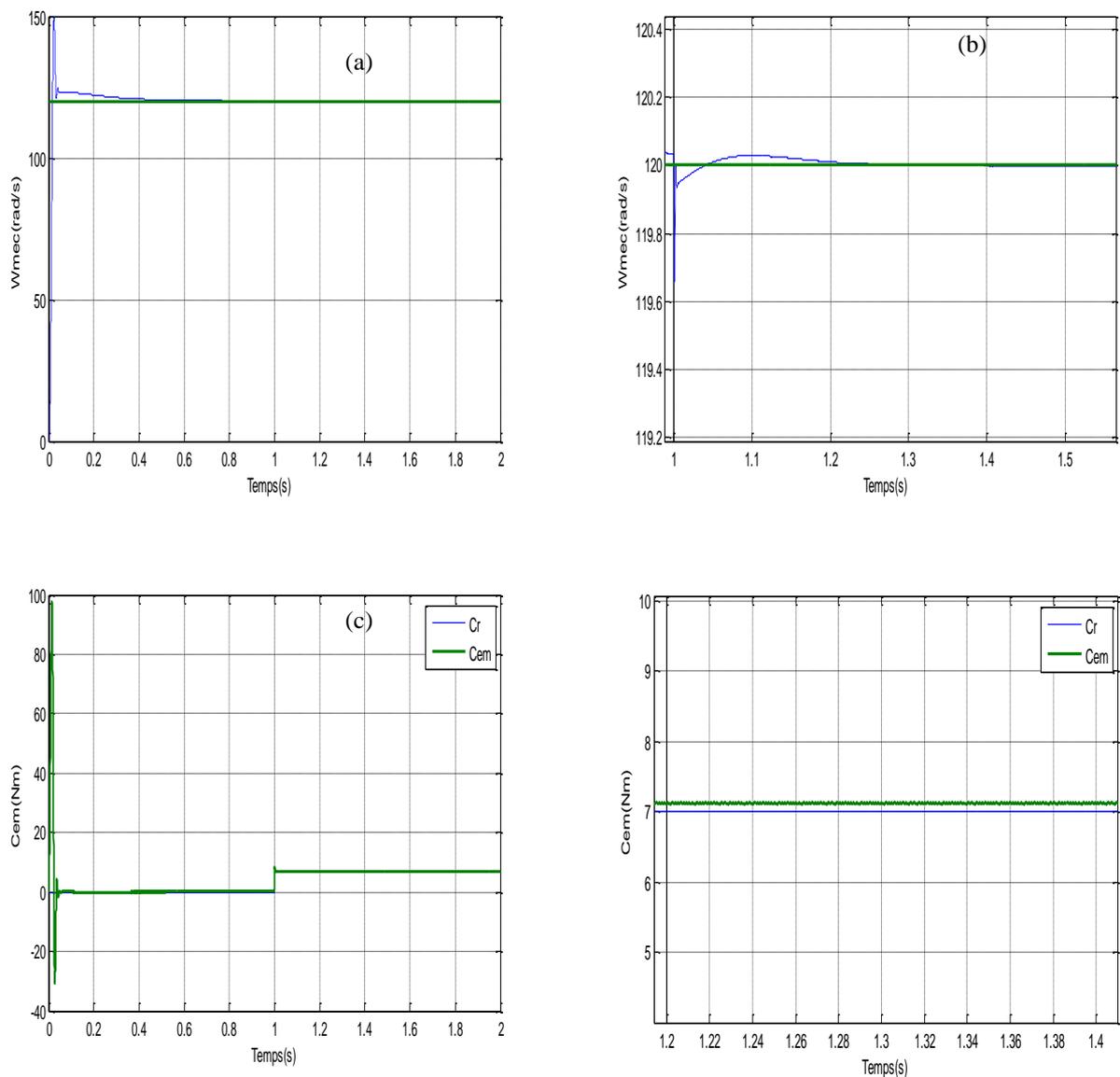
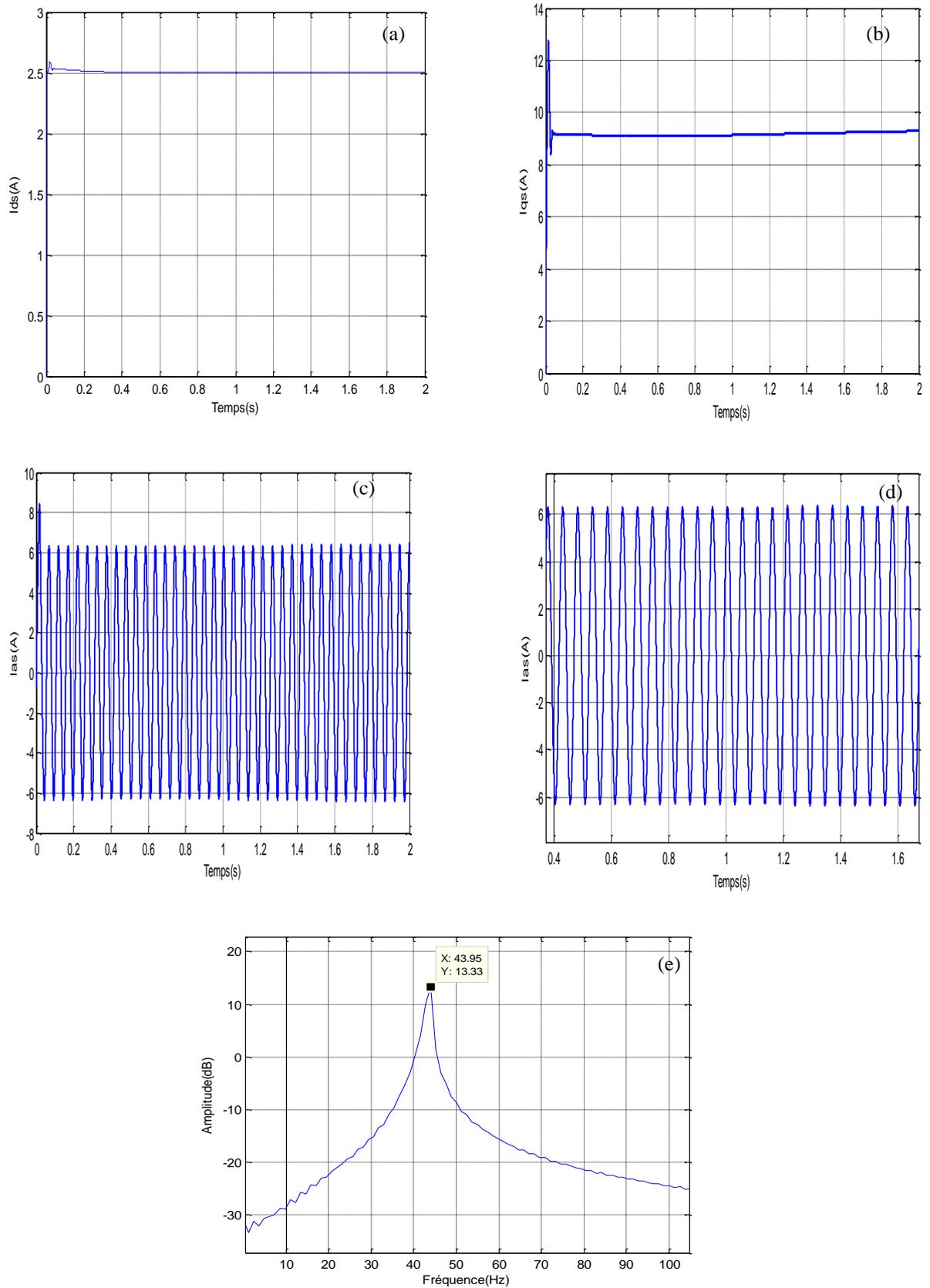


Figure III.12: (a) vitesse de rotation (c) le couple électromagnétique, (b) et (d) leurs zooms respectivement sous une charge de  $7\text{Nm}$  ( $=0.012$ ),  $W_{mec}^* = 120\text{rad/s}$

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



**Figure III.13:** (a) le courant  $I_{ds}$  (b) le courant  $I_{qs}$ , (c) et (d) le courant statorique et leurs zooms (e) Analyse spectrale duc courant, sous une charge de  $7Nm(g=0.012)$

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

## •Machine avec défaut de cassure de barres

Les figures suivantes montrent avant l'application de la charge, la vitesse possède une caractéristique presque linéaire stabilisée par la valeur de vitesse de référence. Après l'application de charge ( $C_r = 7\text{N.m}$  à  $t = 1\text{ s}$ ), la courbe présente une chute dans sa valeur puis se stabilise à sa valeur de référence (120 rad/s), le courant statorique suit la variation de la charge.

Le couple subit un pic au premier moment de démarrage, puis atteint la valeur de couple résistant avant et après l'application de charge.

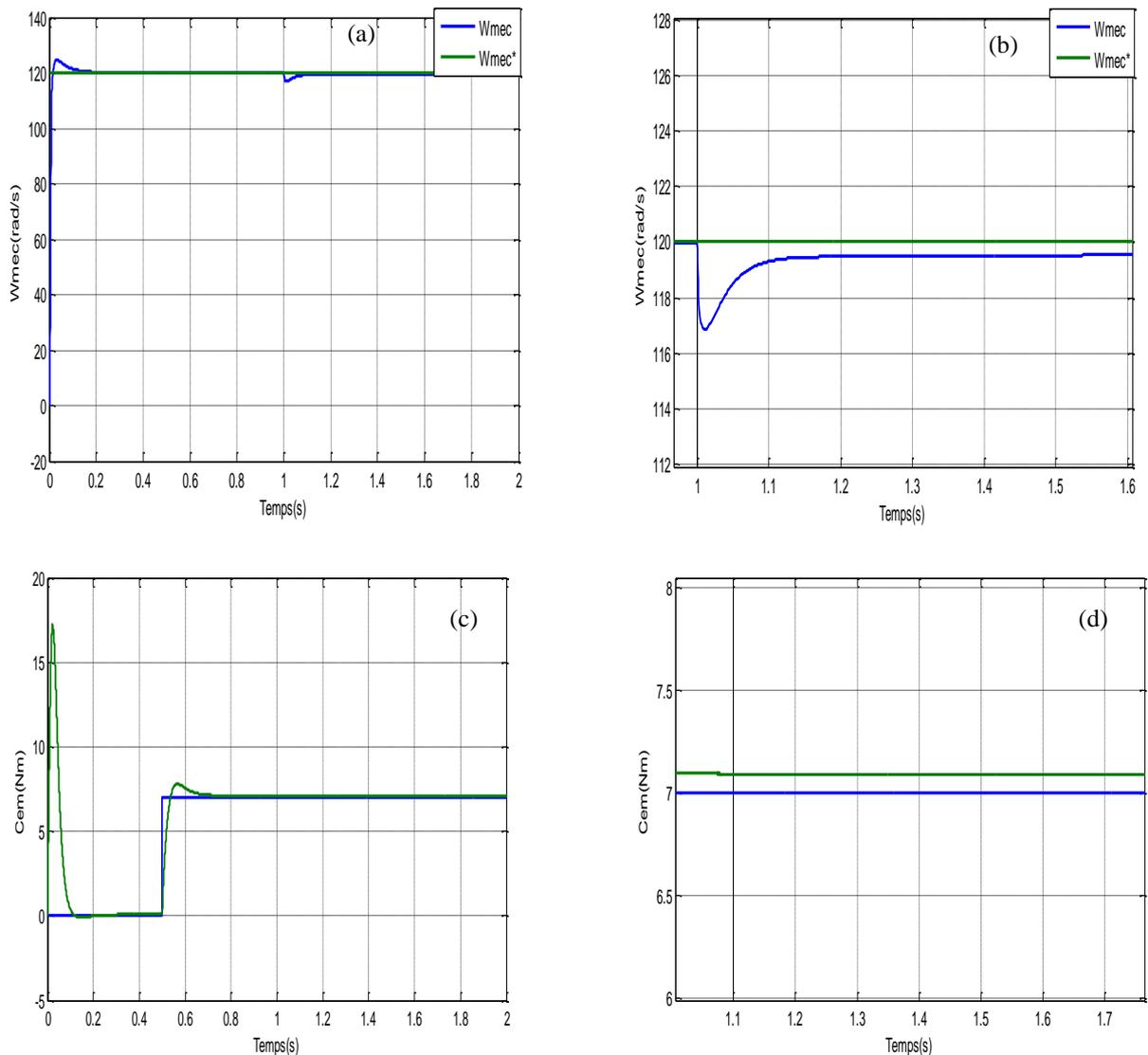
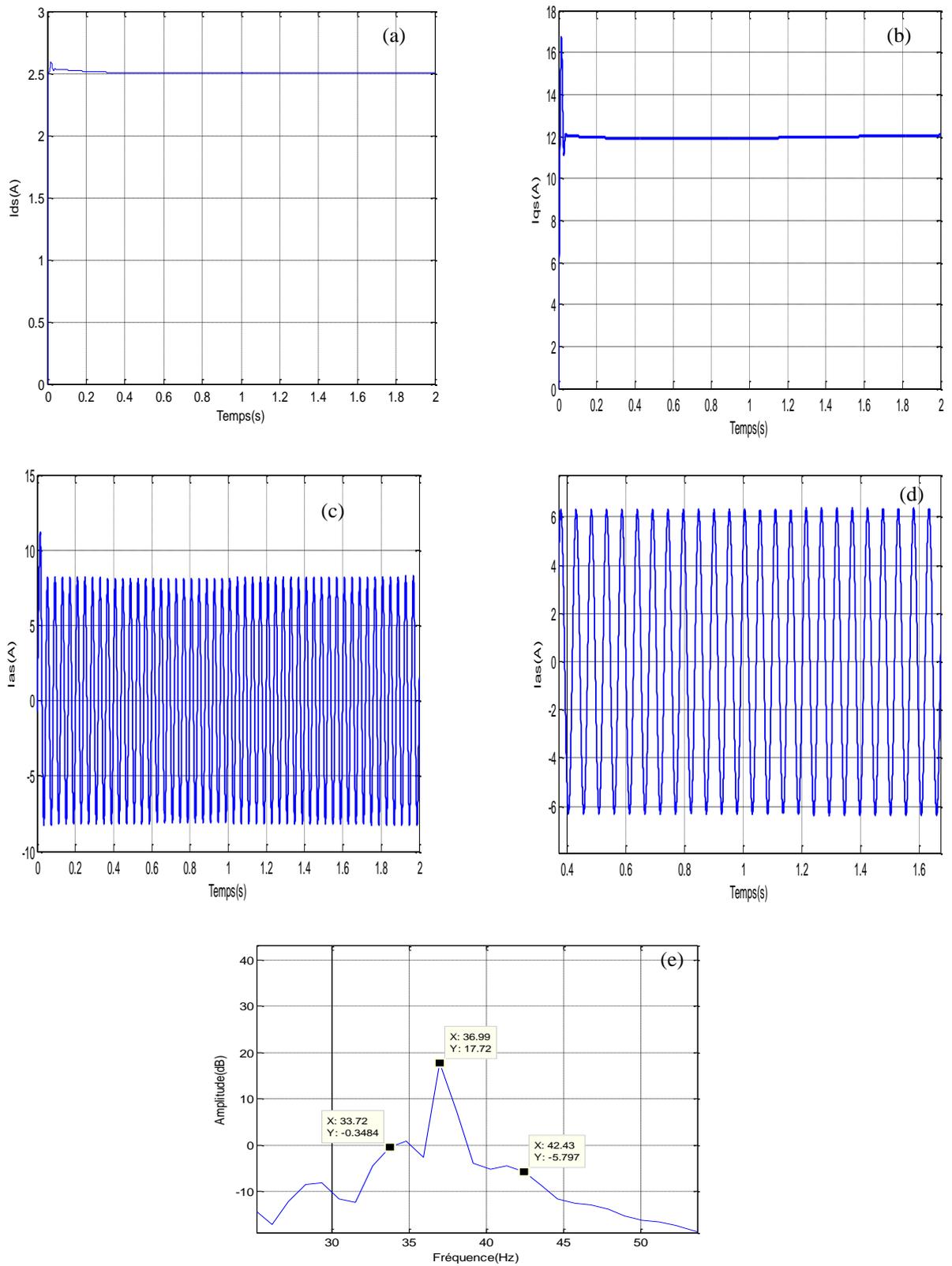


Figure III.14: (a) vitesse de rotation (c) le couple électromagnétique, (b) (d) leurs zooms respectivement, sous une charge de  $7\text{Nm}$  ( $g=0.03$ ). Machine avec défaut

# Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique



**Figure III.15:** (a) le courant  $I_{ds}$  (b) le courant  $I_{qs}$ , (c) et (d) le courant statorique et leurs zooms (e) Analyse spectrale du courant, sous une charge de 7Nm ( $g=0.03$ )

## Chapitre III: Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

---

On remarque d'après les résultats obtenus pour les deux fonctionnements sains et avec défaut de cassure de barres que:

Dans le cas du moteur sain, on observe que le spectre du courant statorique (fig. III.11-e) présente une raie fondamentale située à la fréquence statorique  $f_s = 43.95$  Hz qui correspond à une vitesse de rotation (156.9rd/s) et donc un glissement de 0.012 (fig. III. 10-b).

L'analyse spectrale du courant statorique à l'état de présence de défaut montre bien les raies de défaut à  $(1 \pm 2.s).f_s$ .

### II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté le principe de la technique vectorielle par orientation du flux rotorique (type indirecte) appliquée sur le modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil moyennant un réglage classique ce qui nous a permis de simuler le système, avec ou sans défauts.

Les résultats de simulation montrent que la qualité de la commande a une influence essentiellement sur l'axe d (l'axe du flux). Meilleur sera le découplage du flux par rapport au couple, moins l'axe d sera affecté par le défaut. Le courant de ligne  $I_a$  possède l'information de la présence de défauts de barres cassé