

4.1. Introduction

Aujourd'hui les machines à courant continu sont les plus utilisées dans la variation de vitesse et la robotique.

Nous utilisons la machine à courant continu à excitation série pour la traction électrique et la machine à courant continu à excitation séparée dans le domaine de la robotique, ces dernières ont une qualité intrinsèque elles permettent le contrôle séparé du flux et du couple électromagnétique (le flux est contrôlé en permanence par le courant inducteur, le courant induit est producteur du couple électromagnétique).

Néanmoins, la présence du dispositif balais collecteur qui limite la puissance et où la vitesse nécessite un entretien fréquent.

C'est pourquoi, on s'oriente vers les machines à courant alternatif et en particulier la machine asynchrone triphasée qui a l'avantage d'être robuste ; facile à fabriquer et moins chère. Néanmoins, ces machines sont très difficiles à commander à cause du fort couplage entre le flux et le couple et se présente comme un système multi variable et complexe. Grâce aux progrès considérables de la micro électronique et électronique de puissance, le découplage entre le couple électromagnétique et le flux devient réalisable par les techniques à flux orienté; ainsi on peut obtenir les performances dynamiques similaires à celles des machines à courant continu à excitation séparée.

La figure (4-1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande classique d'une machine à C-C et la commande vectorielle réalisée sur une machine à induction.

Le présent chapitre consiste à introduire la méthode de 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 schéma bloc puis à adjoindre la commande sur cette dernière formulation.

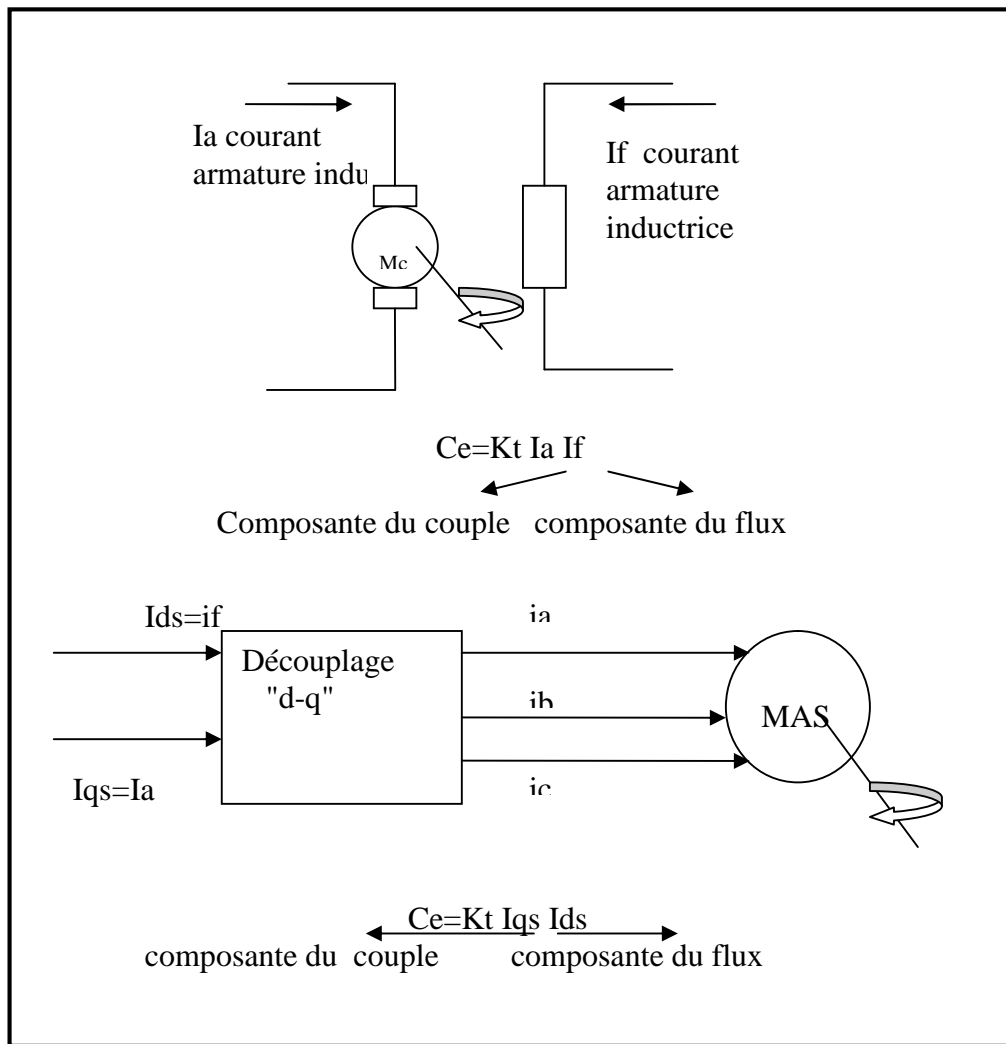


Figure (IV-1): Equivalence entre commande d'une MCC et commande vectorielle

4.2. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle a été proposé pour la première fois par BLASCHKE en 1972 [21]; ce principe est basé sur les notions élémentaires de l'électromagnétisme.

La force exercée sur un conducteur parcouru par un courant placé dans un champ magnétique est égale au produit vectorielle du vecteur courant par le vecteur champ d'induction, il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour les intensités du courant et du champ données quand le vecteur courant sera en quadrature avec ce vecteur

champ , si ce principe est applicable aux machine électriques à courant continu , qui sont naturellement découplées , il n'est pas de même pour la machine asynchrone ou l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec le point de fonctionnement.

L'inconvénient qui entrave la MAS est bien illustré dans les simulations du chapitre précédent où on remarque un fort couplage entre le flux et le couple.

4.2.1. choix de type d'orientation de flux

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, le flux statorique ou le flux magnétisant (d'entrefer) ; comme suit:

*Flux rotorique

$$\Phi_{dr} = \Phi_r \quad \text{et} \quad \Phi_{qr} = 0 \quad (4 - 1)$$

*Flux statorique

$$\Phi_{ds} = \Phi_r \quad \text{et} \quad \Phi_{qs} = 0 \quad (4 - 2)$$

*Flux d'entrefer

$$\Phi_{dg} = \Phi_g \quad \text{et} \quad \Phi_{qg} = 0 \quad (4 - 3)-$$

4.3. La commande vectorielle par orientation du flux rotorique

L'examen de l'expression de 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 (équation (1-26)) qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine.

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». Un choix judicieux de l'angle 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 dans la figure (IV-2)

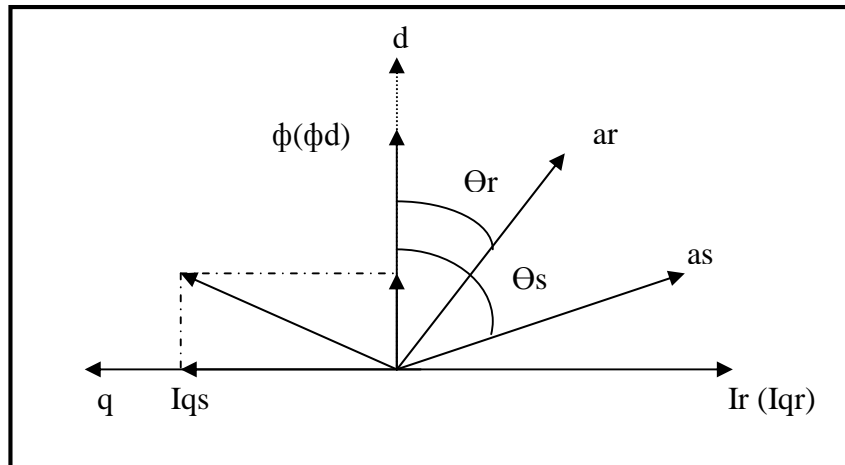


Figure (4-2): Orientation du flux (rotorique, statorique, d'enterfer)

Ainsi, l'observation simultanée du diagramme vectoriel de la figure(4-2) et des équations de park. (en s'intéressant au flux rotorique) munies de la contrainte $\phi_{qr} = 0$ implique les propriétés enchaînées de la manière suivante :

- L'axe "d" est systématiquement aligné sur le vecteur flux rotorique tel que : $\phi_{dr} = \phi_r$,

- La composante du courant rotorique (I_{dr}) est toujours nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

- pour tout régime, le flux rotorique et le courant rotorique restent en quadrature de sorte que l'évolution du couple suit celle de (I_{qr}) qui peut alors être contrôlé par (I_{qs}) puisque :

$$\Phi_{dr} = \Phi_r \quad \text{et} \quad \Phi_{qr} = 0$$

D'après l'équation de flux suivante, on trouve que :

$$\Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot \sigma I_{qs} = 0$$

Impose que:

$$I_{qr} = -\frac{M}{L_r} I_{qs} \quad (4-4)$$

En substituant (IV-1) dans l'expression du flux (Φ_{qs}):

Il vient:

$$\Phi_{qs} = \sigma \cdot L_s I_{qs} \quad (4-5)$$

Ce qui conduit à l'expression du couple:

$$C_e = p \frac{M}{L_r} \Phi_{qs} I_{qs}$$

Ou encore moyennant une constante K_t prés, ce devient:

$$C_e = K_t I_{ds} I_{qs} \quad (4-7)$$

Avec :

$$K_t = p M^2 / L_r$$

La présente expression est analogue à celle du couple d'une machine à courant continu

4.4. Les méthodes de la Commande vectorielle:

Pour la réalisation de la commande vectorielle d'une machine asynchrone, il existe deux méthodes: directe et indirect.

4.4.1 Commande directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa position. Pour cela deux procédés sont utilisés:

- * La mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteur.
- * L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques.

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes:

1- La non fiabilité de la mesure du flux :

- problème de filtrage du signal mesuré.
- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.

2- Le coût de production élevé (capteurs+filtre).

4.4.2. Commande indirecte

Cette méthode n'utilise pas l'amplitude du flux de rotor mais seulement sa position. Elle n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique T_r . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué.

Dans notre étude, on va travailler avec la méthode indirecte de l'orientation du flux rotorique associé au modèle de la machine asynchrone alimenté en tension.

4.5. Structures de commande d'une alimentation en tension par orientation du flux rotorique

4.5.1. Commande en tension:

Considérons les courants statoriques (I_{ds} , I_{qs}) comme grandeurs de commande, la vitesse mécanique (Ω) et le flux rotorique (Φ_r) comme variable d'état. L'arrangement des équations (2.29) en tenant compte de l'équation (4-1) on obtient les équations correspondantes au modèle de commande de la machine alimentée en tension par orientation du flux rotorique:

$$\sigma.T_s.\frac{dI_{ds}}{dt} + I_{ds} = \frac{V_{ds}}{R_s} + \sigma.T_s.\omega_s.I_{qs} - \frac{T_s.(1-\sigma)}{M}.\frac{d\Phi_r}{dt} \quad (4-8)$$

$$\sigma.T_s.\frac{dI_{qs}}{dt} + I_{qs} = \frac{V_{qs}}{R_s} - \omega_s \left[\sigma.T_s.I_{ds} + \frac{T_s.(1-\sigma)}{M}.\Phi_r \right] \quad (4-9)$$

$$T_r.\frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = M.I_{ds} \quad (4-10)$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r}.\frac{I_{qs}}{\Phi_r} \quad (4-11)$$

$$C_e = p.\frac{M}{L_r}.\Phi_r.I_{qs} \quad (4-12)$$

$$J.\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f.\Omega \quad (4-13)$$

L'examen des équations (4-10) et (4-11) révèle que l'amplitude du flux rotorique (Φ_r) ne dépend que de la composante directe (axe "d") du courant statorique (I_{ds}), alors que seule la composante en quadrature (axe "q") du courant statorique (I_{qs}) détermine la valeur du couple si le flux rotorique est maintenu constant ou plutôt imposé par un bloc de défluxage.

Les équations (4-8) et (4-9) montrent l'existence du couplage pour les tensions.

4.5.2.1. Découplage entrée-sortie

A partir des équations (4-8) ; (4-9) on obtient:

$$V_{ds} = \sigma.L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + (R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2}) I_{ds} - \omega_s \sigma.L_s I_{qs} - \frac{M}{L_r^2} R_r \Phi_r \quad (4-14)$$

$$V_{qs} = \sigma.L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + (R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2}) I_{qs} + \omega_s \sigma.L_s I_{ds} + \frac{M}{L_r} \omega_s \Phi_r \quad (4-15)$$

Ces expressions peuvent- être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle ; mais elles ont un gros inconvénient.

Les équations (4-14) et (4-15) montrent que 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}).

Différentes techniques existantes : découplage utilise un régulateur ; découplage par retour d'état; découplage par compensation, nous présentons ce dernier type:

4.5.2.1.1. Découplage par compensation

Cela revient à définir deux nouvelles variables de commande V_{ds1} et V_{qs1} ; telle que V_{ds1} n'agisse que sur I_{ds} et V_{qs1} sur I_{qs} .

Nous présentons V_{ds1} et V_{qs1} comme suit :

A partir des équations (4-14) et (4-15); on pose:

$$V_{ds} = V_{ds1} - f_{emd}$$

$$V_{qs} = V_{qs1} - f_{emq}$$

Avec:

$$f_{emd} = \omega s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{qs} + \frac{M}{L_r^2} \cdot R_r \cdot \Phi_r$$

$$f_{emq} = -\omega s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{ds} - \frac{M}{L_r} \cdot \omega s \cdot \Phi_r + \frac{M^2}{L_r \cdot T_r} \cdot I_{qs}$$

E

$$V_{ds1} = \sigma \cdot L_s \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} + (R_s + R_r \cdot \frac{M^2}{L_r^2}) I_{ds}$$

$$V_{qs1} = \sigma \cdot L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + (R_s + R_r \cdot \frac{M^2}{L_r^2}) I_{qs}$$
(4-15)

Le système (4-15) peut être représenté sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \end{bmatrix}$$

Avec:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{L_r \cdot T_r}{R_s \cdot L_r \cdot T_r + L_m^2 + \sigma \cdot L_s \cdot L_r \cdot T_r \cdot s} & 0 \\ 0 & \frac{L_r \cdot T_r}{R_s \cdot L_r \cdot T_r + L_m^2 + \sigma \cdot L_s \cdot L_r \cdot T_r \cdot s} \end{bmatrix}$$

Les tensions V_{ds} et V_{qs} sont alors reconstituées à partir des tensions V_{ds1} et V_{qs1} pour réaliser un découplage entier entre les axes d, q.
 f_{emd} et f_{emq} : des F.E.M des perturbations partiellement liées aux courants et introduisant le couplage non linéaire.

La structure de bloc de découplage est représentée par la figure suivante:

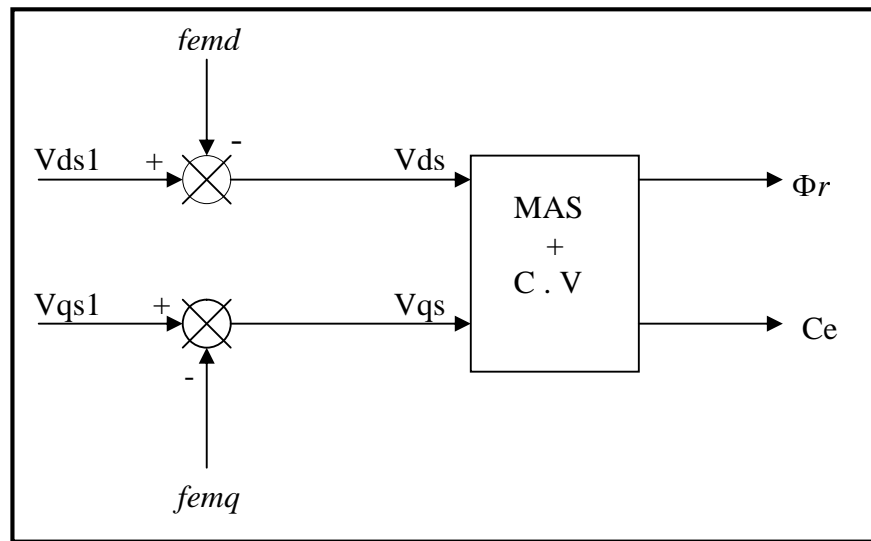


Figure (4-5): Bloc de découplage

4.5.3. Bloc de dé fluxage

Le bloc de défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétique de la machine, permet un fonctionnement à couple constant.

si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale d'une part ce bloc permet, en outre d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse, pour le fonctionnement à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale .Il est défini par la fonction non linéaire suivante:

Sous vitesse

$$\Phi_r = \Phi_{nom} \quad \text{Pour} \quad |\Omega_r| \leq \Omega_{nom}$$

Sur vitesse

$$\Phi_r = \frac{\Omega_{nom} * \Phi_{nom}}{|\Omega_r|} \quad \text{Pour} \quad |\Omega_r| \geq \Omega_{nom}$$

Avec :

Ω_{nom} : Vitesse de rotation nominale

Φ_{rnom} : Flux rotorique nominal

Φ_{rnom} : Flux rotorique nominal

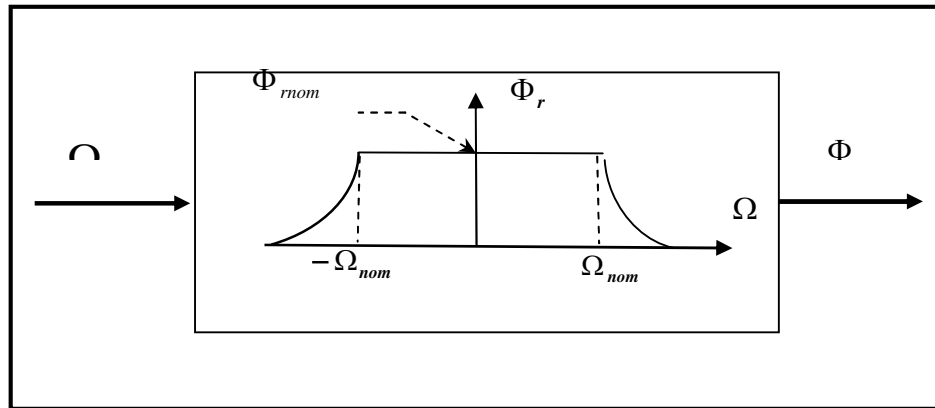


Figure (4-6): Le bloc de défluxage

4.5.4. La commande indirecte

Cette méthode est ainsi appelée la commande en boucle ouverte car on ne fait pas appel à une boucle de régulation du flux et par conséquent elle ne nécessite pas l'utilisation de capteur.

La commande est basée sur l'inversion des équations (III-8-9-10-11-12-13) en considérant le couple de référence ($C_e^* = C_r$) et le flux rotorique (ϕ_r^*) comme référence de commande. Les équations (IV-17-18-19-20-21) donnent le système de commande d'une machine asynchrone alimentée en tension. Il est remarqué que les équations de tension sont couplées par l'existence du courant (I_{qs}) dans l'expression de tension (V_{ds}) et par l'existence du courant (I_{ds}) dans l'expression de tension (V_{qs}).

$$I_{qs} = \frac{L_r}{pM} \cdot \frac{C_e^*}{\Phi_r^*} \quad (4-17)$$

$$I_{ds} = \frac{1}{M} \cdot \left(T_r \cdot \frac{d\Phi_r^*}{dt} + \Phi_r^* \right) \quad (4-18)$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{\Phi_r^*} \quad (4-19)$$

$$V_{ds} = \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + R_s I_{ds} + \frac{L_s(1-\sigma)}{M} \cdot \frac{d\Phi_r^*}{dt} - \sigma L_s (\omega_r + p\Omega) I_{qs} \quad (4-20)$$

$$V_{qs} = \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + R_s I_{qs} + (\omega_r + p\Omega) \cdot \left[\sigma L_s I_{ds} + \frac{L_s(1-\sigma)}{M} \cdot \Phi_r^* \right] \quad (4-21)$$

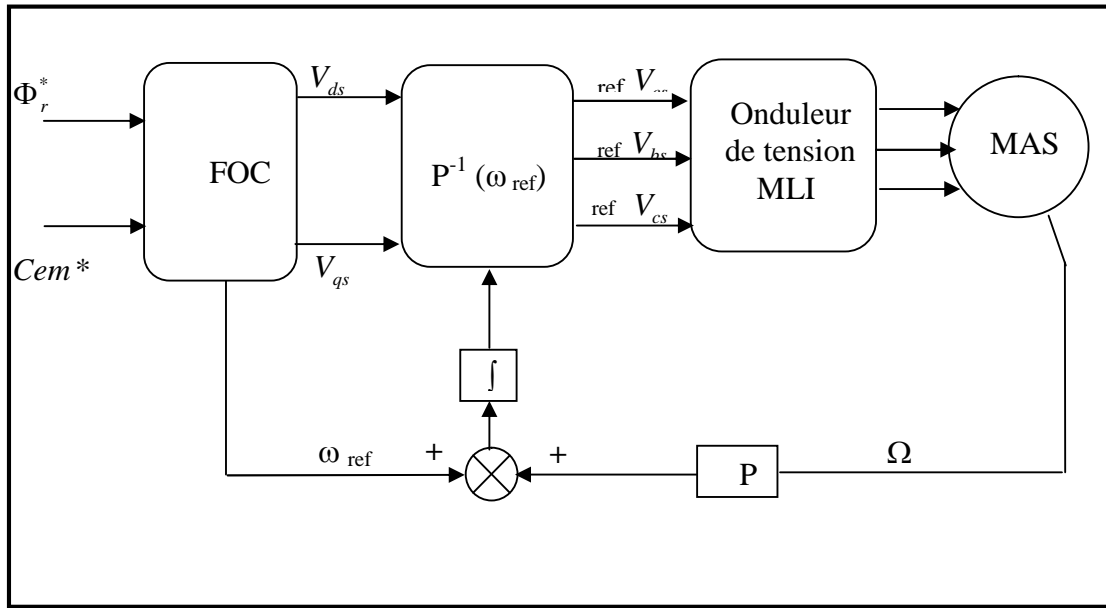


Figure (4-7): Schéma de la commande découplée par orientation de flux rotorique en boucle ouvert.

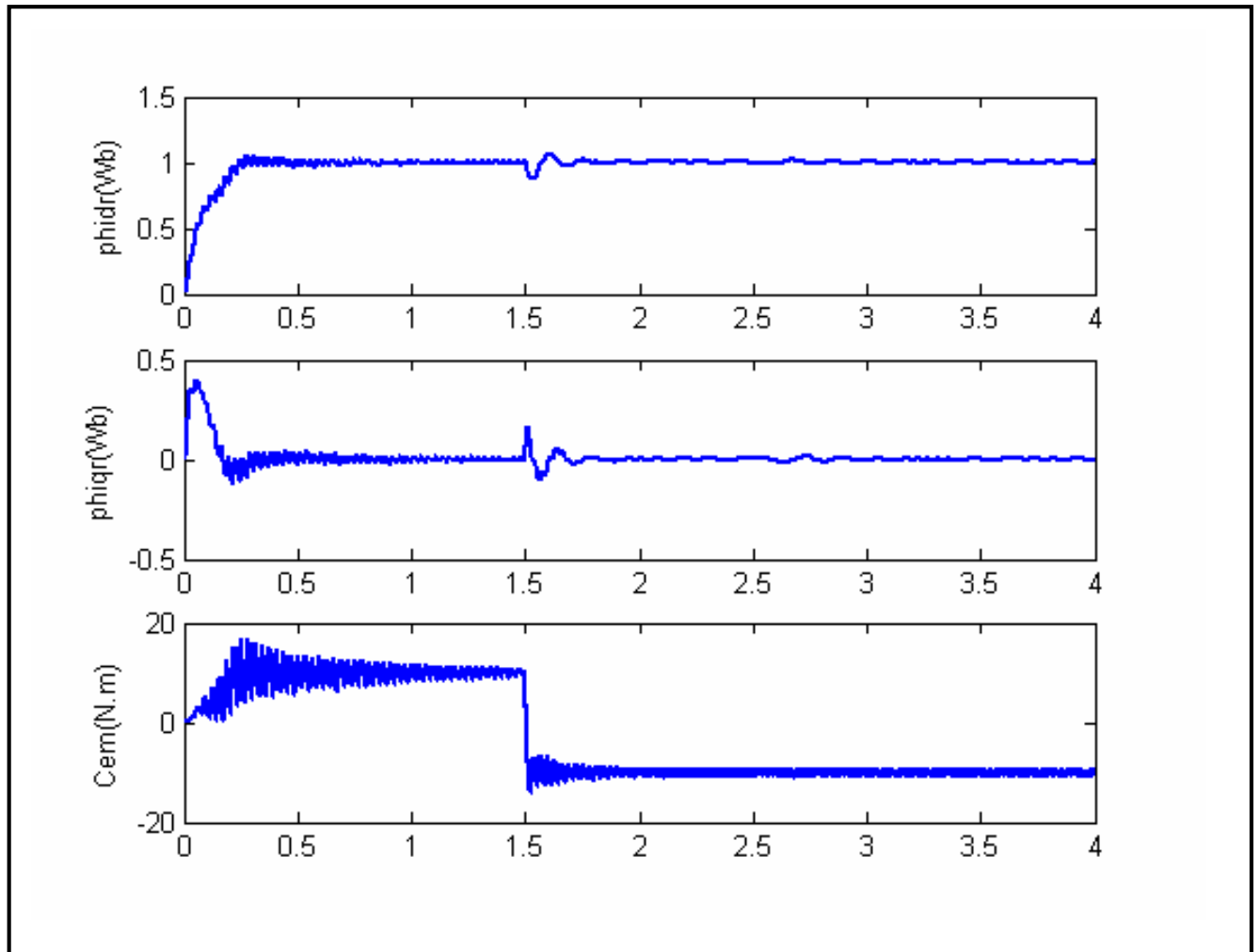


Figure (4-8): Résultats de simulation de commande par orientation de flux rotorique en boucle ouverte.

IV.5.4.1.Simulation et interprétation

Afin de vérifier le découplage introduit par cette commande entre le flux et le couple, nous simulons le système en imposant une référence de flux rotorique de 1(Wb) et un couple de référence sous forme de créneaux $[+10\text{Nm}, -10\text{N.m}]$ dans les intervalles de temps $[0\ 1.5]\text{ s}$

On constate que le couple électromagnétique qui suit parfaitement la référence imposée. Le flux rotorique est pratiquement égal à sa composante directe, sa composante en quadrature est nulle. Les variations brusques du couple électromagnétique n'influent pas sur le flux rotorique ce qui montre le découplage entre le flux et le couple.

4.6. Régulation

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

4.6. a.Action proportionnelle

- Si K_p est grand, la correction est rapide .Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît
- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

4.6. b.Action intégrale

L'action intégrale régit, lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

4.6.2. Caractéristiques des régulateurs

a. Stabilité

Un système bouclé doit être stable .Si seulement si les réactions du système de régulation soit énergétique sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger.

Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité.

b. précision

En régulation, la précision obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle.

c. Rapidité

En générale, un système bouclé doit répondre rapidement au variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation).Le temps de réaction est bien entendu en relation étroite avec l'inertie propre du processus.

46.3. Régulation de la vitesse par la méthode indirecte

L'utilisation de la commande vectorielle indirecte avec orientation de flux rotorique permet la réduction de la complexité de la commande. En effet le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse par la commande vectorielle indirecte, figure (IV-09).

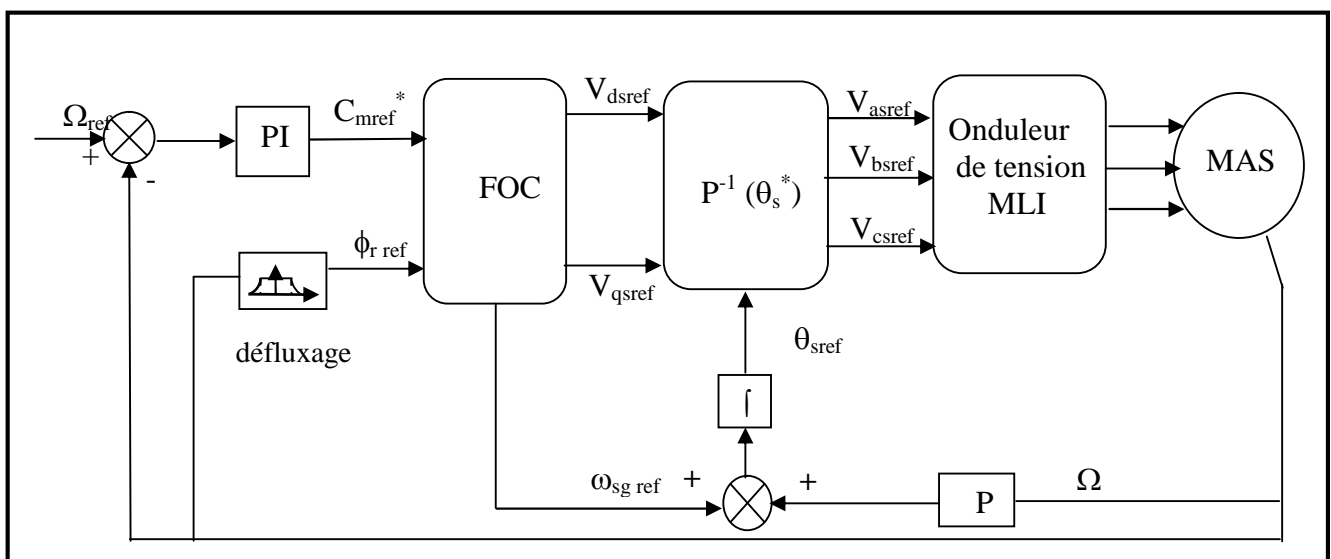


Figure (4.9): Schéma fonctionnel de régulation de vitesse d’une machine asynchrone commandée par la technique du flux orienté (méthode indirecte)

Le schéma bloc de la régulation de la vitesse est représenté par la figure (4-10):

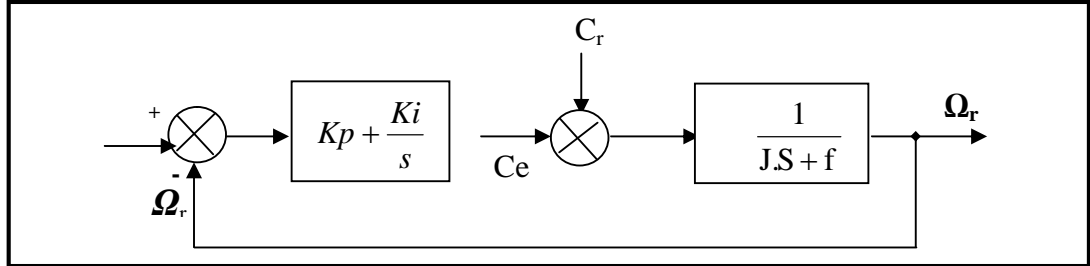


Figure (4- 10): schéma –bloc de régulation de vitesse

Le régulateur de vitesse dans la commande étudiée dans ce chapitre est calculé à partir du modèle linéaire représenté à la figure (4.10), on utilisera des techniques classiques développées pour des systèmes linéaires afin de le synthétiser.

la fonction de transfert du correcteur de vitesse en boucle fermée est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{(k_{i\Omega} + s k_{p\Omega}) p / j}{s^2 + s(\rho_m + k_{p\Omega} \frac{\rho}{j}) + k_{i\Omega} \frac{p}{j}} \quad (4.22)$$

Avec :

$$P_m = f/J \quad (4.23)$$

En imposant une paire de pôles complexes conjugués $S_{1,2} = -\rho \pm j\rho$, le polynôme caractéristique désire en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$P(s) = s^2 + 2\rho s + 2\rho^2 \quad (IV.24)$$

Par identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI :

$$\begin{aligned} K_{i\Omega} &= 2J \rho^2 / p \\ K_{p\Omega} &= J(2\rho - \rho_m)j/p \end{aligned} \quad (IV.25)$$

IV.6.3.1. Présentation des résultats de simulation

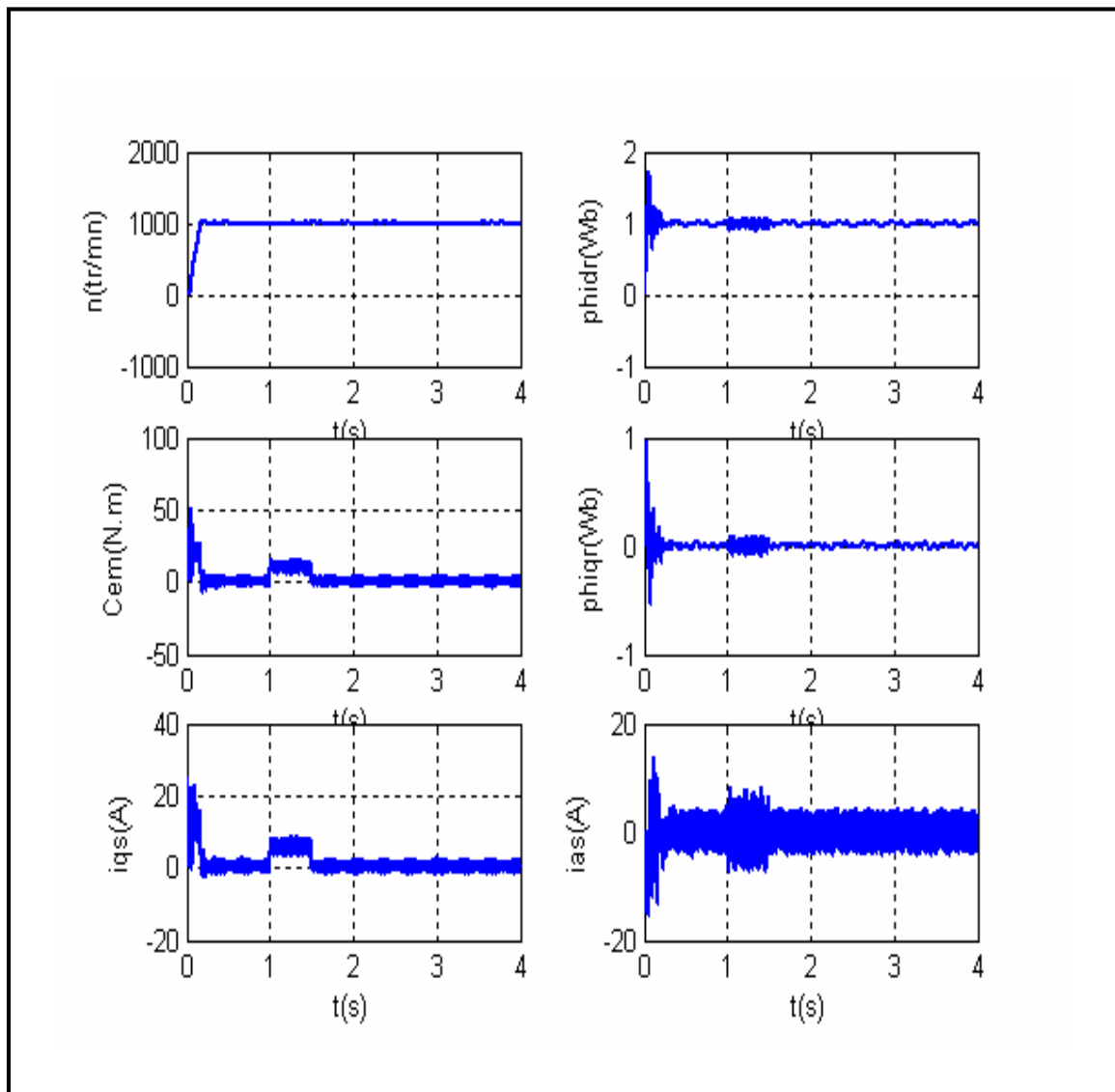
Avant de présenter les résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte en tension de la machine asynchrone, nous devons signaler que la simulation est effectuée dans les conditions suivantes:

$$\Phi_r = 1 \text{ Wb}$$

$$K_i = 82.3062$$

$$K_p = 1.6419$$

$$\rho = 50$$



Figure(4-11): Réglage de vitesse par la méthode indirecte avec l'application d'une perturbation $C_1=10$ (N.m) durant l'intervalle de temps [1 1.5]

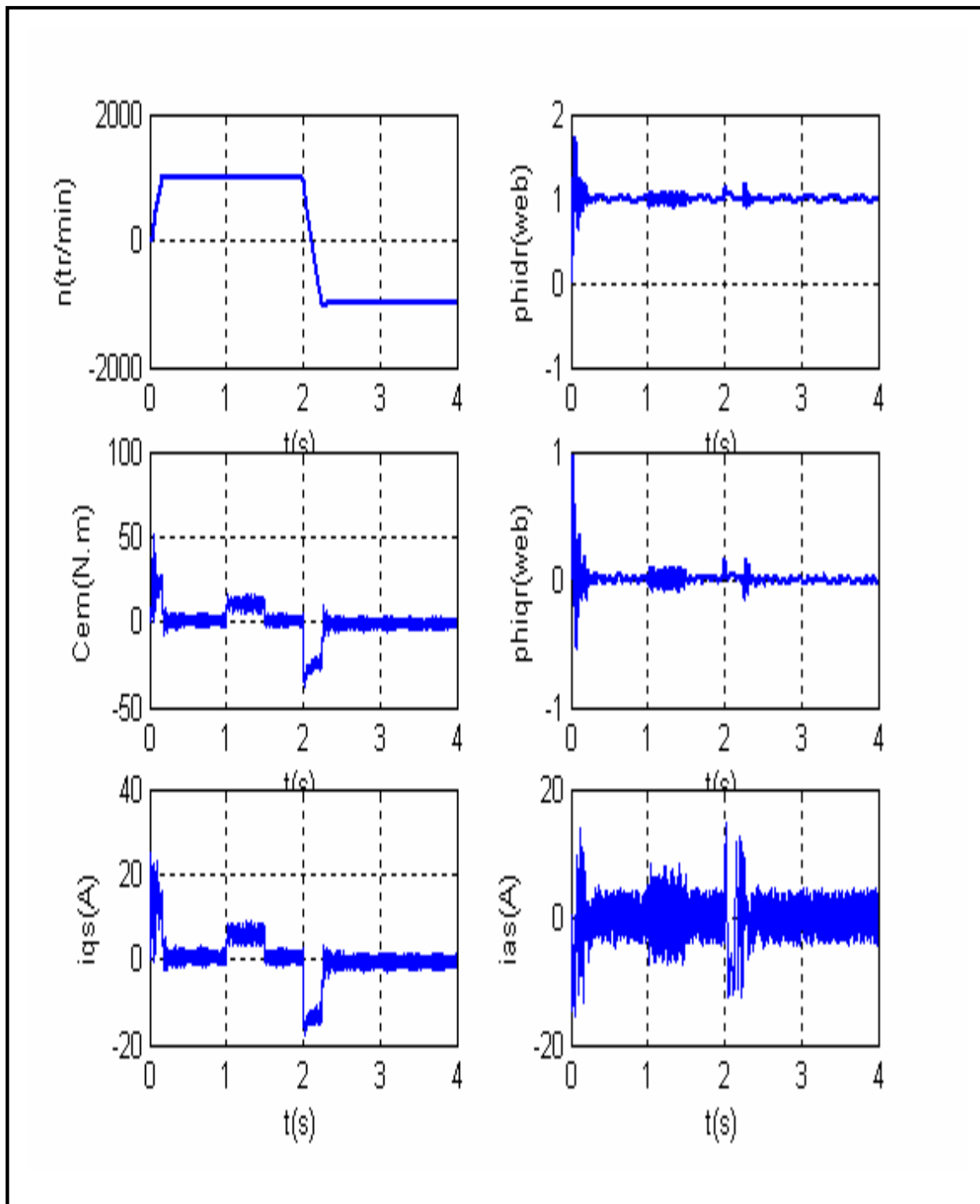


Figure (4.12): Réglage de vitesse par la méthode indirecte avec inversion a l'instant $t=2$ s.

4.6.3.2. interprétations et commentaires

Les résultats de simulation ont été effectuée pour deux tests:

- Le premier s'agit de l'application d'une charge perturbatrice de (10N.m) durant l'intervalle [1 1.5] s.
- Dans le deuxième test nous avons inversé la vitesse de rotation de (1000 à- 1000tr/mn) à l'instant $t=2s$.

La vitesse de référence est atteinte au bout de ($t=0.2s$) et l'application d'un couple de charge n'affectée guère la vitesse de rotation souhaité, on constate que le flux rotorique est installé.

Le flux suit sa valeur de référence suivant l'axe « d » avec une composante en quadrature « q » nulle.

L'application d'un couple résistant conduit à une augmentation du couple électromagnétique développé, ainsi que la composante en quadrature du courant statorique (I_{qs}) dont il dépend.

L'application d'une inversion de vitesse conduit à une valeur négative (-32N.m) du couple mais après ce régime transitoire, le couple se stabilise à sa valeur précédente nulle.

4.7.1.La commande vectorielle indirecte de la MAS avec défaut:

La commande est basée sur l'inversion des équations en considérant le couple de référence ($C_e^*=C_r$) et le flux rotorique (ϕ_r^*) comme référence de commande. Les équations (4.1) donnent le système de commande d'une machine asynchrone multi spires alimentée en tension. Il est remarqué que les équations de tension sont couplées par l'existence du courant (I_{qs}) dans l'expression de tension (V_{ds}) et par l'existence du courant (I_{ds}) dans l'expression de tension (V_{qs}).



$$I_{qs} = \frac{4}{3} \cdot \frac{L_{rc}}{M_{st} N_{rp}} \cdot \frac{C_e^*}{\Phi_r^*} \quad (4-26)$$

$$I_{ds} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{L_{rc}}{M_{st} R_l} \cdot \frac{d\Phi_r^*}{dt} - \frac{2}{3 M_{sr}} \Phi_r^* \quad (4-27)$$

$$\omega_r = \frac{3 \cdot M_{sr} \cdot R_r \cdot I_{qs}}{2 L_{rc} \cdot \Phi_r^*} \quad (4-28)$$

$$V_{ds} = L_s \omega_r \frac{dI_{ds}}{dt} + \left(R_s + \frac{3 M_{sr}^2 N_r}{4 L_{rc}^2} \right) I_{ds} + \omega_r L_s \omega_r I_{qs} - \frac{N_r M_{st} R_l}{2 L_{rc}^2} \Phi_r^* \quad (4-29)$$

$$V_{qs} = L_s \omega_r \frac{dI_{qs}}{dt} + \left(R_s + \frac{3 M_{sr}^2 N_r}{4 L_{rc}^2} \right) I_{qs} + \omega_r L_s \omega_r I_{ds} - (2 \omega_r - p \Omega) \cdot \frac{N_r M_{sr}}{2 L_{rc}} \Phi_r^* \quad (4-30)$$

4.7.1.1. Présentation des résultats de simulation (Modèle de la MAS en absence le défaut)

4.7.1.2 interprétations et commentaires

L'allure de couple suit celle de courant (I_{qs}), ce qui montre le découplage entre le flux et le couple.

L'allure de vitesse montre que la vitesse atteint la valeur 1000tr/mn suivi la référence, on constate qu'il ya une régulation de vitesse.

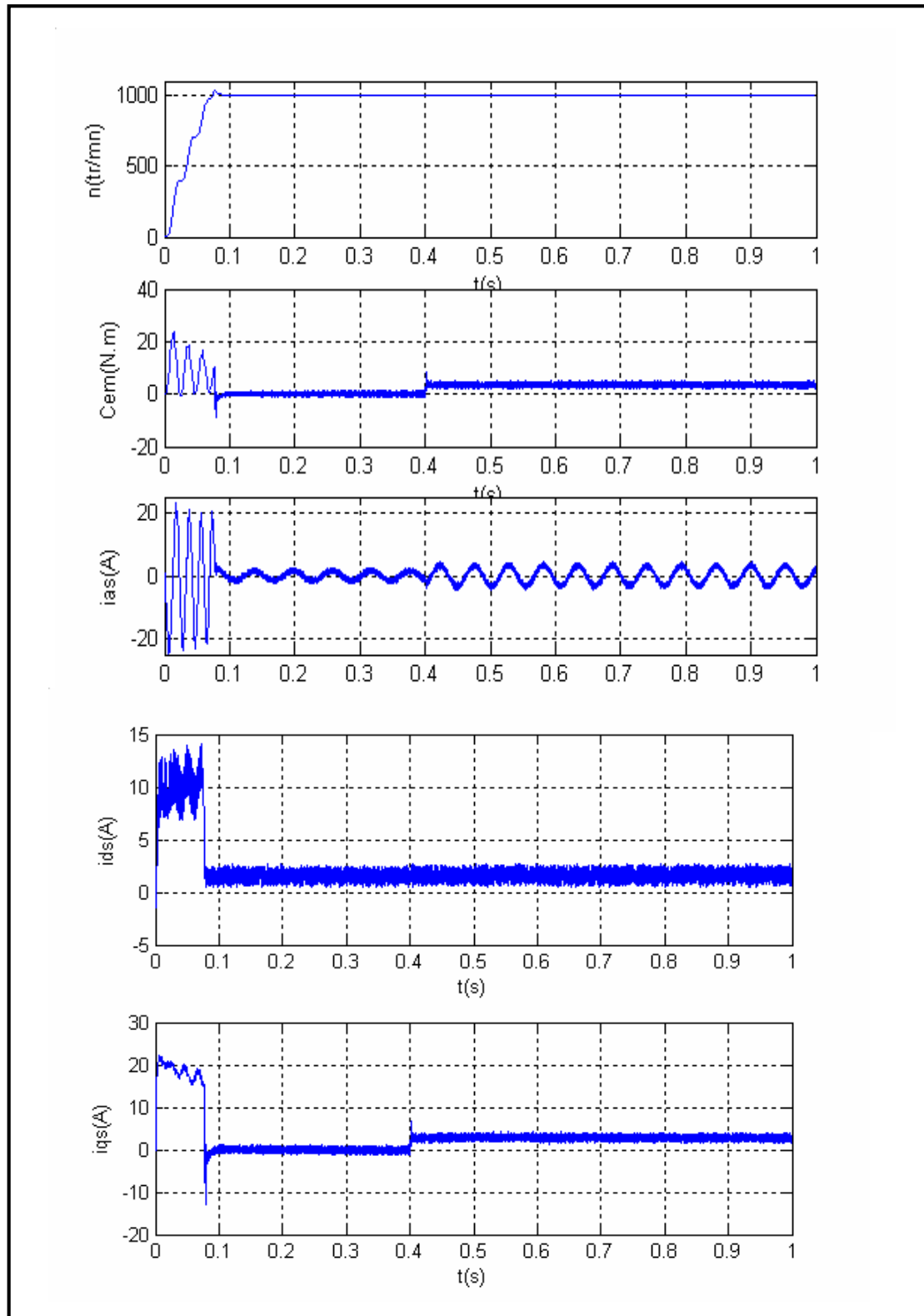
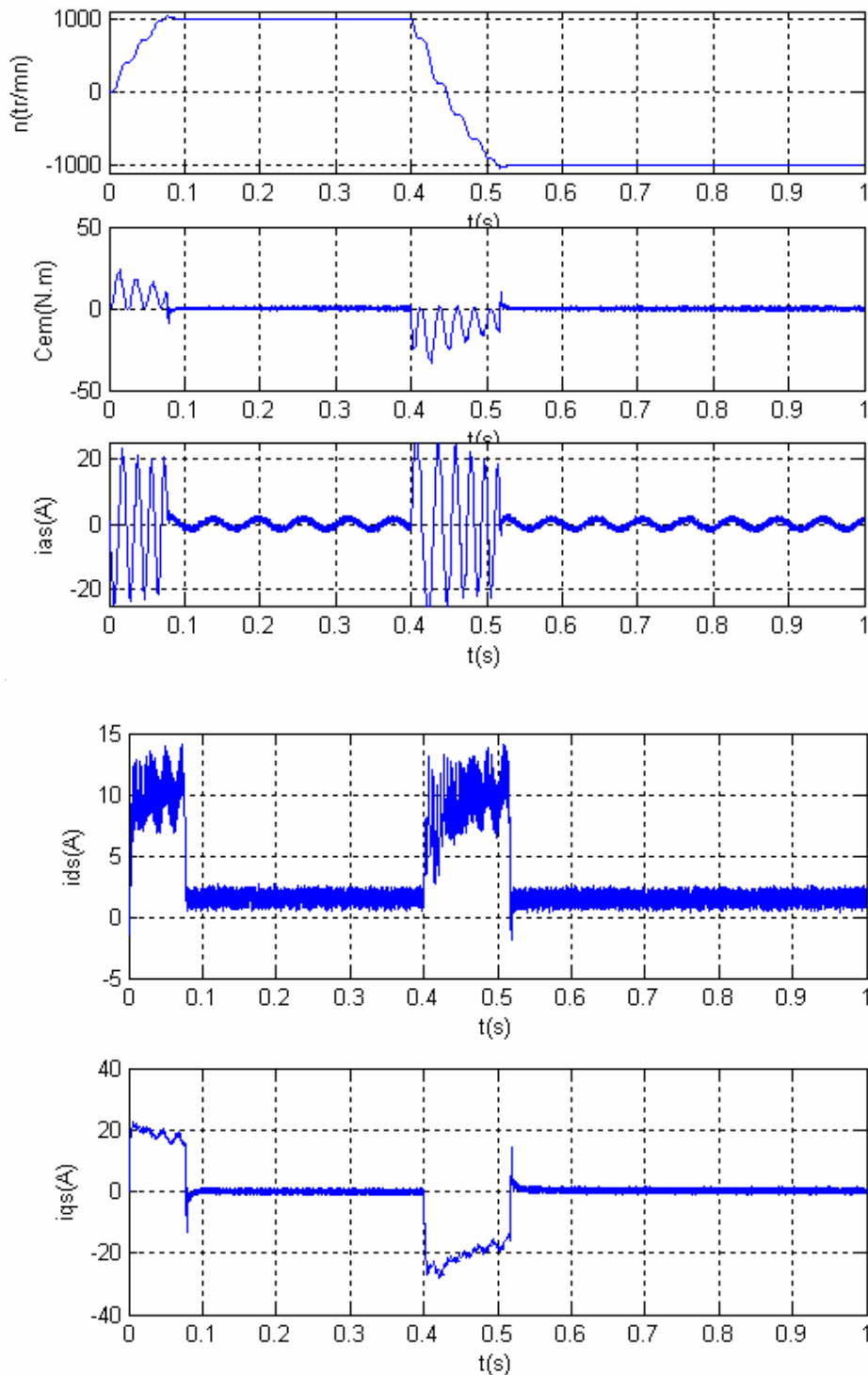


Figure (4.13): Réglage de vitesse par la méthode indirecte avec

l'application d'une perturbation $C_1=10(\text{N.m})$ à l'instant $t=0.4$.

4.7.1.3. Présentation des résultats de simulation Modèle de la MAS avec défaut)

Figure (4.14): Réglage de vitesse par la méthode indirecte



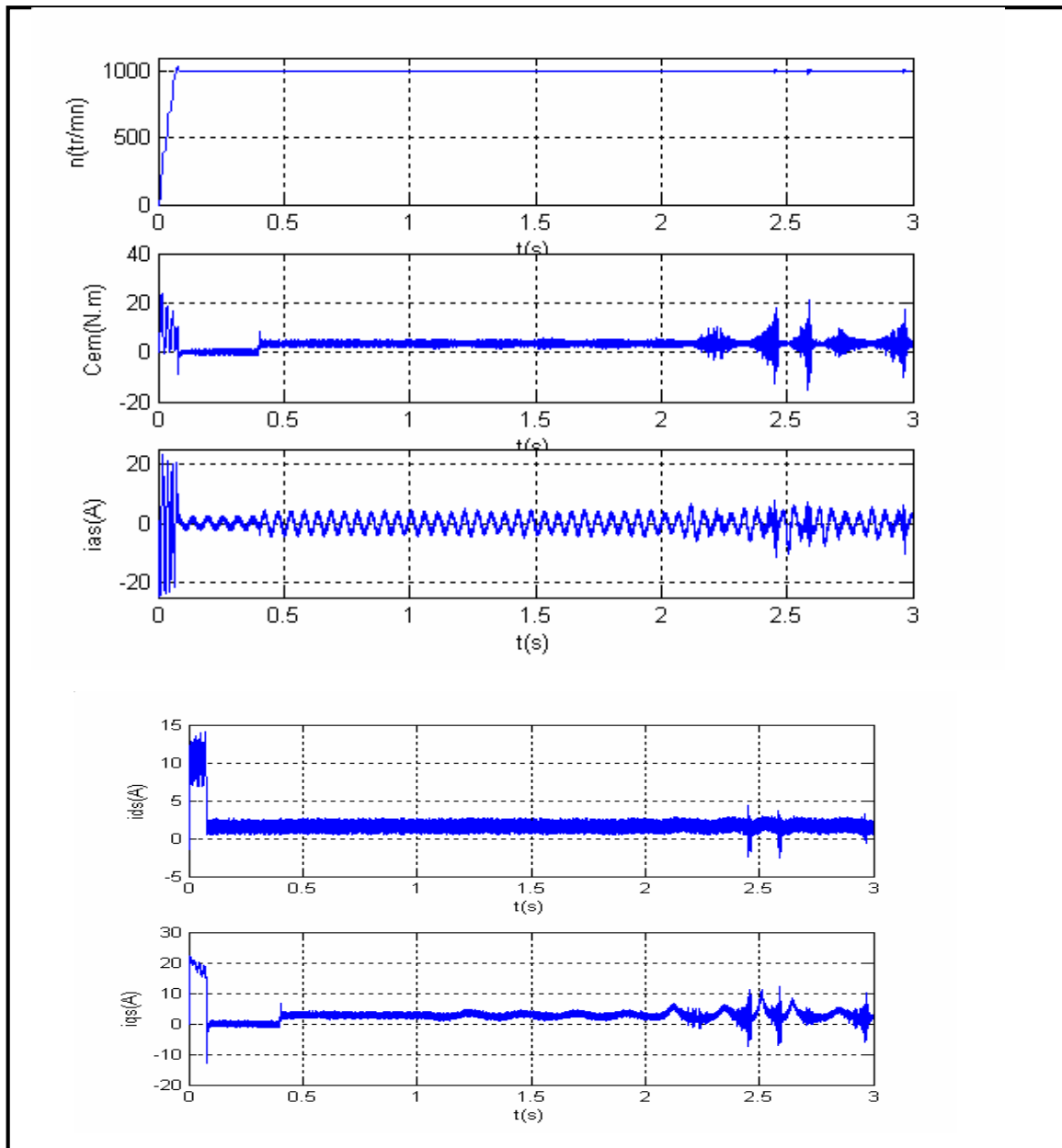


Figure (4.13): Réglage de vitesse par la méthode indirecte avec

l'application d'une perturbation $C_1=10(\text{N.m})$ à l'instant $t=0.4$ dans un modèle lié au rotor avec défaut.

4.7.1.4 interprétations et commentaires

Après l'application d'une cassure de deux barres à les instants 1.5s et 2s on voit qu'il ya une osillation aux niveaux de couple, courants (I_{ds}, I_{qs}).

On constate que la commande vectorielle est assurée mais elle ne peut pas annuler le défaut.

4.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons vu que la commande vectorielle est caractérisée par le découplage qu'elle réalise entre les commandes de flux et de couple. Elle a permis par son application aux moteur asynchrone, l'obtention de performances dynamique et statique comparables à celles des machines à courant continu à excitation séparée.

Nous avons présenté la méthode indirecte de la commande vectorielle qui consiste à déterminer la position du flux.

Nous avons utilisé le régulateur classique (PI) pour le réglage de la vitesse. Les régulateurs classiques montrent leur efficacité et leurs performances mais ils présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations des paramètres de la machine.