

IV.1 INTRODUCTION

La vitesse variable est un besoin qui généralise tous les secteurs de l'industrie et de transport. Dans la littérature, quelques structures de réglage de base ont été utilisées, comme le réglage classique, le réglage par mode glissant et le réglage en cascade. Ces réglages de vitesse utilisés pour la commande, ont pour but de réaliser de bonnes performances de commande.

Les correcteurs de la famille du *PID* (*PI*, *PID*, *IP*, *PD*, avance ou retard de phase), ont été largement utilisés pour les machines asynchrones en raison de leur simplicité, facilité de réglage et d'implémentation et de leurs bonnes performances. Ces correcteurs ont un triple objectif:

- Stabiliser le système en boucle fermée.
- Assurer le suivi des grandeurs de sortie en fonction des consignes en l'absence de perturbations (asservissement).
- Atténuer la variation de sorties en présence de perturbations lorsque les consignes sont constantes (régulation).

Dans ce chapitre nous intéressons à la commande en vitesse de la machine asynchrone à double alimentation contrôlée par la *DTC*. Un correcteur de type *IP* est utilisé dans la chaîne de régulation.

IV.2 RAPPEL SUR LE PRINCIPE DE LA REGULATION

D'une façon générale, un système de commande peut être défini comme un assemblage électrique d'éléments physiques qui peuvent régler la grandeur de sortie en fonction d'un signal d'entrée. Il existe deux types de structures de commande:

- Système de commande en boucle ouverte (B.O).
- Système de commande en boucle fermée (B.F).

IV.2.1 Système de commande en boucle ouverte

Cette structure de commande est simple et peu coûteuse, mais malheureusement dans certaines applications où la précision est d'une grande importance et où les paramètres du système à commander sont variants, elle n'est pas utilisée à cause de leur imprécision [22].

On peut définir la commande en boucle ouverte comme un système où le signal de

commande «d'entrée» est indépendant du signal réglé «sortie». Comme le montre la figure (IV.1).

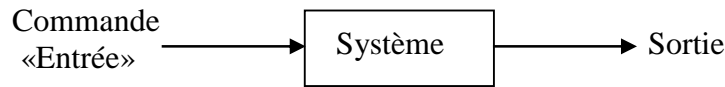


Fig. (IV.1) : Schéma Bloc d'un système en boucle ouverte

IV.2.2 Système de commande en boucle fermée

Une structure de commande en boucle fermée présentée par la figure (IV.2) est définie comme un système où le signal de commande (d'entrée) dépend d'une façon ou d'une autre du signal de sortie. Les systèmes en boucle fermée sont couramment appelés des systèmes asservis. La structure de commande en boucle fermée (contre réaction) est capable de:

- Stabiliser un système instable en boucle ouverte.
- Compenser les perturbations externes.
- Compenser les incertitudes internes au processus lui-même.

Le rôle du correcteur est d'éliminer l'écart, quelles que soient les perturbations, et d'amener le Système à réagir le plus rapidement, quelles que soient les variations de l'entrée de référence ou les perturbations. Nous distinguons plusieurs types de correcteurs qui sont basés sur les actions: proportionnelle, intégrale et différentielle.

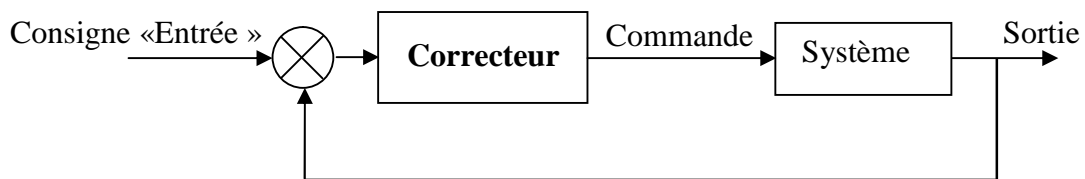


Fig. (IV.2): Schéma d'un système en boucle fermée

IV.3 DIFFERENTS TYPES DE CORRECTEURS

Les régulateurs standard les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille *PID* (proportionnel intégral dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre [20].

La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "PID".

- P : Action proportionnelle.
- I : Action intégrale.
- D : Action dérivée.

L'adaptation d'un régulateur aux différents systèmes s'effectue par le réglage des coefficients (paramètres) de l'algorithme:

- Paramètre K_p pour le réglage de l'action proportionnelle.
- - Paramètre K_i pour le réglage de l'action intégrale.
- - Paramètre K_d pour le réglage de l'action dérivée.

IV.3.1 Correcteur proportionnel (P)

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet donc améliorer notablement la précision. Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée $u(t)$ est proportionnelle à l'écart $e(t)$:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (\text{IV.1})$$

La fonction de transfert du correcteur est donc : $C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K(s) \quad (\text{IV.2})$

L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, et rend le système plus rapide mais augmente l'instabilité du système [21].

IV.3.2 Correcteur proportionnel - intégral (PI)

L'action proportionnelle est une fonction qui fait varier le signal de sortie du régulateur proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne. Le correcteur intégral est fréquemment combiné au correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent et le régime transitoire. Cette combinaison est appelée correcteur proportionnel-intégral [19].

Le coefficient de proportionnalité, appelé gain du régulateur, est obtenu par le réglage du paramètre K_p du régulateur. L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur est écrite par l'expression ci-dessous :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{IV.3})$$

Où, $e(t)$, $u(t)$ K_p et K_i désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur.

La fonction de transfert correspondante est donnée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \quad (\text{IV.4})$$

Où s : Opérateur dérivée de LAPLACE.

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$$

K_p : Gain du correcteur

τ_i : Constante de temps

IV.3.3 Correcteur proportionnel - dérivée (PD)

L'inconvénient majeur du correcteur dérivé est son insensibilité aux variations lentes de l'erreur. Pour cette raison, ce type de correcteur n'est jamais utilisé seul. La solution permettant de minimiser cet inconvénient est de le combiner au correcteur proportionnel [12]. Nous représentons le correcteur *PD* dans le domaine du temps par l'équation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (\text{IV.5})$$

K_d : Gain de l'action dérivée.

La fonction de transfert correspondante est :

$$C(s) = K_p + K_d s = K_p (1 + \tau_d s) \quad (\text{IV.6})$$

$$\text{Où } \tau_d = \frac{K_d}{K_p}$$

Avec τ_d constante de temps

IV.3.4 Correcteur proportionnel – intégral - dérivé (PID)

L'intérêt du correcteur *PID* est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients K_p , K_i , K_d du correcteur *PID* permet

d'améliorer à la fois la précision (K_d et K_p), la stabilité (K_d) et la rapidité (K_d , K_p). Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats [21]. Il est régi par la relation suivante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (\text{IV.7})$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \tau_d p + \frac{1}{\tau_i p} \right) \quad (\text{IV.8})$$

En général, on a les qualités suivantes du correcteur PID :

- L'action proportionnelle est souvent utilisée pour la rapidité du système bouclé ;
- L'action intégrale est employée pour améliorer le régime permanent ;
- L'action dérivée assure l'amélioration de la stabilité.

IV.4 CARACTERISTIQUES DES CONTROLEURS

IV.4.1 Stabilité

Un système bouclé doit être stable .Si et seulement si les réactions du système de régulation soit énergétique sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger. Une correction trop fort ou trop tardive risque de conduire le système à une instabilité [22].

IV.4.2 Précision

La précision est définie, à partir de l'erreur entre la grandeur de consigne et la grandeur de sortie. En régulation, la précision est obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle.

IV.4.3 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.

IV.5 REGLAGE DE VITESSE PAR UN REGULATEUR (IP)

Le régulateur *IP* a été appliqué pour la commande des machines asynchrone en raison de ses divers avantages. En effet, il permet l'obtention de hautes performances (faible dépassement, écart statique nul et bon rejet de perturbations). La boucle de régulation de la vitesse avec l'utilisation d'un régulateur de type IP est schématisée par la figure suivante:

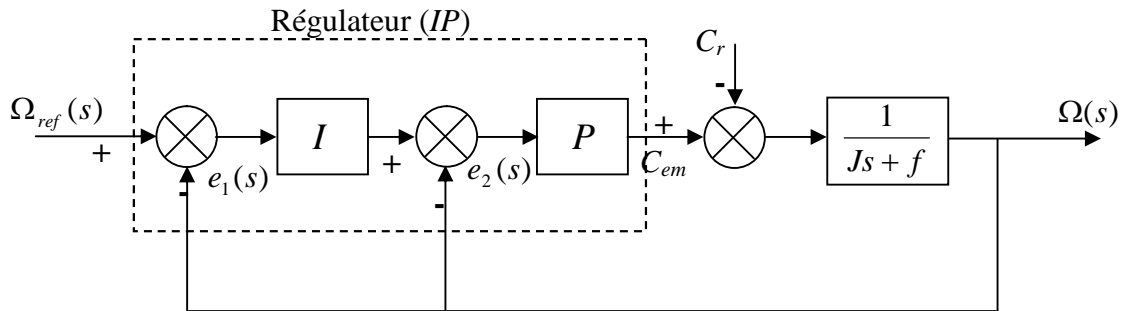


Fig. (IV.3) : Boucle de régulation de vitesse avec Régulateur IP

IV.5.1 Conception du contrôleur

IV.5.1.1 Action intégrale

L'action intégrale réagit, lentement aux variations de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne. Tant que subsiste une erreur positive (ou négative) l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

IV.5.1.2 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.

IV.5.3 Calcul de régulateur IP

Le régulateur Intégral-Proportionnel (*IP*) est utilisé pour le réglage de la grandeur mécanique. Ce type de régulateur est dérivé du régulateur classique Proportionnel-Intégral (*PI*), mais a l'avantage de conduire à une fonction de transfert en boucle fermée sans zéro donnée par :

$$H(s) = \frac{1}{\frac{J}{K_p K_i} s^2 + \frac{K_p + f}{K_p K_i} s + 1} \quad (\text{IV.9})$$

Pour commander le système en boucle fermée, il est nécessaire de bien choisir les coefficients K_p, K_i . Deux méthodes peuvent être utilisés, compensation des pôles ou l'imposition des pôles qui sera utilisée dans la partie qui suit.

IV.5.3.1 Méthode d'imposition des pôles

La fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée est caractérisée par :

$$F(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \quad (\text{IV.10})$$

Par analogie entre les expressions (IV.9) et (IV.10) on trouve:

$$\begin{cases} \frac{J}{K_p K_i} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{K_p + f}{K_p K_i} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_p = 2J\xi\omega_n - f \\ K_i = \frac{J\omega_n^2}{K_p} \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

Les gains du correcteur sont obtenus pour avoir un temps de réponse minimal tout en assurant l'absence de dépassement. Cette technique concerne d'imposer des valeurs de ξ et ω_n pour déterminer les coefficients K_p et K_i .

On prend $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$ et $\omega_n = 14.15 \text{ rad/s}$, ce qui donne :

$$\begin{cases} K_p = 0.4002 \\ K_i = 10.0056 \end{cases}$$

IV.6 RESULTATS DE SIMULATION

Avant de présenter les résultats de simulation de la commande *DTC* avec un correcteur de type *IP*, nous devons signaler qu'on a considéré le cas d'un comparateur à hystérésis à trois niveaux sans des vecteurs tension nuls

Les tests de simulation ont été effectués pour une perturbation de charge 5 N.m appliquée à l'instant 1s. Les coefficients du correcteur utilisé sont calculés pour $\omega_n = 14.15 \text{ rad/s}$. Avec une temps d'échantillonnage égale 0.00003s.

La figure (IV.4) représenter la réponse du vitesse, flux, courant statorique et couple électromagnétique, sous charge nominal après un démarrage à vide. On peut noter que lors démarrage à vide, la vitesse atteint rapidement sa valeur de référence sans dépassement, mais

après l'application de la charge la réponse de vitesse représente un légère variation au moment de l'application de la charge, la commande rejette la perturbation. La réponse en couple, et le module du flux présente une bonne performance avec faible oscillation en charge.

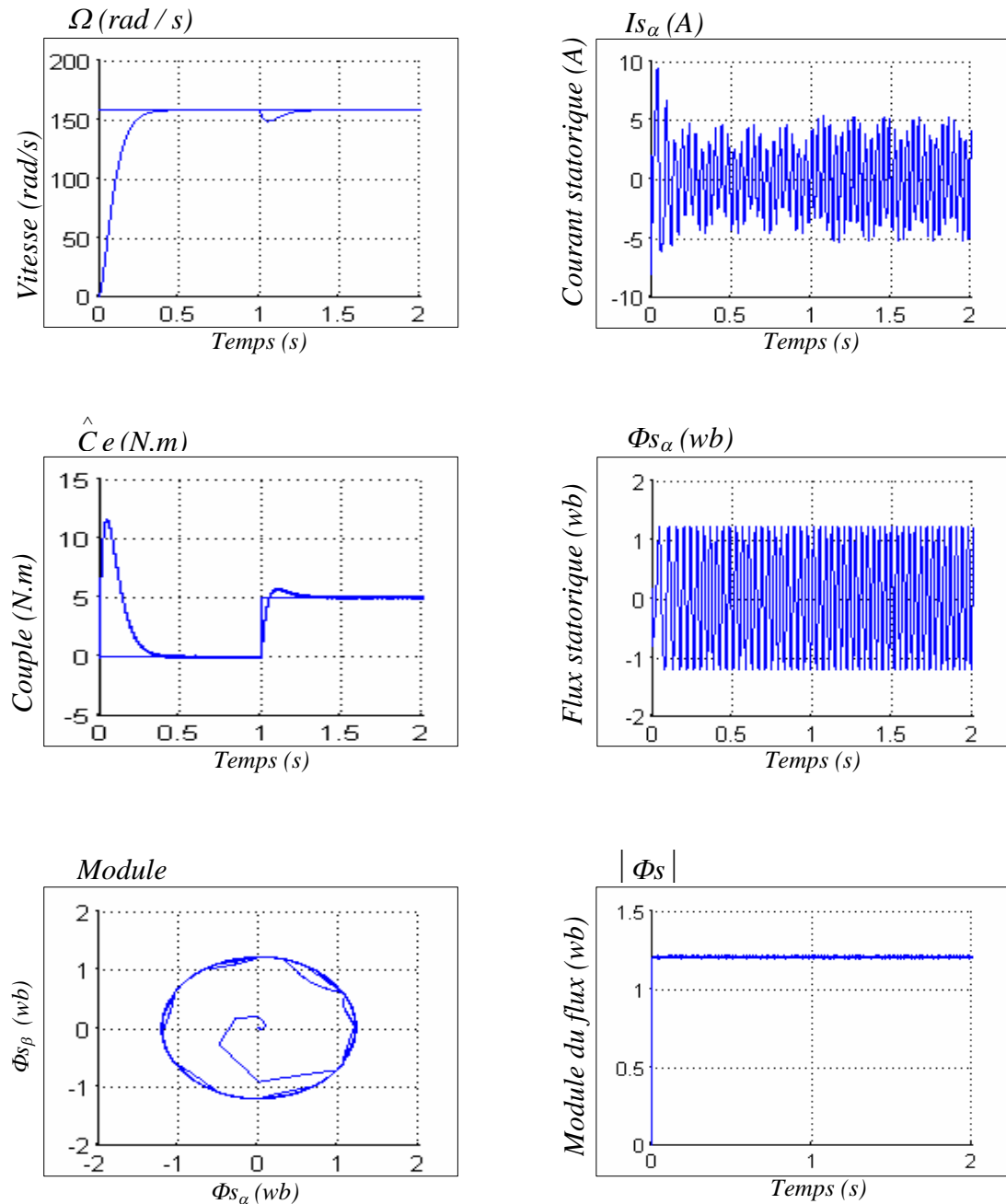


Fig. (IV.4) : Résultats de simulation de la commande de vitesse avec correcteur (IP).

On peut conclure que La commande *DTC* avec correcteur de vitesse *IP* offre une meilleur dynamique, une meilleur précision et moins sensible à l'application de la charge Pour bien juger cette commande plusieurs testes de robustesses vont être appliqués à la *DTC*

IV.7 TESTE DE ROBUSTESSE DU CONTROLE DIRECTE DU COUPLE

La robustesse d'une commande est sa capacité à surmonter l'incertitude sur le modèle à contrôler, on testera le comportement de la régulation par rapport aux variations de vitesse et de la charge. Ainsi aux variations des paramètres de la MADA, en faisant varier les résistances rotorique R_r , statorique R_s .

IV.7.1 Teste de poursuite pour la commande DTC contre les variations de la vitesse

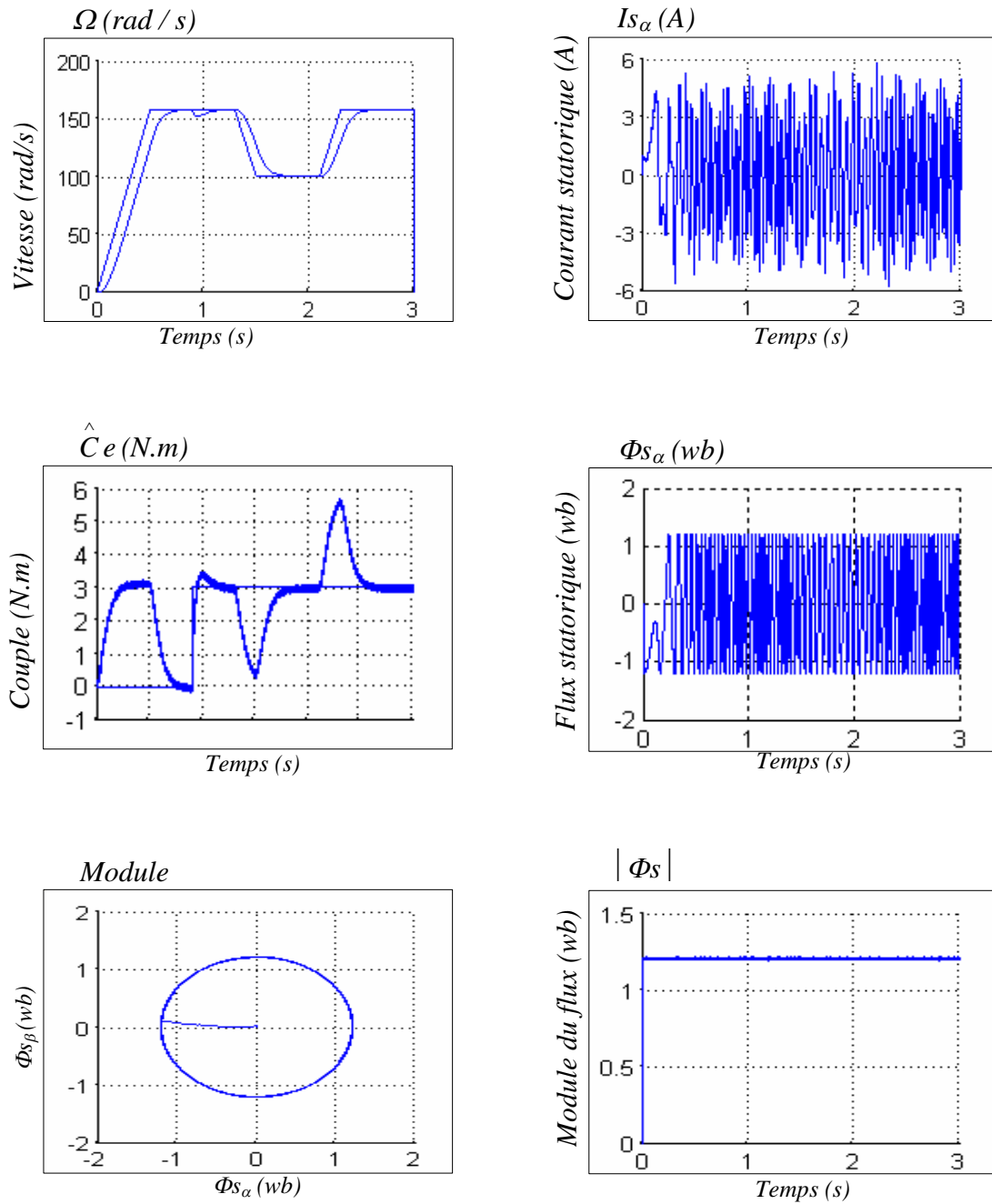


Fig. (IV.5) : Test de robustesse pour une variation de vitesse

La figure (IV.5) représente les résultats de simulation effectuées pour variation de vitesse de ($\Omega_{ref}=157, 100$ et 157 rad/s), ainsi une application de charge de 3 N.m à l'instant $t = 0.8$ s.

Les résultats de simulation obtenus montrent que cette variation présente une influence sur les courants, le 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 transaction lors du passage d'un mode à l'autre, puis rejoint sa valeur de référence.

IV.7.2 Teste de poursuite pour la commande DTC lors de l'inversion du sens de rotation

Dans cette section, nous avons simulé l'inversion du sens de rotation de la vitesse de ($157, -157$ rad/s), avec une application de charge de 5 N.m à l'instant $t = 1$ s.

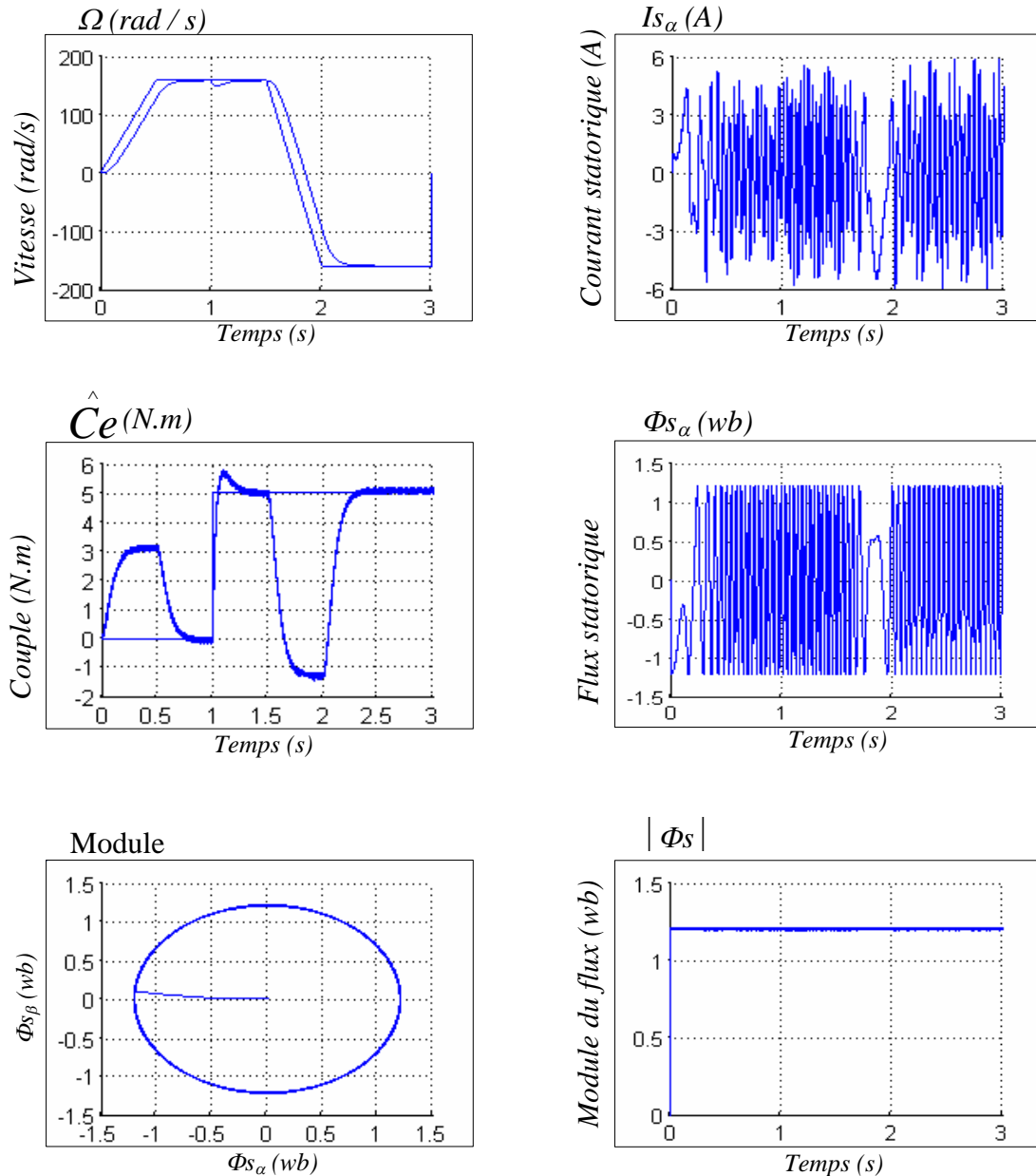


Fig.(IV.6) : Test de robustesse pour une inversion de vitesse

Les résultats de simulation obtenus, montre que les réponses en vitesse et en couplesuivent parfaitement leurs valeurs de référence avec le mêmes temps de réponse. L'inversionde vitesse provoque un retard de réponse de vitesse, un pic d'oscillation de courant et une chute du module de flux qui se stabilité à sa valeur de référence dans le régime permanent.

IV.7.3 Teste de robustesse pour la commande *DTC* lors de la variation de la charge

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la charge ($C_r = 3 \text{ N.m}$, 6 N.m) de la figure (IV.7) montrent que les grandeurs telle que la vitesse, le couple, les flux et le courant sont influencés par cette variation.

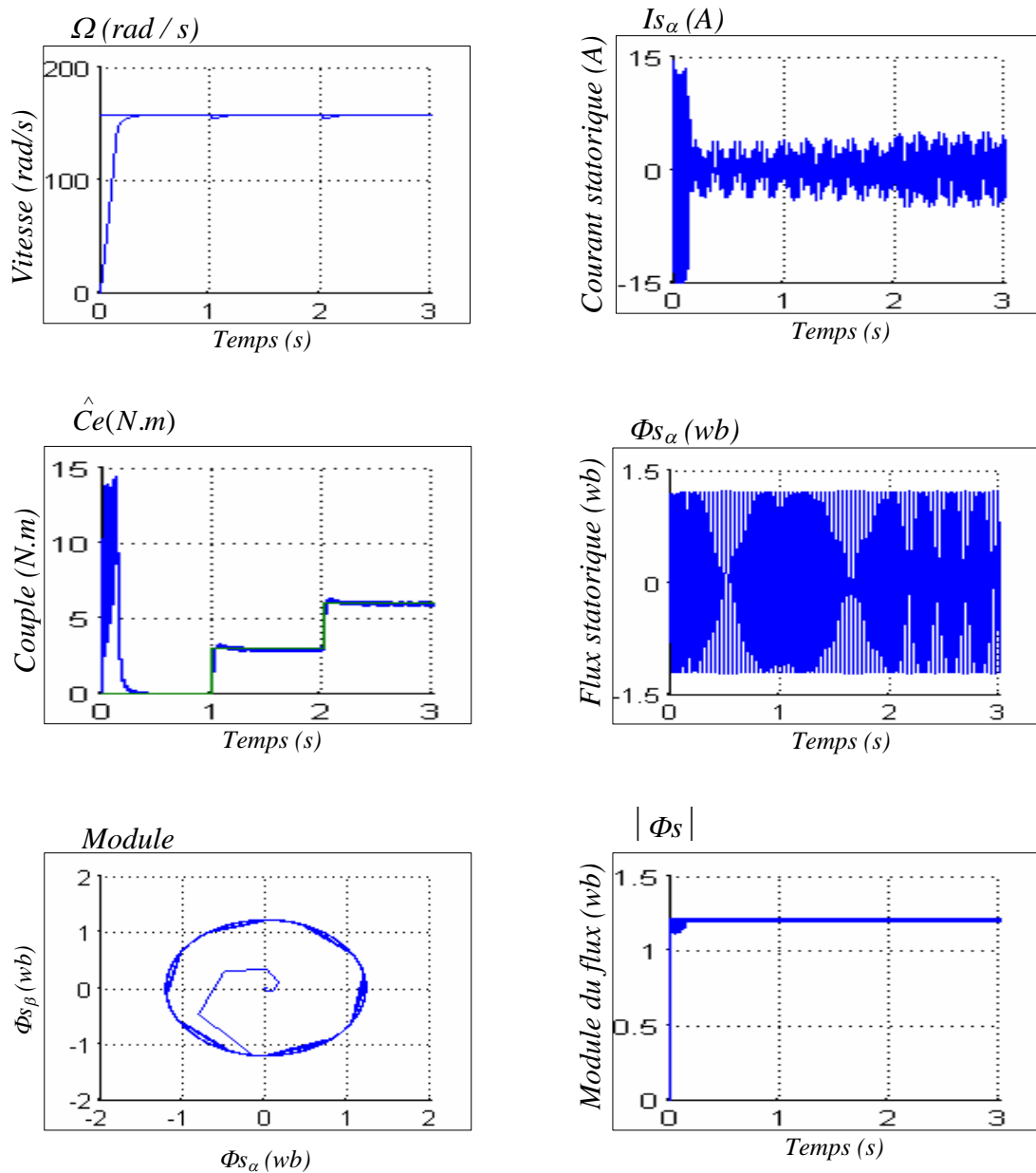


Fig. (IV.7) : Test de robustesse pour une variation de la charge

Nous constatons également que le couple et la vitesse suivent leurs références correspondantes. Donc on peut dire que la commande est robuste du point de vue variation de la charge.

IV.7.3 Teste de robustesse pour la commande *DTC* lors de la variation de la résistance rotorique

La figure (IV.8) représente la réponse de la vitesse, du flux, du courant statorique et du couple électromagnétique. Avec un changement de la valeur de la résistance rotorique de +50% de sa valeur nominale à l'instant $t = 1.5$ s.

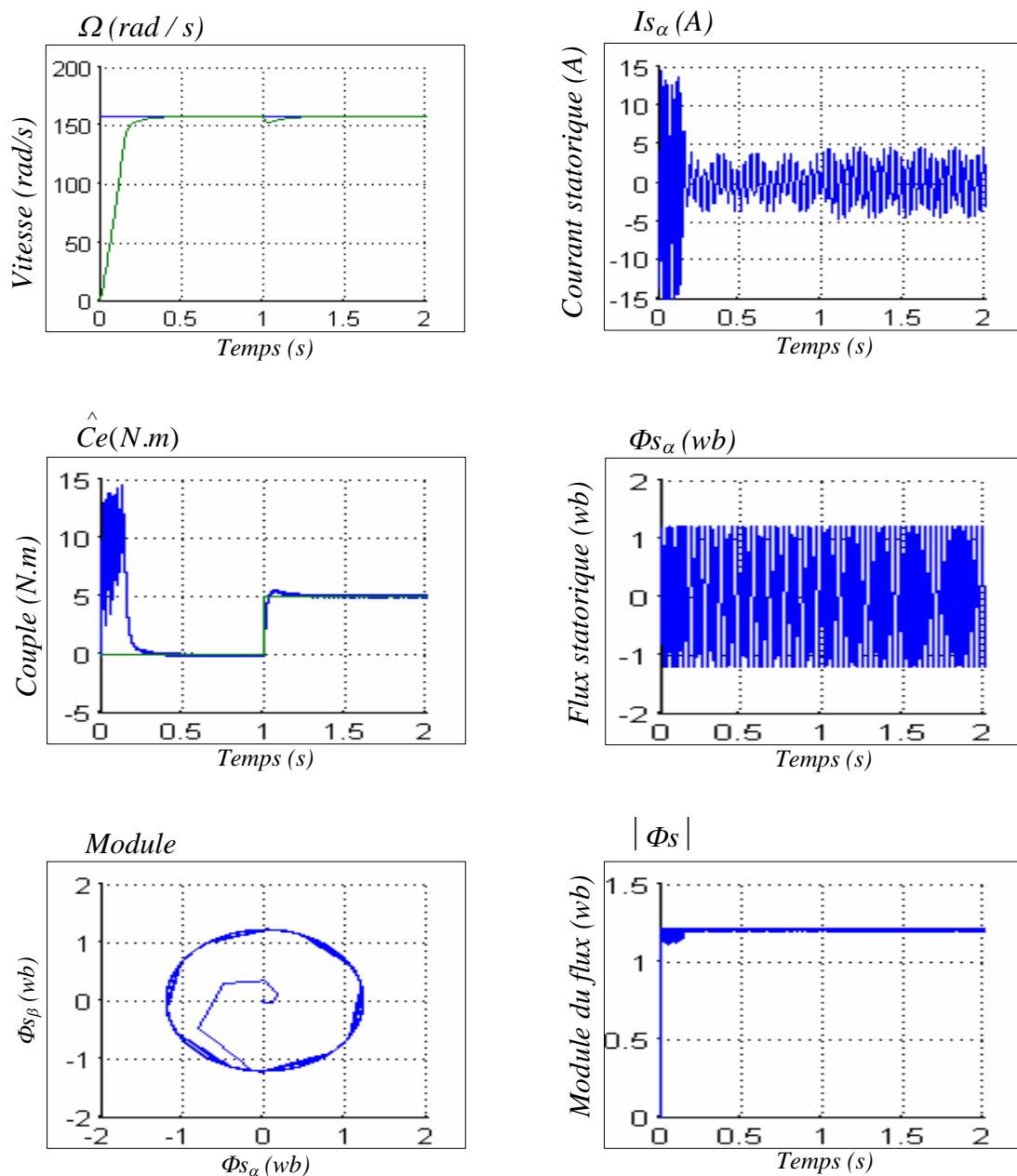


Fig.(IV.8) : Test de robustesse pour une variation de la résistance rotorique

La vitesse de rotation étant fixée à 157 rad/s un couple résistant positif de 5N.m est appliqué à l'instant $t = 1$ s. On peut noter que Les résultats de simulation montrent l'insensibilité de la commande de vitesse avec correcteur *IP* à la variation de la résistance rotorique.

IV.7.5 Teste de robustesse pour la commande DTC lors de la variation de la résistance statorique

En régulation de vitesse, nous proposons un deuxième test pour vérifier la robustesse de notre système, avec un changement de la valeur de la résistance statorique de +50% à l'instant $t = 1.5$ s.

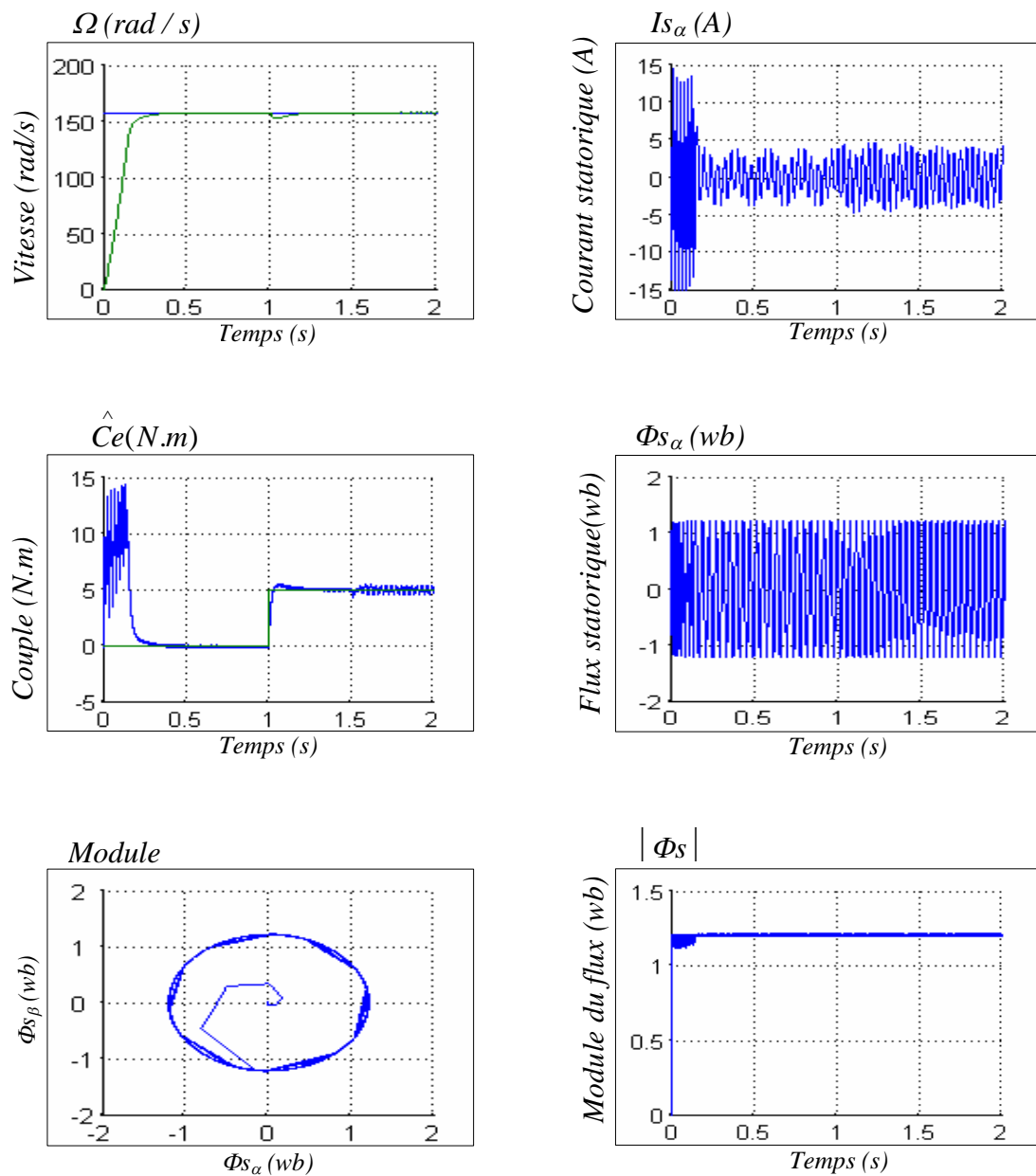


Fig.(IV.9) : Test de robustesse pour une variation de la résistance statorique

La vitesse de rotation étant fixée à 157 rad/s (vitesse nominale) et le couple résistant positif de 5N.m est appliqué à l'instant $t = 1$ s. La figure (IV.9) présentent les réponses du couple, du courant, du flux statorique et de la vitesse de rotation.

D'après les résultats présentés dans la figure (IV.9), on remarque au moment de variation de la résistance statorique de +50 % de la résistance nominale dû à l'échauffement de la machine. Les résultats montrent qu'avant l'instant ($t = 1.5$ s) c'est-à-dire avant l'instant de variation de la résistance, aucune variation sur les courbes de vitesse, couple, courants et flux. A partir de l'instant de variation de la résistance, une influence sur les courbes de vitesse, couple, courants et flux est apparu. Donc la commande de vitesse avec le correcteur *IP* est sensible à la variation de la résistance statorique.

IV.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande *DTC* en utilisant un régulateur *IP* (intégrale-proportionnelle), dans le but de juger les performances de la *DTC*. Des tests de robustesse de cette commande par variation et inversion de vitesse, variation des paramètres de la machine et l'augmentation de couple résistant ont été présentés.

Les résultats de simulation montrent que le contrôle direct de couple avec régulateur de type *IP* est considérée comme l'une des commandes robustes de la machine asynchrone à double alimentation, son implantation pratique est considérée facile à comparer avec d'autres techniques et en plus l'absence du capteur de vitesse lui confère un grand avantage de souplesse.

On voit bien aussi que le contrôle direct du couple de la MADA avec un correcteur *IP* est offre une meilleure dynamique et une meilleure précision. Elle présente également une robustesse contre les variations paramétriques. Cependant, elle présente certaines oscillations au niveau du couple lors de la variation de résistance statorique.