

Chapitre IV

Commande par flux orienté de la machine asynchrone

IV.1 Introduction

Le diagnostic de la machine asynchrone, dans le cas de commande, est devenu très important à cause du développement qu'a connu le milieu industriel surtout pour les entraînements électriques.

Dans ce chapitre, on va voir l'influence des défauts rotoriques sur le contrôle à flux orienté de la machine asynchrone.

La machine asynchrone est difficilement commandable. La difficulté réside dans le fait que son modèle mathématique dans le repère de Park est non linéaire, multivariables et fortement couplé.

Dans la machine asynchrone, le couple électromagnétique est le résultat d'une interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor en court-circuit. Ainsi, toute variation du couple par variation du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor.

Pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage entre le couple et le flux.

Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en appliquant la commande par flux orienté (commande vectorielle). Cette dernière a été proposée en 1971 par Blaschke. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple par orientation du flux selon l'axe direct du repère (d, q).

Nous nous proposons dans ce chapitre d'étudier le comportement de la machine asynchrone en commande vectorielle lorsqu'il se produit des ruptures de barres.

IV.2 Principe de la commande vectorielle

IV.2.1 Description

Le principe du découplage consiste à rendre le contrôle de la machine asynchrone similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée. Ceci peut être réalisé en orientant le flux en quadrature avec le couple (figure IV.1).

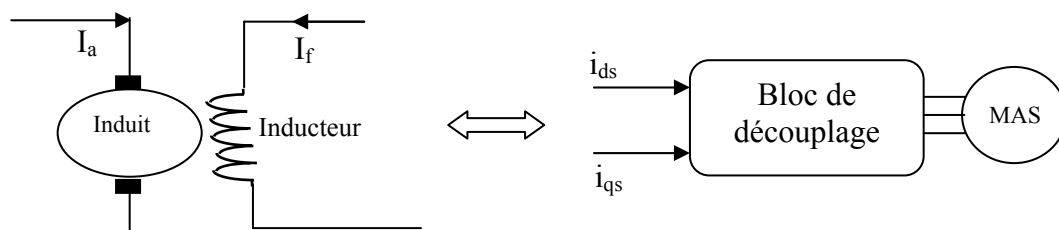


Figure IV.1: Principe de la commande vectorielle.

IV.2.2 Orientation du flux rotorique

On dissocie le courant statorique en deux composantes i_{ds} et i_{qs} en quadrature de telle sorte que le courant i_{ds} soit orienté suivant l'axe du flux rotorique (figure (IV.2)).

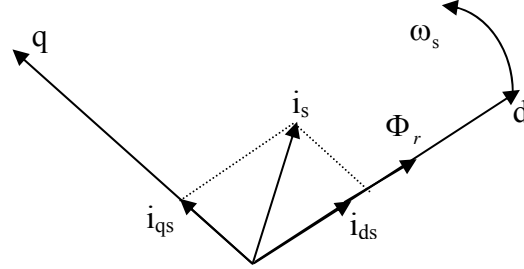


Figure IV.2 : Orientation du flux rotorique.

Ainsi, en agissant sur les variables i_{ds} et i_{qs} , les grandeurs Φ_r et C_{em} sont commandées séparément. Cela se traduit par :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r \\ \Phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (IV.1)$$

Le modèle de la machine asynchrone avec orientation du flux rotorique s'écrit [4] :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M i_{ds} - \Phi_r}{T_r} \quad , \quad C_{em} = \frac{pM}{L_r} \Phi_r i_{qs} \quad , \quad \omega_{sg} = \frac{M}{T_r} \frac{i_{qs}}{\Phi_r} \quad (IV.2)$$

A flux rotorique constant, le couple dépend alors uniquement du courant i_{qs} .

IV.2.3 Bloc de découplage

En reprenant la description de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sur l'axe (d) du repère lié au champ tournant et en réécrivant le système d'équation (IV.2) de la manière suivante :

$$\begin{aligned} i_{ds}^* &= \frac{1}{M} \left(T_r \frac{d\Phi_r^*}{dt} + \Phi_r^* \right) \\ i_{qs}^* &= \frac{L_r}{pM} \frac{C_{em}^*}{\Phi_r^*} \\ \omega_{sg}^* &= \frac{M}{T_r} \frac{i_{qs}^*}{\Phi_r^*} \end{aligned} \quad (IV.3)$$

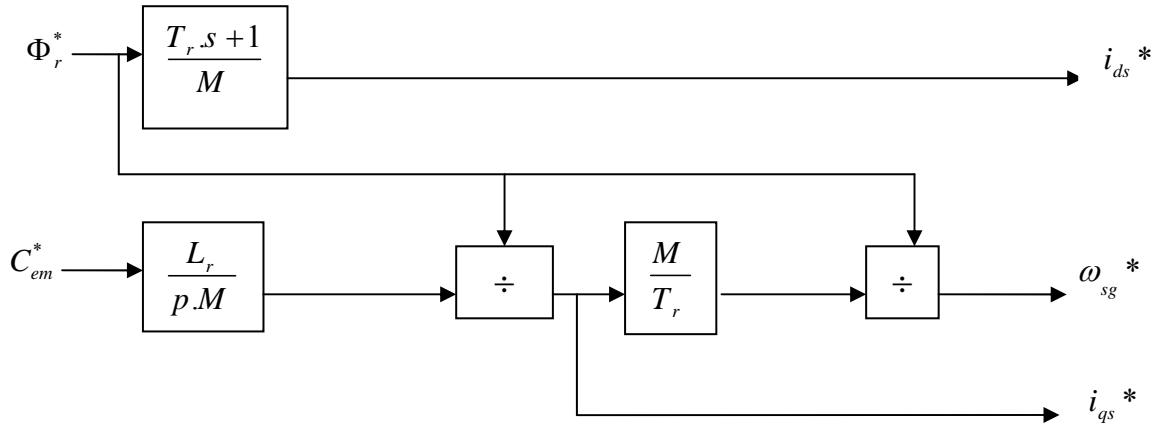


Figure IV.3 : Structure de commande par flux orienté (CFO)

La figure (IV. 4) donne le schéma bloc de découplage par orientation du flux rotorique. Nous réalisons la commande découplée suivante :

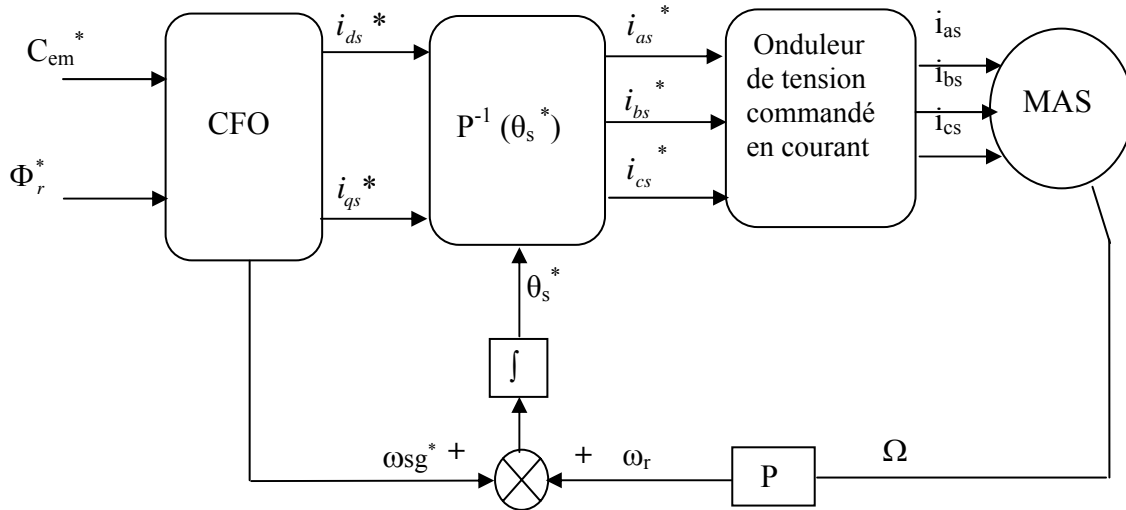


Figure IV.4: Schéma de découplage par orientation du flux rotorique

IV.3 Réglage de la vitesse par la méthode indirecte

Concernant le réglage de vitesse, celui-ci est donné par le schéma fonctionnel de régulation de la figure IV.5. Un régulateur de type PI a été rajouté au montage de découplage de la figure IV.4

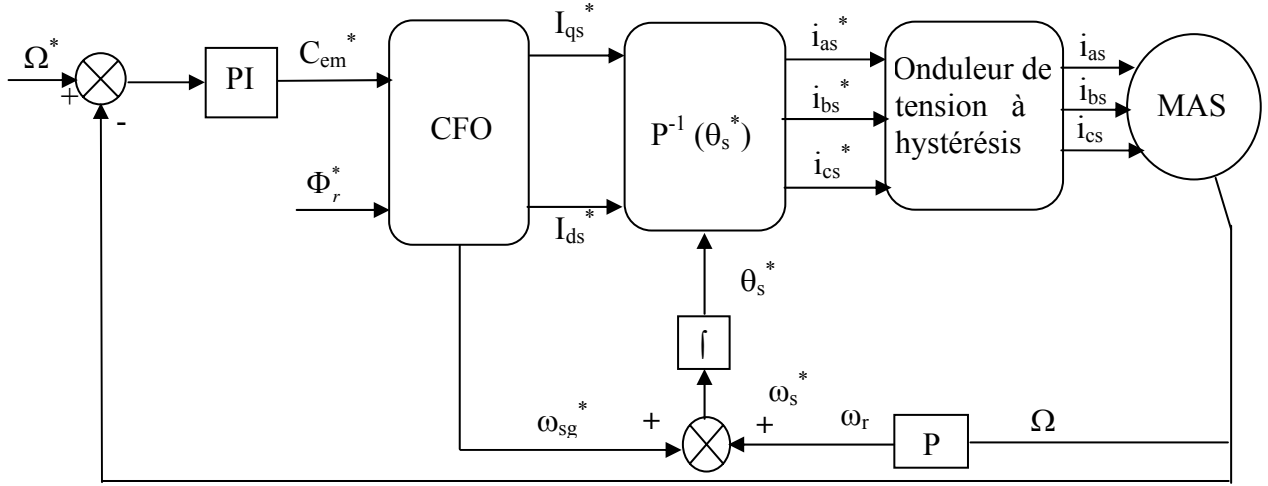


Figure IV.5: Schéma fonctionnel de régulation de vitesse d'une machine asynchrone commandée par la technique du flux orienté (méthode indirecte)

IV.3.1 Synthèse du régulateur PI

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse de référence correspondante.

L'équation mécanique donne:

$$\frac{\Omega(s)}{C_{em}(s)} = \frac{1}{f + Js} \quad (IV.4)$$

En associant à cette fonction un régulateur PI, on obtient:

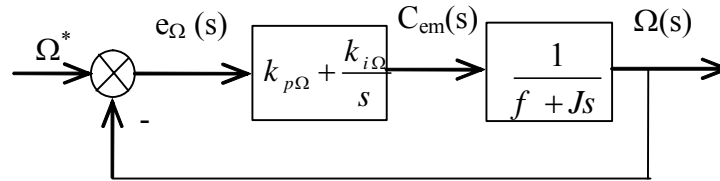


Figure IV.6: Schéma fonctionnel de régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle fermée, calculée à partir du schéma précédent, est donnée par:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{(k_{p\Omega}s + k_{i\Omega}) \frac{1}{J}}{P(s)} \quad (IV.5)$$

L'équation caractéristique $P(s)$ est:

$$P(s) = s^2 + \frac{f + k_{p\Omega}}{J}s + \frac{k_{i\Omega}}{J} = 0 \quad (IV.6)$$

En imposant toujours deux pôles complexes conjugués $s_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$, en boucle fermée et, par identification avec la nouvelle équation caractéristique désirée, on arrive à:

$$k_{i\Omega} = 2J\rho^2 \quad \text{et} \quad k_{p\Omega} = 2\rho J - f \quad (\text{IV.7})$$

IV.4 Résultats de la simulation

Dans le but de valider l'influence des défauts rotoriques sur le modèle réduit du schéma multi – enroulements de la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous avons simulé ce schéma en commande indirecte de vitesse. Les performances de la commande ont été évaluées pour une machine saine ainsi qu'en présence de défauts rotoriques (ruptures de barres), pour une inversion du sens de rotation avec et sans variations du couple de charge.

IV.4.1 Cas d'une machine saine

a. Machine saine à vide

Les paramètres du régulateur de vitesse utilisé dans l'ensemble des simulations qui seront présentées par la suite, sont calculés pour $p=100$. L'algorithme de simulation est réalisé avec une période d'échantillonnage de 0.5ms.

La figure IV.7 représente les réponses de la vitesse de rotation (n) et du couple électromagnétique C_{em} , à une inversion du sens de rotation de 1000 tr/mn à -1000 tr/mn. En absence d'un couple de charge, le couple se stabilise, après un régime transitoire, à une faible valeur qui compense les frottements.

Dans la simulation de la figure IV.5 nous avons introduit un filtre pour la référence dans le but de modérer l'impact de sa variation brusque sur la réponse en vitesse de la machine ce qui amorti la rapidité du réglage et limite le dépassement.

La fonction de transfert à prévoir dans notre cas est donnée par :

$$\frac{(\Omega^*)^{filtrée}}{\Omega^*} = \frac{1}{(1+T_f S)} \quad (\text{IV.8})$$

La constante du temps T_f est calculée de façon à compenser le zéro de la fonction de transfert par rapport à la consigne donnée par l'équation (IV.5). Donc $T_f = \frac{k_{p\Omega}}{k_{i\Omega}}$, des simulations ont montré qu'il est judicieux de travailler avec une valeur de T_f trois fois la valeur prévue, afin d'avoir des réponses de faibles dépassements.

La figure IV.8 illustre le courant statorique i_{as} où on remarque, après une phase de démarrage, que ce courant se stabilise à une valeur efficace de l'ordre de 1.41A.

La figure IV.9 illustre l'évolution temporelle, en régime transitoire et en régime permanent, des courants de barres rotoriques irb_0 , irb_1 , irb_2 , irb_3 . Après le démarrage et en absence d'un couple de charge, ces courants se stabilisent à des valeurs proches de zéro.

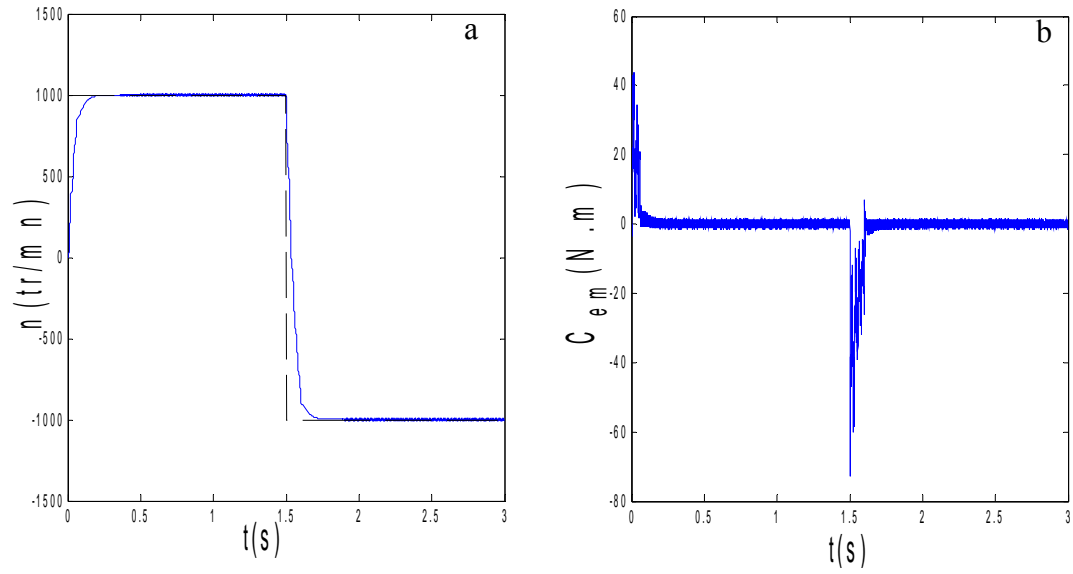


Figure IV.7 : Réponses de la machine asynchrone saine lors d'une inversion du sens de rotation : a) vitesse de rotation et sa référence , b) couple électromagnétique.

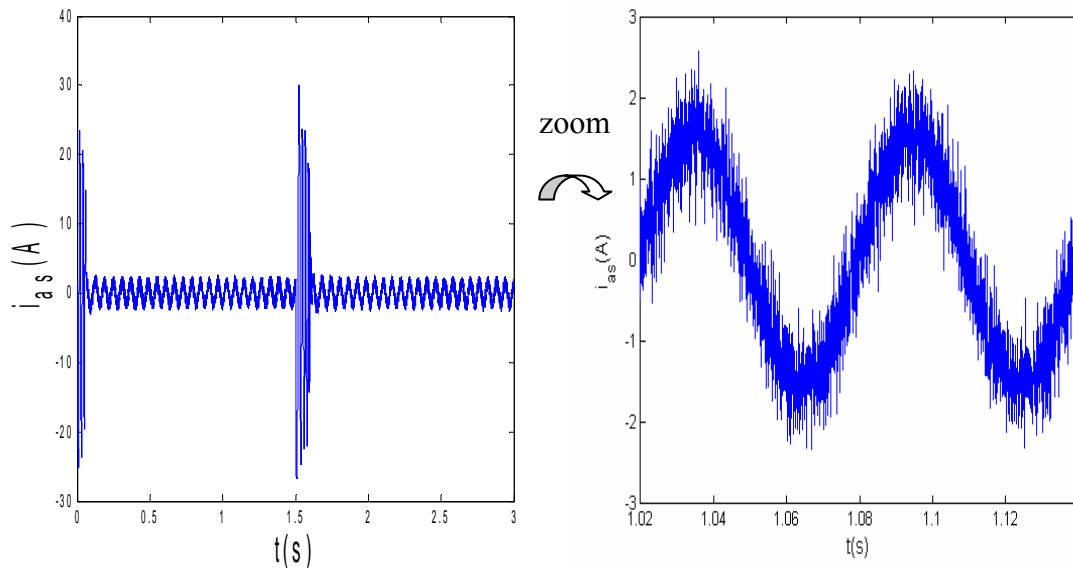


Figure IV.8 : Courant de phase statorique.

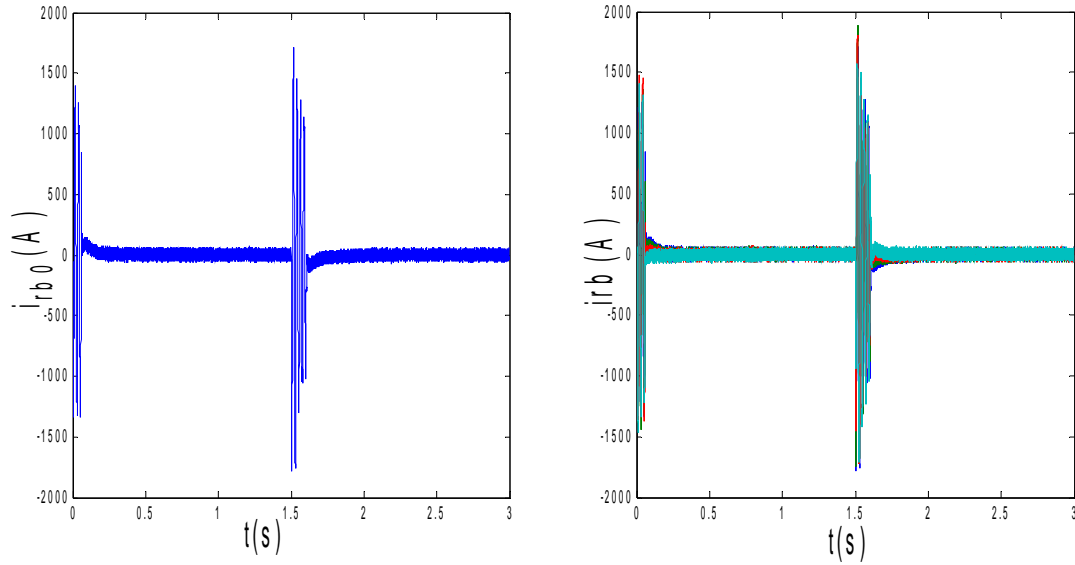


Figure IV.9 : courants dans les barres rotoriques, I_{rb0} , I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3} , (simulation avec modèle global, machine saine à vide)

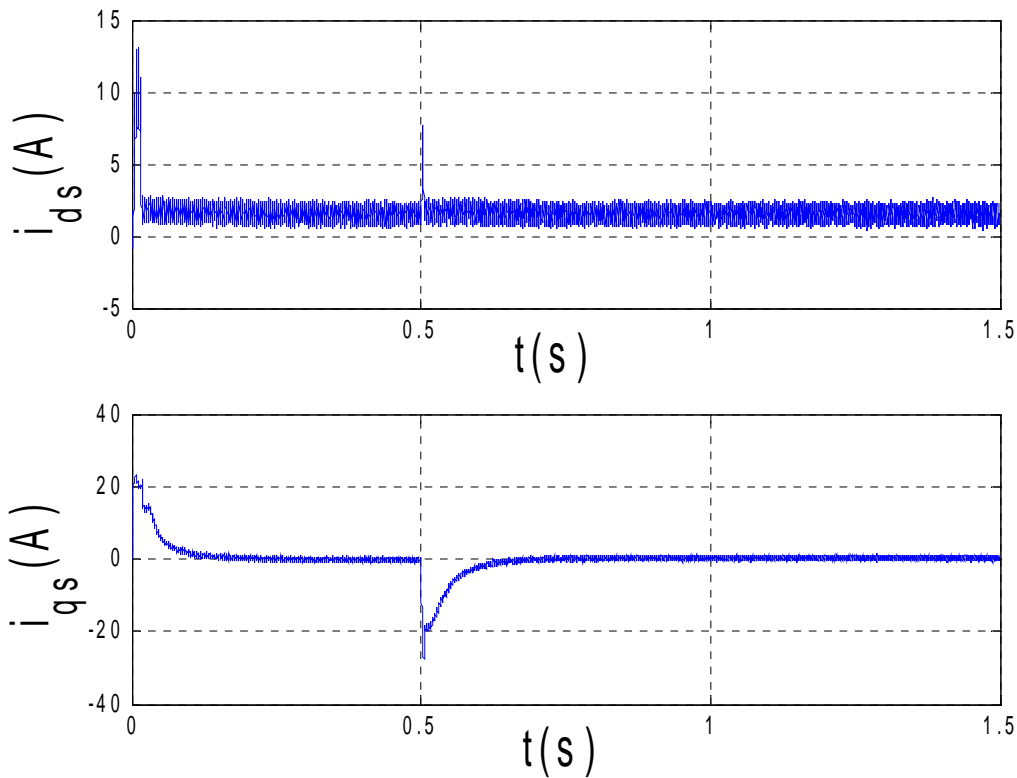


Figure IV.10 : Découplage par orientation du flux rotorique.

b- Cas d'une machine saine en charge

Pour illustrer les performances du réglage, nous avons simulé un démarrage à vide avec une application du couple de charge ($C_r=3.5\text{Nm}$) à l'instant $t = 0.5\text{s}$, suivi d'une inversion de la référence de vitesse entre $\pm 1000\text{ tr/mn}$ à l'instant $t=1.5\text{s}$.

Les résultats obtenus sont regroupés sur les figures IV.11-12. Comme on peut le constater, ces résultats montrent que la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone permet un rejet de la perturbation et une bonne poursuite de la référence. Toutefois, un pic de couple de

valeur importante apparaît lors de l'inversion de la vitesse ce qui est néfaste pour le bon fonctionnement de la machine.

La figure IV.13 présente les courants des quatre premières barres rotoriques. En présence d'un couple de charge, les courants rotoriques deviennent des ondes sinusoïdales.

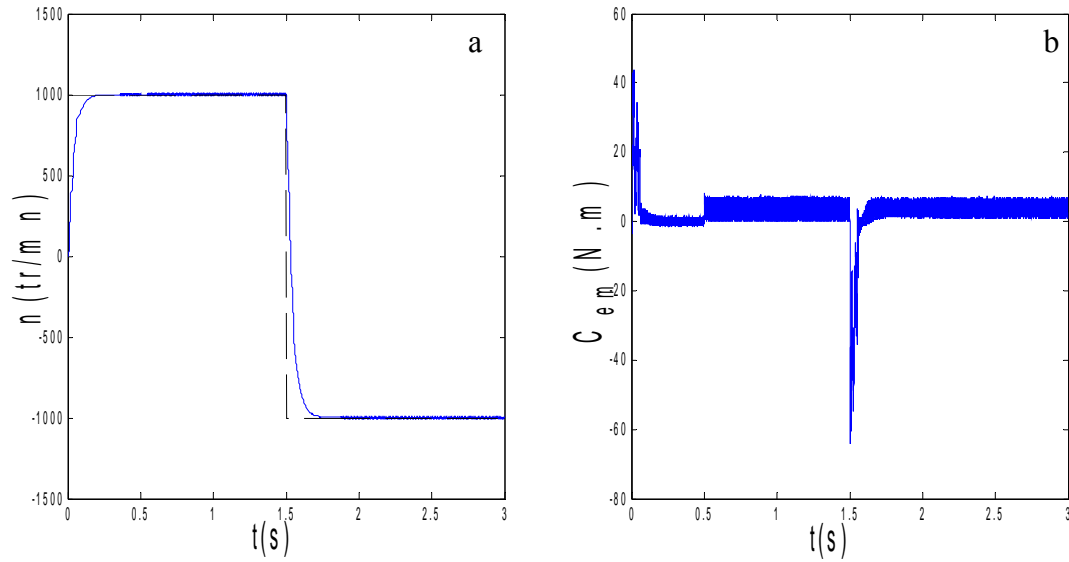


Figure IV.11 : Réponses de la machine asynchrone saine en charge lors d'une inversion du sens de rotation : a) vitesse de rotation et sa référence , b) couple électromagnétique.

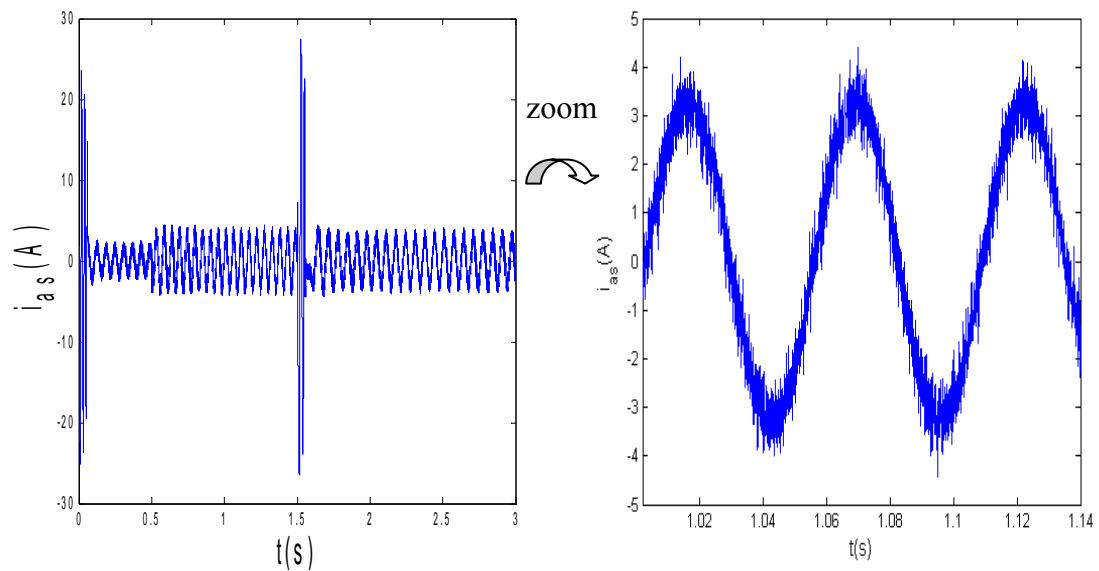


Figure IV.12 : Courant de phase statorique d'une machine asynchrone saine en charge.

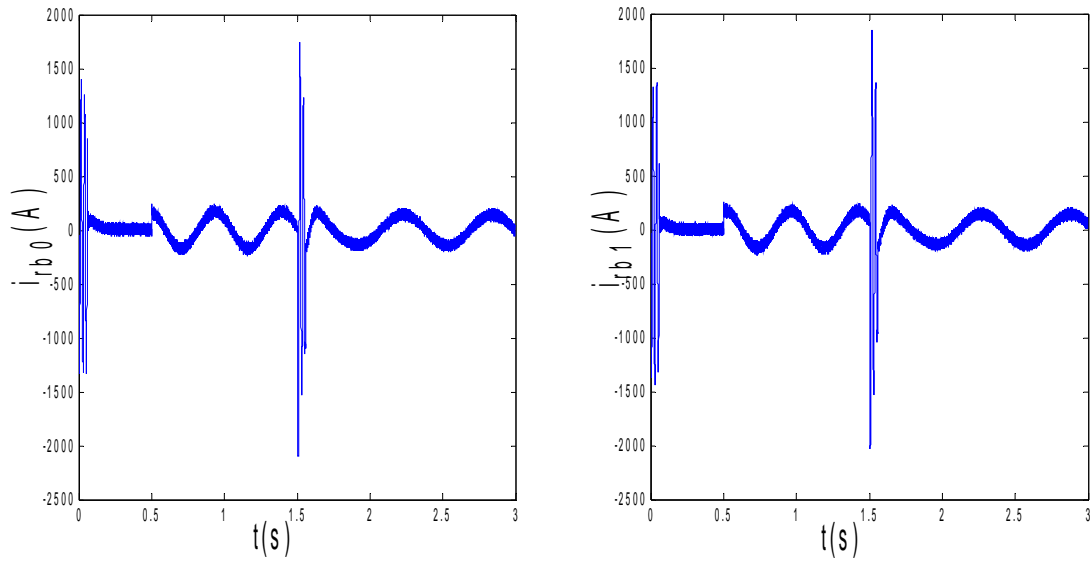


Figure IV.13 : courant dans la barre rotorique : i_{rb0} , i_{rb1}
(simulation avec modèle global, machine saine en charge, $C_r = 3.5$ N.m)

IV.4.2 Cas d'une machine avec défaut

On va voir la régulation de la vitesse, dans le cas des défauts, où on simule la rupture d'une barre, et aussi la rupture de deux barres.

a- Cas d'une rupture d'une barre

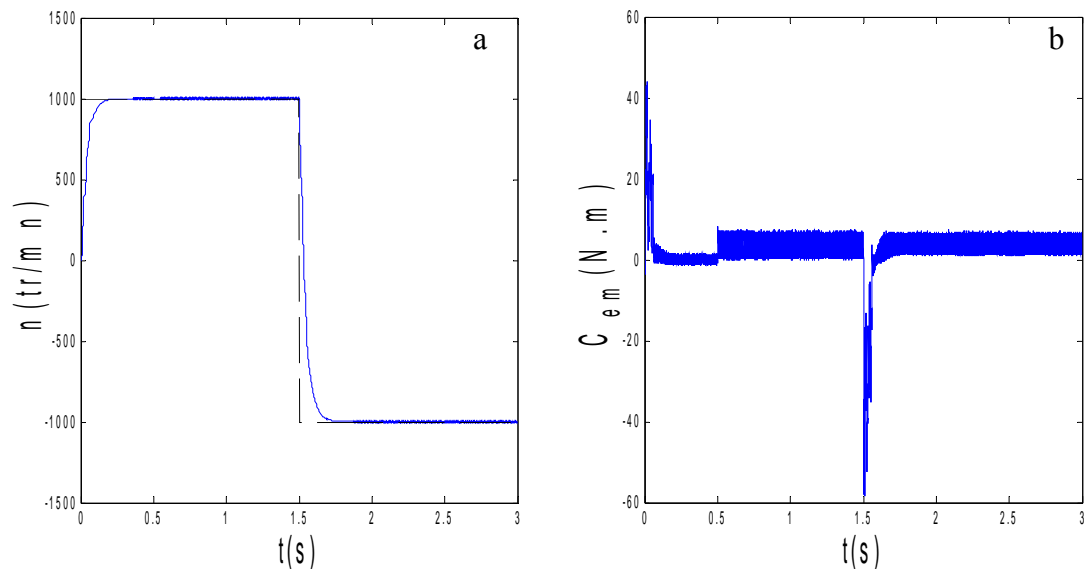


Figure IV.14 : Réponses de la machine asynchrone en charge avec un défaut lors d'une inversion du sens de rotation : a) vitesse de rotation et sa référence, b) couple électromagnétique.

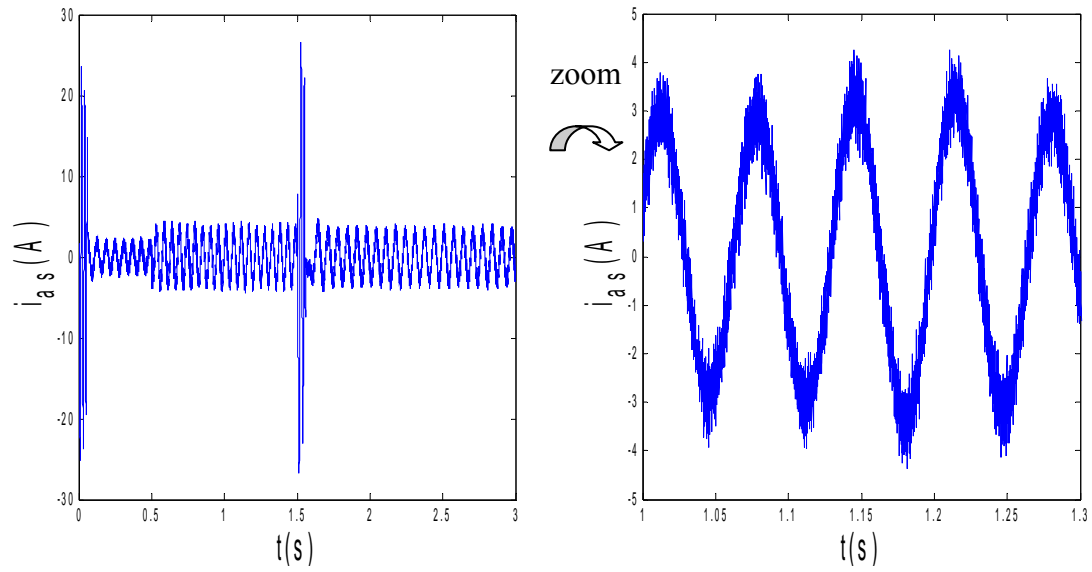


Figure IV.15 : Courant de phase statorique, machine avec défaut et en charge $C_r = 3.5 \text{ Nm}$

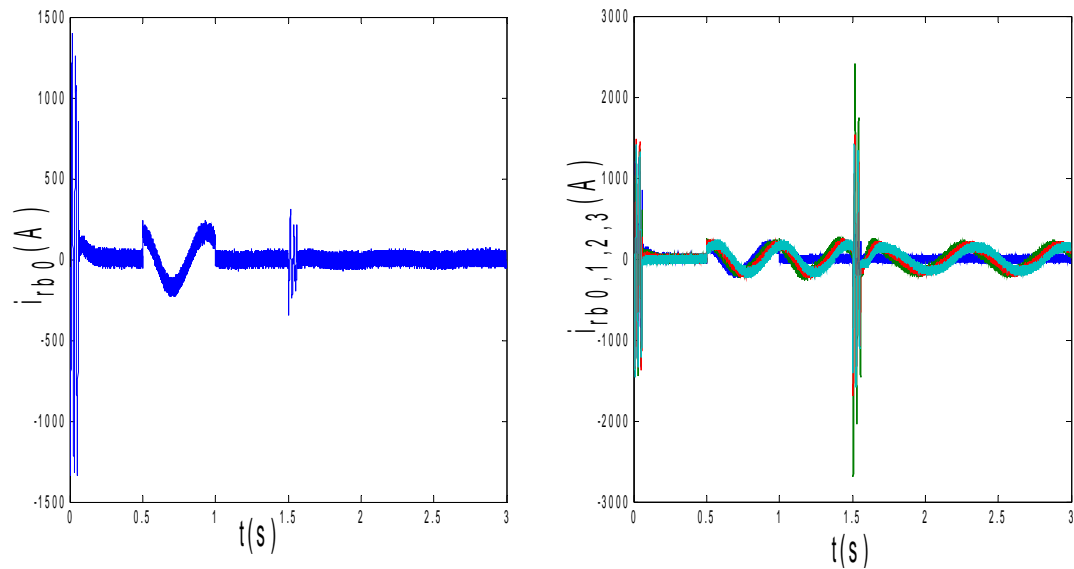


Figure IV.16 : Courants dans les barres rotoriques : I_{rb0} , I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3} machine en défaut (simulation avec modèle global, rupture de la barre r_{b0} à $t = 1 \text{ s}$)

b. Cas d'une rupture de deux barres

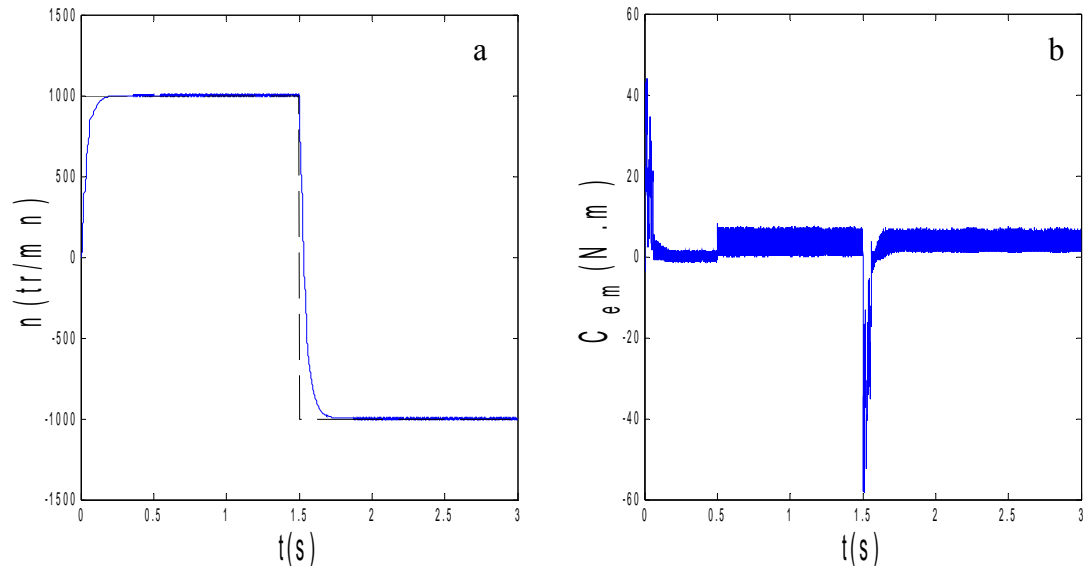


Figure IV.17 : Réponses de la machine asynchrone en charge avec un défaut lors d'une inversion du sens de rotation : a) vitesse de rotation et sa référence , b) couple électromagnétique

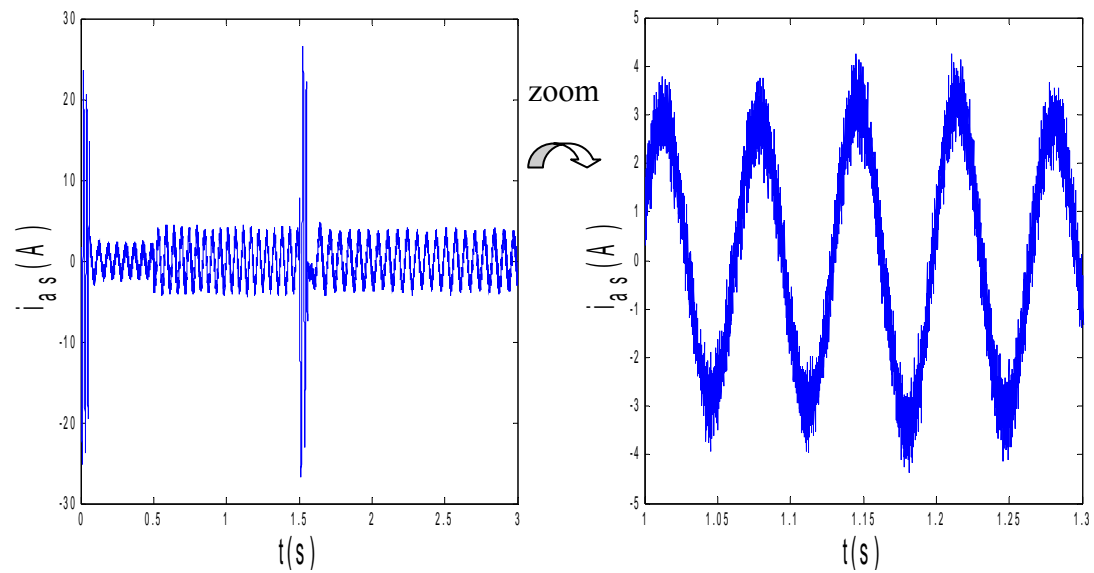


Figure IV.18 : Courant de phase statorique, machine en charge avec un défaut (2 barres cassées)

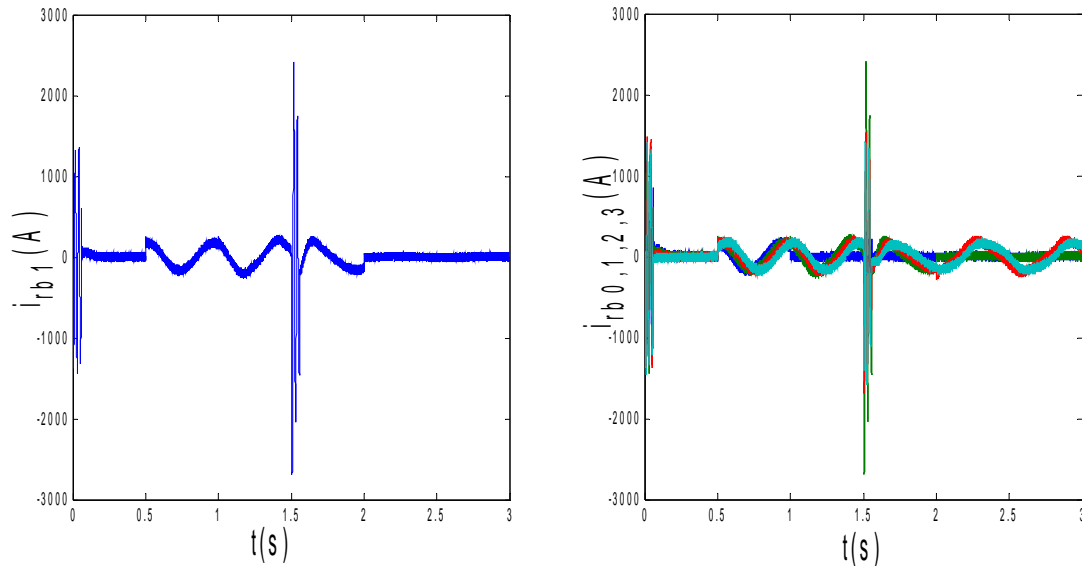


Figure IV.19 : courants dans les barres rotoriques : I_{rb0} , I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3}
(Machine en charge et en défaut, simulation avec modèle global : 1 barre cassée r_{b0} à $t=1s$, 2 barre cassée r_{b1} à $t=2s$)

Nous avons simulé dans la figure V.17 une inversion du sens de rotation de $+1000$ tr/mn à -1000 tr/mn. Ce changement du sens de rotation se déroule à couple maximal et le temps d'inversion en charge est de l'ordre de 0.3 s.

La figure IV.17 représente l'évolution du couple et la vitesse, quand la référence de vitesse est un échelon d'amplitude 1000 tr/mn. Le temps de réponse de la vitesse est de l'ordre de 0.2 s. Un échelon de couple de 3.5 N.m est appliqué à $t=0.4s$. Le régime ainsi établi, nous procédons à la simulation d'une première rupture de barre par une augmentation de 11 fois la résistance de cette barre. Après un régime transitoire très bref, la deuxième barre est cassée à $t=2s$. La vitesse reste toujours peu perturbée par ce défaut.

Le régulateur de vitesse adopté doit avoir un comportement satisfaisant sur toute la plage de vitesse de 0 à 1000 tr/mn et doit satisfaire le plus possible aux exigences suivantes

- rapidité de réponse
- dépassement nul ou faible ($< 10\%$)
- erreur statique nulle en régime permanent
- robustesse aux variations paramétriques

Dans la figure IV.18, nous observons une déformation au niveau du courant statorique, lors des cassures de barres.

La figure IV.19 montre les courants dans les barres rotoriques I_{rb0} , I_{rb1} , I_{rb2} , I_{rb3} , ou on voit que i_{rb0} s'annule à cause de la cassure de barre r_{b0} à $t=1s$, et pour r_{b1} à $t=2s$, pour i_{rb2} et i_{rb3} , on remarque une déformation dans les allures.

c. Cas d'une variation de charge

Les simulations reportées sur les figures IV.20, IV.21 concernent un démarrage en charge de la MAS pour une référence de vitesse de 0 à 1000 tr/mn avec variation du couple de charge en régime établi suivi de l'inversion du sens de rotation entre ± 1000 tr/mn à $t=1.5$ s. Pour $0.6s < t < 3s$, on applique un couple de charge de 3.5 N.m ;

A l'instant $t=2s$, on applique un couple de charge $C_F=5.5N.m$.

Ces résultats montrent que la commande vectorielle indirecte appliquée à la machine asynchrone présente des performances intéressantes.

Lors du changement brutal de la consigne, le régulateur PI se trouve soumis à un écart de réglage très important. La réaction de l'action proportionnelle, dont le but est de réduire l'écart, risque de provoquer un grand dépassement.

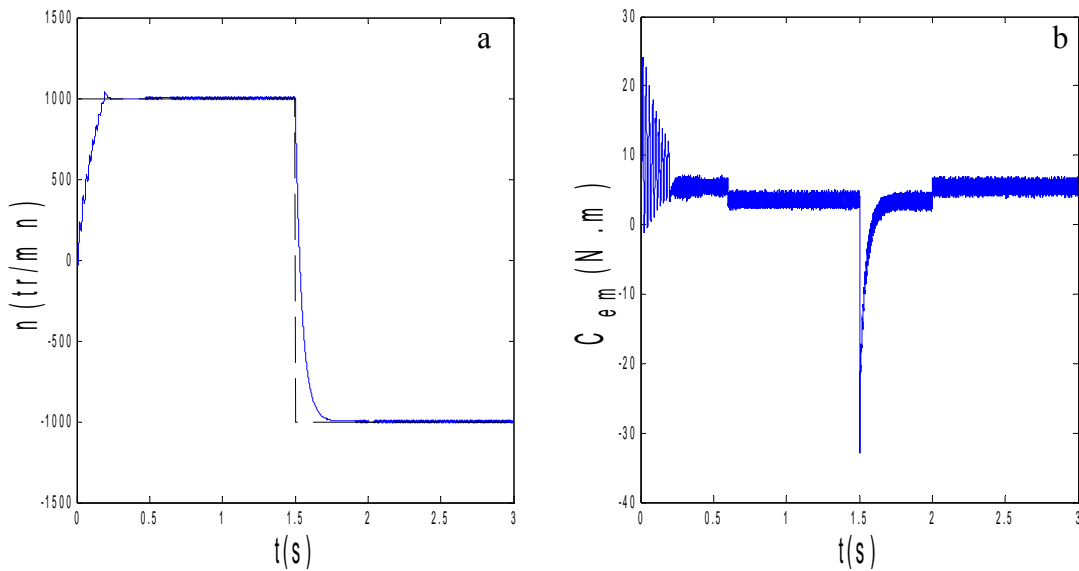


Figure IV.20 : Réponses de la machine asynchrone avec variation de la charge lors d'une inversion du sens de rotation : a) vitesse de rotation et sa référence , b) couple électromagnétique

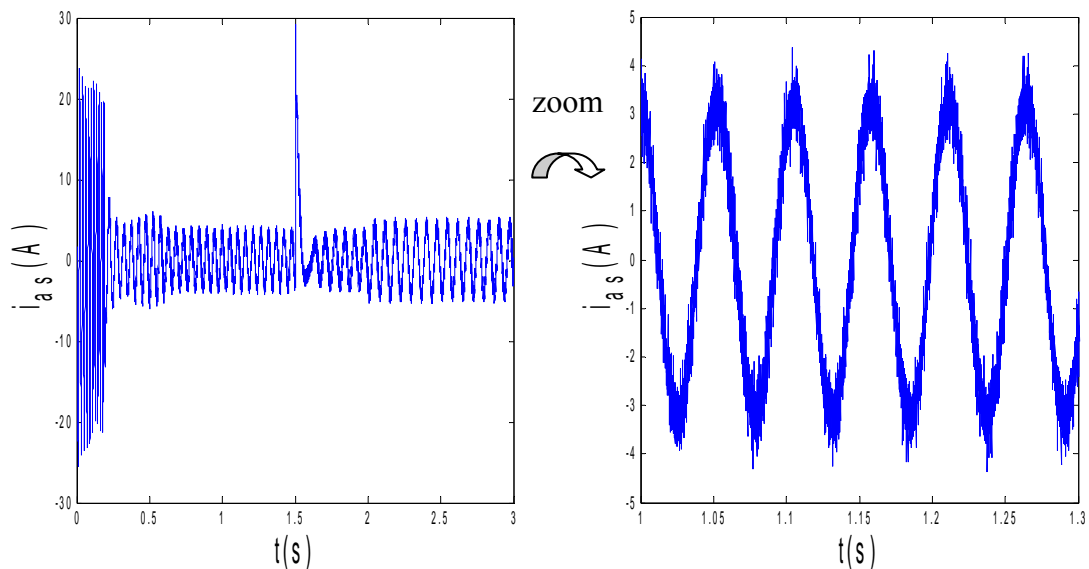


Figure IV.21 : Courant de phase statorique (variation de la charge)

IV.5 Conclusion

La méthode du flux orienté appliquée au modèle multi-enroulements de la machine asynchrone à cage d'écureuil moyennant un réglage classique, nous a permis de simuler le système, avec ou sans défauts rotoriques.

Les résultats obtenus montrent l'influence des ruptures de barres sur le couple électromagnétique, la vitesse de rotation et le courant statorique. Cela se traduit par des ondulations et déformations des allures.

Il faut signaler que le régulateur P.I ne permet pas en tout cas de maîtriser le régime transitoire. En outre, la faiblesse de la commande vectorielle, se traduit par l'apparition d'une pointe de courant très gênante pour le bon fonctionnement de la machine. Ce sont les raisons pour lesquelles nous consacrons un chapitre à l'application d'un régulateur flou.

On s'intéresse dans ce qui suit à l'estimation des états de la machine asynchrone par le filtre de Kalman étendu, afin de détecter les défauts rotoriques.