

IV.1 Introduction

De nos jours, les machines asynchrones sont présentes dans la plupart des applications industrielles pour lesquelles la sûreté et la disponibilité du système est primordiale. La traction électrique ferroviaire constitue un bon exemple : la machine est commandée et fonctionne à vitesse variable. Avec les contraintes de fonctionnement que cela suppose, les machines qui ne sont pas construites afin de fonctionner dans ces conditions s'usent rapidement. Il est donc important de pouvoir rechercher des signes de fatigue et de pannes en les surveillant en ligne [BAG 99].

La première publication internationale relative à cette commande appliquée aux machines à induction a été celle de [Blaschke] en 1971. Le principe de cette commande consiste à orienter le flux rotorique vers une direction déterminée [BAG 99] [EDO 00].

Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation ainsi que la régulation adoptées en vue de la commande vectorielle de la machine. Nous considérons ensuite le cas où un défaut surviendrait à la machine. Nous verrons alors l'effet de rupture des barres sur les consignes de commande [ABE 02].

IV.2 Commande vectoriel classique

La commande vectorielle est la plus ancienne méthode utilisée pour le contrôle de la machine asynchrone. La simplicité de mise en œuvre de cette méthode la fait préférer aux systèmes ne nécessitant pas de fonctionnement à très basses vitesses et fort couple ou exigeant des performances élevées.

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines asynchrones est d'améliorer leur comportement dynamique [BAG 99] [ABE 02].

IV.2.1 Modèle de la machine asynchrone en vue de la commande

Nous présentons le modèle de la machine asynchrone qui permet de simuler son fonctionnement en régime transitoire ainsi qu'en régime permanent. Nous verrons par la suite d'autres variantes de contrôle vectoriel, ainsi qu'un modèle qui permet de tenir compte des défaillances au rotor (rupture de barres) [BUC 01] [ABE 02] [BAG 02].

Il apparaît clairement que les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations.

Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (4-1)$$

Dans le repère de Park, les flux de la machine sont :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_{sc} \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_{sc} \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = M \cdot I_{ds} + L_{rc} \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qr} = M \cdot I_{qs} + L_{rc} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (4-2)$$

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

$$P_m = \frac{3}{2} (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) \quad (4-3)$$

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

Or la puissance mécanique est aussi égale à $C_e \cdot \Omega$. On en tire l'expression du couple :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (4-4)$$

Diverses manipulations de l'équation (4-4), procédant d'un choix d'élimination de certaines variables des équations des flux (4-2), conduisent à l'établissement d'autres expressions du couple qui seront des points de départ dans la recherche d'une stratégie de sa commande.

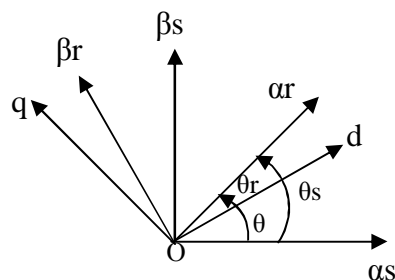


Figure IV.1 : Position du système d'axes (d, q)

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes d, q qui dépendent des objectifs de l'application :

- axes tournant à la vitesse du rotor ($\theta_r=0$) : étude des grandeurs statoriques,
- axes liés au stator ($\theta_s=0$) : étude des grandeurs rotoriques,
- axes liés au champ tournant : étude de la commande.

C'est cette dernière solution qui fait correspondre aux grandeurs continues des grandeurs sinusoïdales du régime permanent. La conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du repère par rapport aux axes des flux.

Dans un référentiel lié au champ tournant, on écrit :

$\omega_s = \dot{\theta}_s$. Nous appelons ω_s la pulsation statorique, bien que le régime puisse être quelconque (transitoire non sinusoïdal).

De même, nous notons :

$\omega_r = \dot{\theta}_r$: la pulsation rotorique,

$\omega = \omega_s - \omega_r = \dot{\theta} = p.\Omega$: la pulsation mécanique.

Les équations de la machine s'écrivent alors dans ce référentiel comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (4-5)$$

IV.2.2 Commande vectorielle à flux rotorique orienté

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple. Le repère de référence (d, q) est lié au flux rotorique de sorte que le vecteur flux rotorique soit selon l'axe d. Les deux composantes du courant statorique I_{ds} et I_{qs} vont être les variables d'entrée d'une commande découplée du flux et du couple [BAG 99] [CAN 00.2] [ABE 02].

Les équations de Park. (4-5), munies de la contrainte $\Phi_{qr}=0$, débouchent donc sur les propriétés enchaînées de la manière suivante :

- l'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur flux rotorique tel que $\Phi_{dr} = \Phi_r$,
- la composante I_{dr} du courant rotorique est toujours nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

En effet, on a :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \Phi_r = \text{cste} \text{ et } \Phi_{qr} = 0 \\ V_{dr} = 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \end{cases} \Rightarrow R_r \cdot I_{dr} = 0 \Rightarrow I_{dr} = 0 \text{ puisque } R_r \neq 0$$

- l'évolution du couple suit celle de I_{qr} qui peut alors être contrôlé par I_{qs} . En effet, on a :

$$\Phi_{qr} = M \cdot I_{qs} + L_{rc} \cdot I_{qr} = 0 \Rightarrow I_{qr} = -\frac{M}{L_{rc}} I_{qs}$$

Ceci conduit à l'expression du couple suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r I_{qs} \quad (4-6)$$

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée car elle élimine l'influence des réactances de fuites rotoriques et statoriques et donnent de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer.

Les équations des machines dans un référentiel lié au champ tournant, deviennent

[EDO 00] [ABE 02] :

$$\Phi_r = \Phi_{dr}$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \sigma \cdot L_{sc} \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_{rc}} \frac{d\Phi_r}{dt} - \omega_s \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \sigma \cdot L_{sc} \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r + \omega_s \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (4-7)$$

$$\Phi_r + T_r \frac{d\Phi_r}{dt} = M \cdot I_{ds}$$

Après passage par une transformation de Laplace nous obtenons :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= (R_s + P \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{ds} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} \\ V_{qs} &= (R_s + P \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r + \omega_s \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{ds} \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\Phi_r = \frac{M}{1 + P T_r} I_{ds}$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r \Phi_r} I_{qs}$$

Il existe des méthodes de commande vectorielle directe et indirecte :

Dans la commande indirecte, l'angle de Park θ_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 ω_r . En ce qui concerne la commande directe, l'angle de Park est calculé directement à l'aide des grandeurs mesurées ou estimées.

La commande vectorielle est dite à boucle ouverte s'il n'y a pas de régulation du flux. Celui-ci est imposé dans ce cas par I_{ds} . De plus la pulsation statorique peut uniquement être estimée par la relation (4-9). 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 .

IV.2.2.1 Commande vectorielle indirecte

Le principe de la méthode du flux orienté consiste à maintenir le flux dans une direction bien définie et cela quel que soit le régime dynamique.

Dans ce type de commande, l'angle θ_s , utilisé pour la transformation directe et inverse, est calculé à partir de la formule suivante [BAG 99] [ABE 02] :

$$\theta_s = \int \left(p \cdot \Omega + \frac{I_{qs}^*}{T_r I_{ds}^*} \right) dt \quad \text{ou} \quad I_{ds}^* = \frac{\Phi_r^*}{M} \tag{4-9}$$

Le schéma complet du régulateur de vitesse est donné sur la figure suivante :

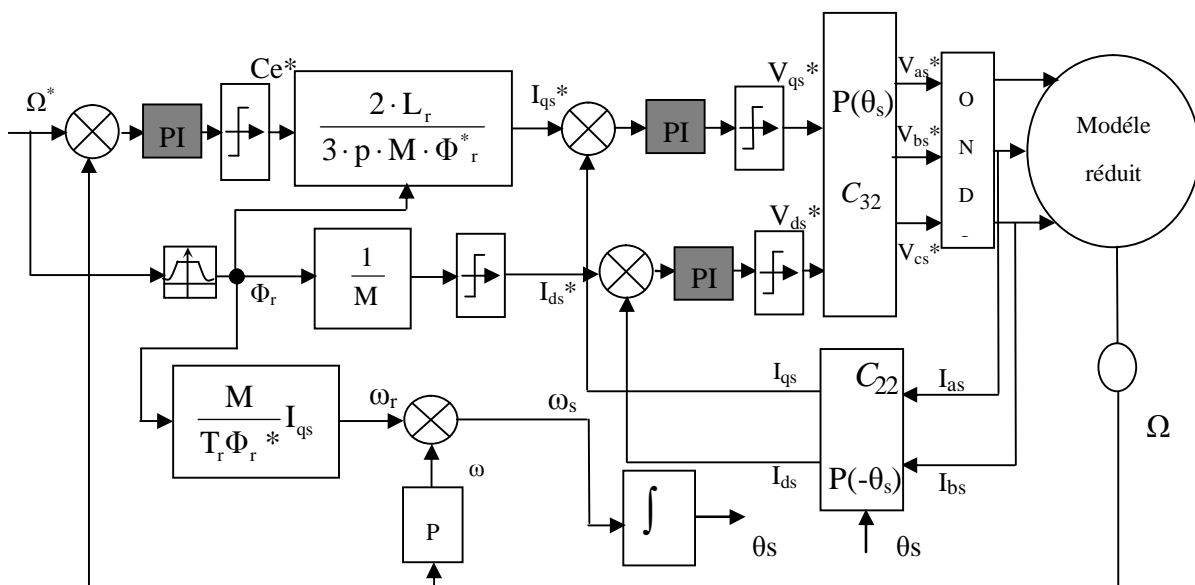


Figure IV.2 : Régulation de vitesse par la commande vectorielle indirecte

* : référence

Les principaux constituants dans ce type de commande sont la boucle de régulation de vitesse, celles des courants I_{ds} , I_{qs} , le bloc de calcul de θ_s et les transformations directe et inverse. La vitesse est régulée à travers la boucle externe du bloc. La sortie de son régulateur est le couple électromagnétique de référence C_e^* . Les composantes I_{ds}^* et I_{qs}^* sont calculées. I_{qs}^* est comparé à la valeur I_{qs} issue de la mesure des courants réels. L'erreur entre ces valeurs sollicite l'entrée du régulateur dont la sortie est la tension de référence V_{qs}^* . En parallèle, les sorties des régulateurs V_{ds}^* et V_{qs}^* sont alors transformées en grandeurs statoriques à l'aide d'une rotation d'angle θ_s . Ce dernier, qui représente l'orientation du repère lié au champ tournant, est donné par $\omega_s \left(\theta_s = \int \omega_s dt + \theta_0 \right)$. L'intégration de la pulsation statorique est obtenue par la relation :

$$\omega_s = \omega_r + p\Omega.$$

On peut alors calculer les composantes triphasées des tensions après transformation de Clarke. Les tensions sont alors reconstituées par un onduleur commandé par une *MLI*.

Les courants $I_{\alpha s}$ et $I_{\beta s}$ sont mesurés, puis transformés à l'aide des transformations inverses, ce qui donne I_{ds} et I_{qs} qu'on utilise pour la régulation des courants.

A- Régulation

La commande vectorielle, utilisée dans cette partie, est une commande indirecte par orientation du flux rotorique.

Par rapport au schéma introduit au paragraphe précédent (fig. IV.2), il est intéressant d'ajouter des termes de découplage afin de rendre les axes d et q complètement indépendants.

Ce découplage permet surtout d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer les coefficients des régulateurs.

B- Découplage

Les équations statoriques comprennent en effet des termes qui font intervenir des courants de l'autre axe. En supposant que le flux rotorique varie très lentement, les équations s'écrivent [BAG 99] [BUC 01] [ABE 02]:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= (R_s + P \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{ds} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} \cdot I_{qs} \\ V_{qs} &= (R_s + P \cdot \sigma \cdot L_{sc}) I_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r + \omega_s \cdot \sigma \cdot L_{sc} I_{ds} \end{aligned} \quad (4-10)$$

$$\Phi_r = \frac{M}{1 + PT_r} I_{ds}$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r \Phi_r} I_{qs}$$

Nous pouvons alors représenter la machine par le schéma suivant :

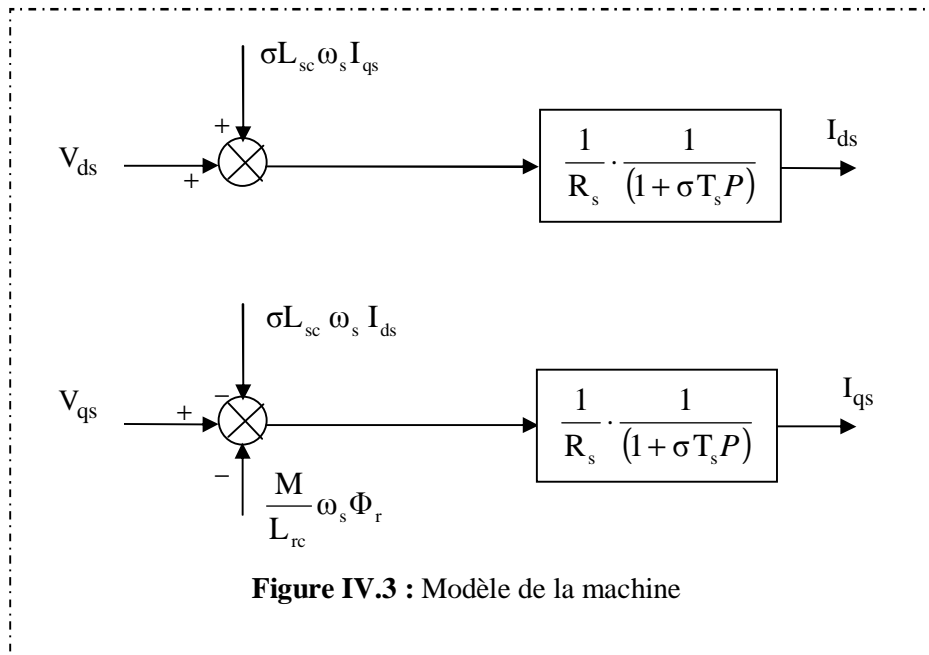


Figure IV.3 : Modèle de la machine

Les termes $\omega_s \sigma L_{sc} I_{qs}$, $\omega_s \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r$ et $\omega_s \sigma L_{sc} I_{ds}$ correspondent aux termes de découplage entre les axes d, q.

Pour ne pas compliquer cette étude, nous considérons le cas de la décomposition de la tension (schéma IV.4)

Dans les premières équations, on sépare la tension selon l'axe d en deux parties :

$$V_{ds} = V'_{ds} + e_d$$

avec $e_d = -\sigma \omega_s L_{sc} I_{qs}$ $\frac{I_{ds}}{V'_{ds}} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \sigma T_s P}$

La perturbation e_d est compensée par un terme identique de manière à ce que la fonction de transfert équivalente soit celle indiquée ci dessus.

On peut considérer de manière analogue la deuxième expression et définir :

$$V_{qs} = V'_{qs} + e_q$$

avec $V'_{qs} = (R_s + P\sigma L_{sc})I_{qs}$ et $e_q = \omega_s \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r + \omega_s \sigma L_{sc} I_{ds}$

De la même façon, le terme e_q est ajouté de manière à obtenir la fonction de transfert suivante :

$$\frac{I_{qs}}{V'_{qs}} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \sigma T_s P}$$

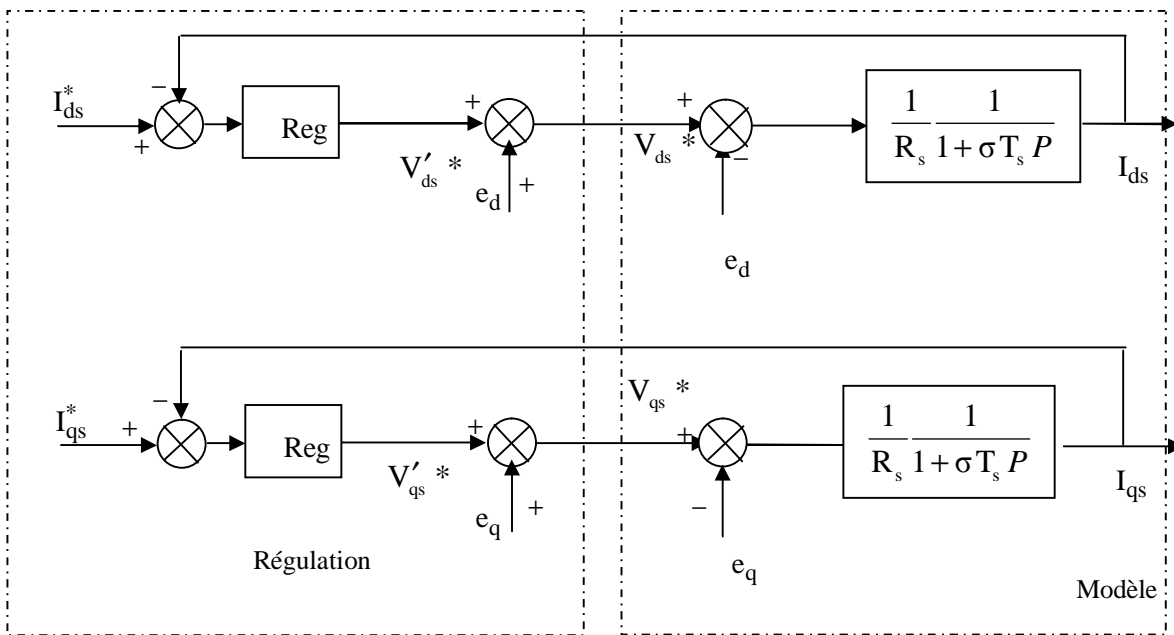


Figure IV.4 : Découplage par addition des termes de compensation

On obtient alors le schéma bloc simple et identique pour les deux axes :

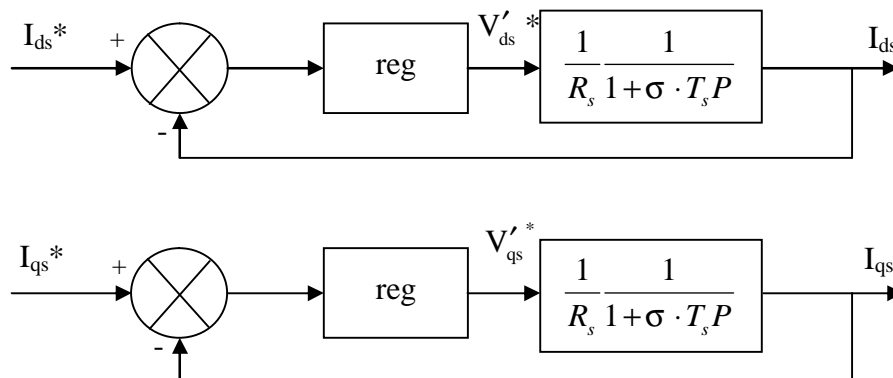


Figure IV.5 : Commande découplée

C- Régulation des courants

Les structures des régulations sont choisies pour répondre à plusieurs nécessités. Il convient d'abord de réguler la machine de façon à imposer à la charge la vitesse.

Pour calculer les paramètres des régulateurs, on adopte des modèles linéaires continus.

Les méthodes classiques de l'automatique sont utilisables. Ces méthodes, outre l'avantage d'être simples, elles sont faciles à mettre oeuvre et à implanter.

Nous utilisons les paramètres de la machine (Annexe 1) pour le calcul des coefficients des régulateurs [BAG 99] [CAN00.1] [BUC 01].

Le schéma bloc devient :

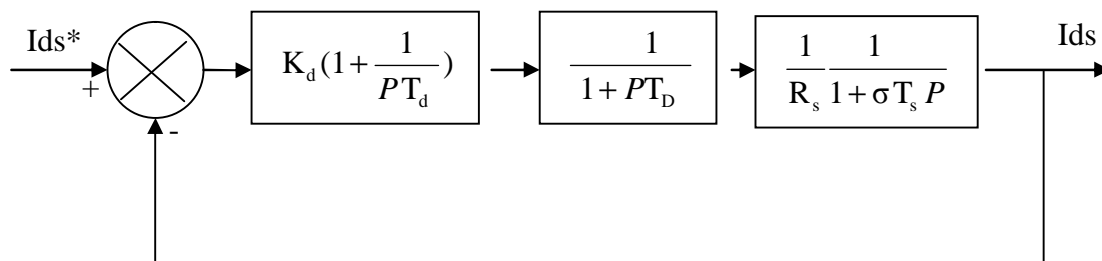


Figure IV.6 : Boucle de régulation du courant I_{ds}

On trouve la même boucle de régulation pour le courant I_{qs} . La fonction de transfert en boucle ouverte (b.o) est :

$$G_{bo}(P) = K_d \left(1 + \frac{1}{PT_d}\right) \cdot \frac{1}{1 + PT_D} \cdot \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + \sigma T_s P} \quad (4-11)$$

En développant $G_{bo}(P)$, il vient:

$$G_{bo}(P) = \frac{K_d}{R_s} \frac{1}{P\sigma T_s(1 + T_D P)} \quad \text{avec} \quad T_d = \sigma T_s \quad (4-12)$$

La fonction de transfert en boucle fermée (b.f) est :

$$G_{bf}(P) = \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo}} = \frac{K_d}{R_s \sigma T_s T_D} \frac{1}{P^2 + 2\frac{1}{2T_D}P + \frac{K_d}{R_s \sigma T_s T_D}} \quad (4-13)$$

La fonction de transfert G_{bf} est de la forme standard :

$$\frac{\omega_0^2}{P^2 + 2P\xi\omega_0 + \omega_0^2}$$

avec:

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_s \sigma T_s}{K_d T_D}} \quad (4-14)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_d}{R_s \sigma T_s T_D}}$$

Pour un amortissement $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$ On a :

$$K_d = \frac{R_s \sigma T_s}{2T_D} \quad (4-15)$$

$$T_d = \frac{\sigma L_{sc}}{R_s}$$

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

D- Régulation de vitesse

Parmi les techniques existantes, la correction proportionnelle et intégrale est largement utilisée pour la commande vectorielle des machines asynchrones, en raison de ses bonnes performances : simplicité et facilité d'implémentation. 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.7), est réduit au problème de commande du système représenté sur la figure (IV.2).

Le «défluxage» sera utilisé pour la commande de flux. Ce dernier est maintenu constant et égal à sa valeur nominale pour des vitesses inférieures à la valeur de la vitesse nominale de la machine. Il décroîtra pour des vitesses excédant cette valeur.

Le schéma de régulation en cascade retenu nécessite, pour un bon fonctionnement, que la boucle interne soit plus rapide que la boucle externe [BAG 99] [BUC 01].

Il est clair que le réglage du couple se fera par l'action sur le courant I_{qs} plutôt que par 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}).

Le schéma bloc de régulation de la vitesse est le suivant :

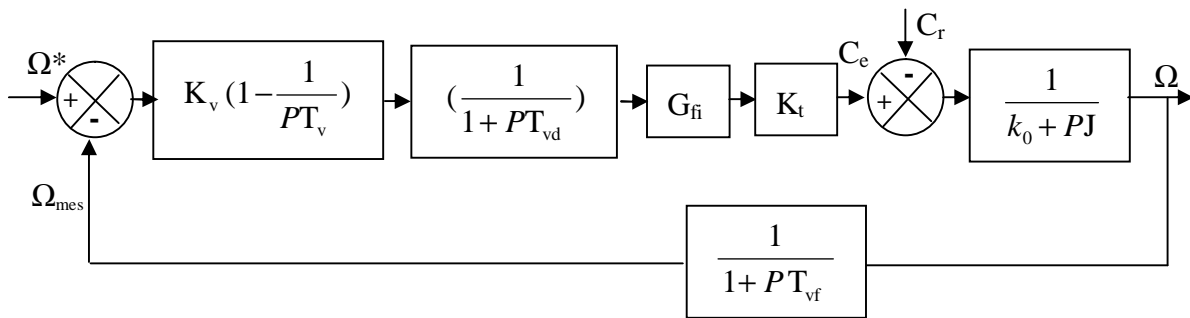


Figure IV.7 : boucle de régulation PI de la vitesse

avec :

T_{vd} : délais dans la boucle de vitesse.

K_v, T_v : gain et constant de temps du régulateurs PI.

T_{vf} : délai introduit par le filtrage de la vitesse.

$$k_t = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_{rc}} \Phi_r : \text{Constante du couple électromagnétique}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte par rapport à la consigne est :

$$G_{bo} = K_v \frac{1 + P.T_v}{P.T_v} \frac{1}{1 + P.T_{vd}} \frac{\omega^2}{P^2 + 2.P\xi\omega_0 + \omega_0^2} \frac{1}{1 + P.T_{vf}} \frac{K_t}{k_0 + P.J} \quad (4-16)$$

et en boucle fermée :

$$G_{bf} = (1 + P.T_{vf}) \frac{G_{bo}}{1 + G_{bo}} \quad (4-17)$$

IV.2.2.2 Commande vectorielle directe

La méthode directe a été appliquée pour la première fois par "BLASCHKE". Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase. Celle-ci doit être vérifiée quelque soit le régime transitoire considéré. Il faut donc procéder à une série de mesures disponibles au sein du processus. Le module du flux rotorique et le couple électromagnétique seront contrôlés par contre-réaction. La contre réaction du flux se fait à partir d'un capteur de flux rotorique qui est implanté directement dans la machine ou d'un estimateur de l'amplitude du flux à l'aide des mesures des tensions v_{as}, v_{bs} , des courants i_{as}, i_{bs} et leur combinaison grâce aux sommateurs. La figure (IV.8) montre le schéma de principe de la commande directe par orientation du flux rotorique. Les régulateurs PI du flux, du couple électromagnétique et de la vitesse sont calculés dans l'annexe2.

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

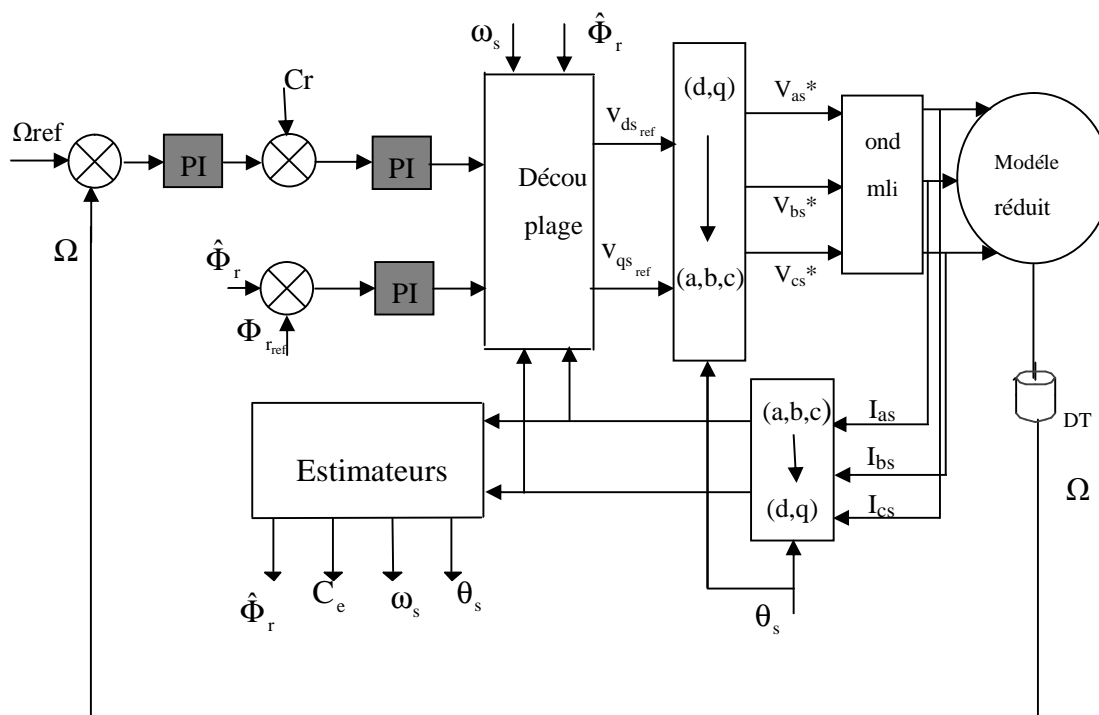


Figure IV.8 : Bloc de régulation de vitesse par la méthode directe

IV.3 Résultats de simulation

IV.3.1 Commande indirecte sans onduleur

La commande vectorielle devenant courante, il est intéressant de considérer le cas où un défaut surviendrait dans la machine. Nous nous proposons dans cette partie de voir l'influence des régulateurs sur la marche d'une machine asynchrone en commande vectorielle lorsqu'il se produit des ruptures de barres.

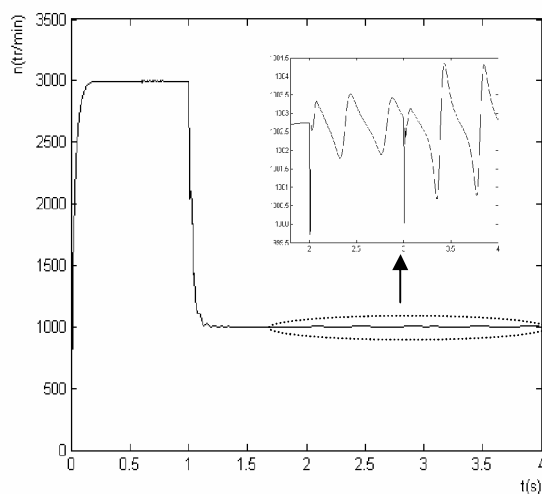
IV.3.1.1 Cas d'une machine avec défaut

Les régulateurs sont déjà calculés "annexe1". Nous présentons la simulation du fonctionnement de la machine commandée.

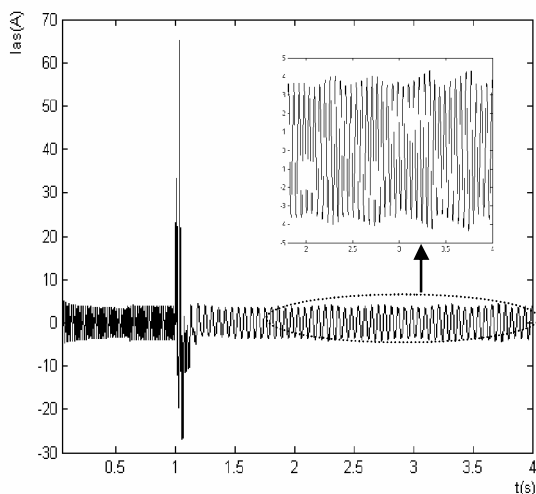
A- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée variation de la vitesse 1000tr/min à $t=1s$. A l'instant $t=2s$ une première barre est rompue. La barre 2 est rompue à l'instant $t=3s$.



a: vitesse de rotation



b: Courant statorique

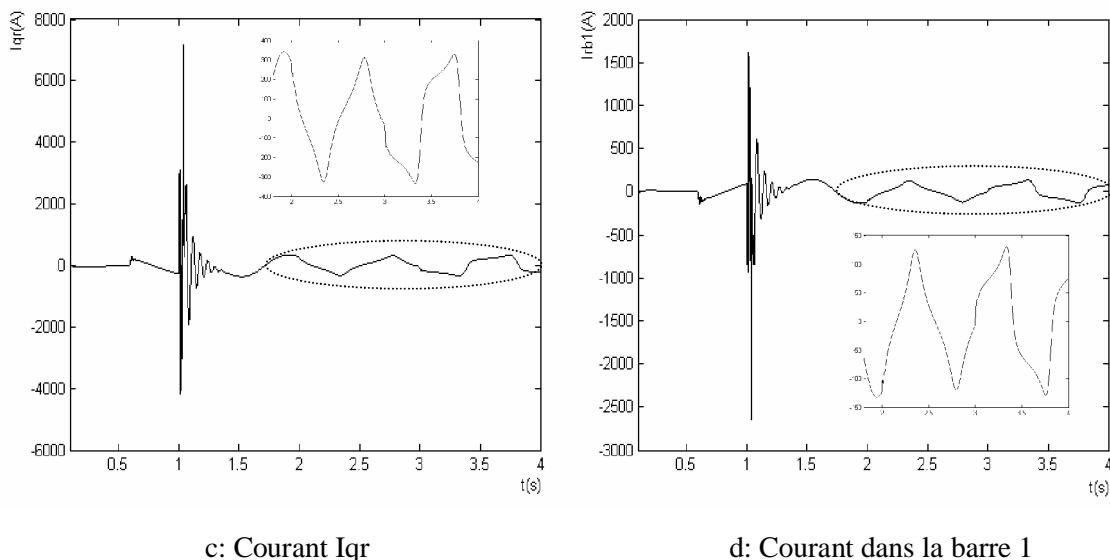


Figure IV.9 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5\text{N.m}$)

avec ruptures successives des barres 1 puis 2 à partir de $t=2\text{s}$

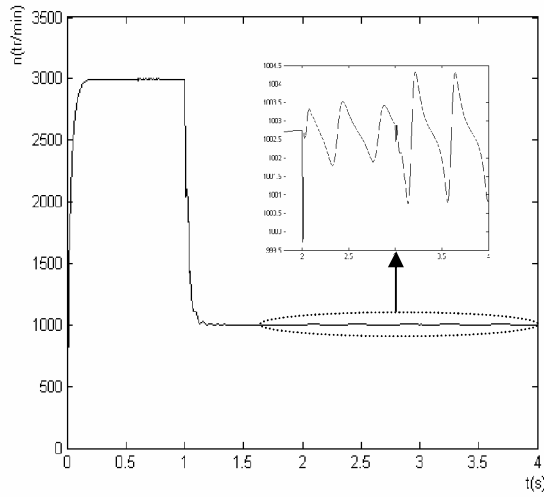
Interprétation

Un échelon de couple de 3.5N.m est appliqué à $t=0.6\text{s}$. Nous observons une chute momentanée de vitesse. 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 adjacente cède à $t=3\text{s}$. La vitesse reste toujours peu perturbée par ce défaut. Pour le courant I_{qr} on voit bien une déformation lors de la rupture de la barre. Pour le couple électromagnétique, son amplitude augmente à l'instant où on applique une première rupture de barre.

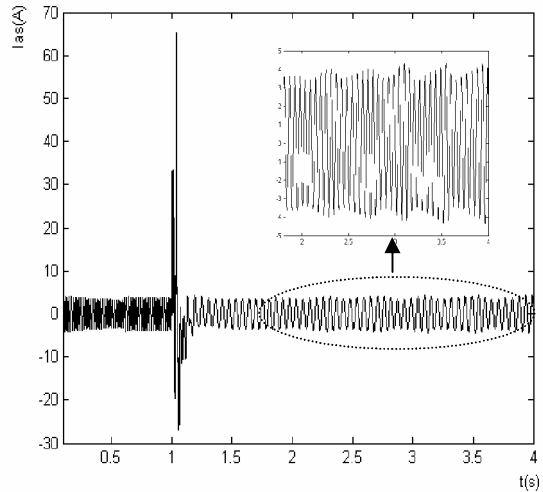
B- Cas d'une cassure de deux barres espacées

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

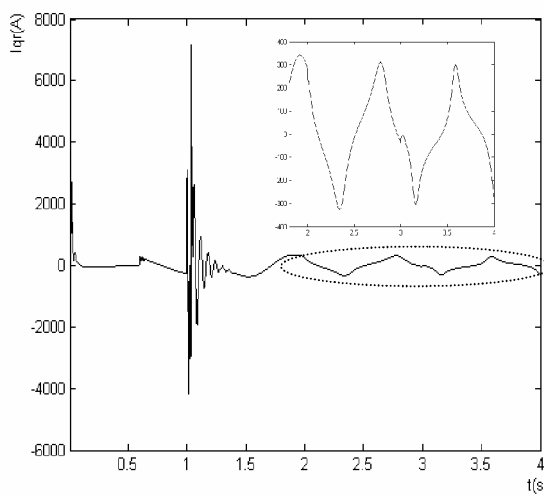
Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée, variation de vitesse a $t=1s$. A l'instant $t=2s$ une première barre est rompue. La barre 7 est rompue à l'instant $t=3s$.



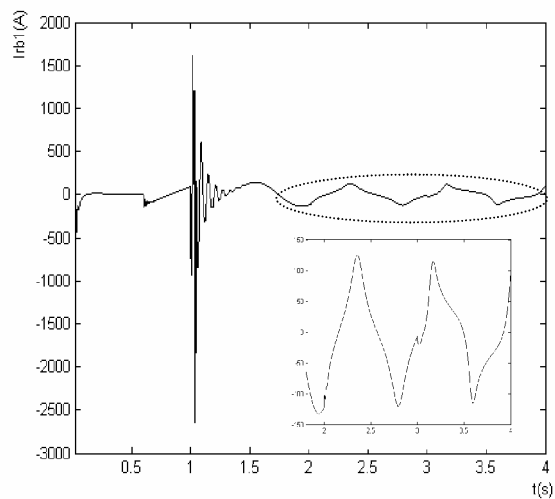
a: vitesse



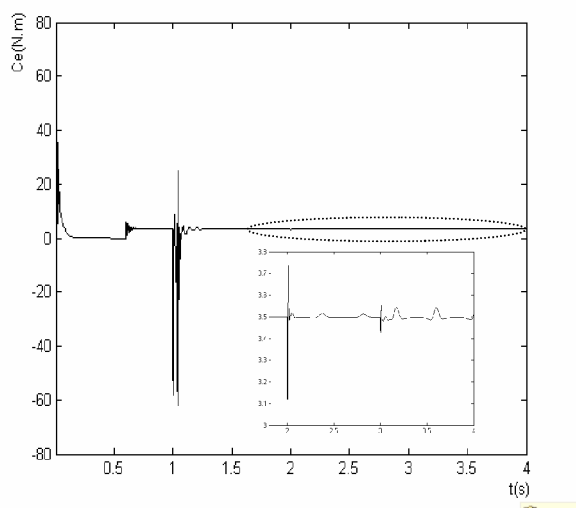
b: Courant statorique



c: Courant Iqr



d: Courant dans la barre 1



e: Couple électromagnétique

Figure IV.10 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5\text{N.m}$) avec ruptures successives des barres 1 à $t=2\text{s}$ et 7 à $t=3\text{s}$

A l'instant où on suppose une première rupture de barre, la vitesse oscille entre "1001 et 1004 (tr/min)". Le courant statorique est modulé en amplitude, le couple électromagnétique montre également, à travers sa courbe, des oscillations.

C- Cas d'une variation de la charge

La simulation est menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Après établissement du flux, une référence de vitesse de 1000tr/min est imposée à la machine à $t=1\text{s}$.

Pour $0.6\text{s} < t < 3\text{s}$, on applique un couple de charge de 3.5N.m ;

A l'instant $t=3\text{s}$, on applique un couple de charge $C_r=6\text{N.m}$.

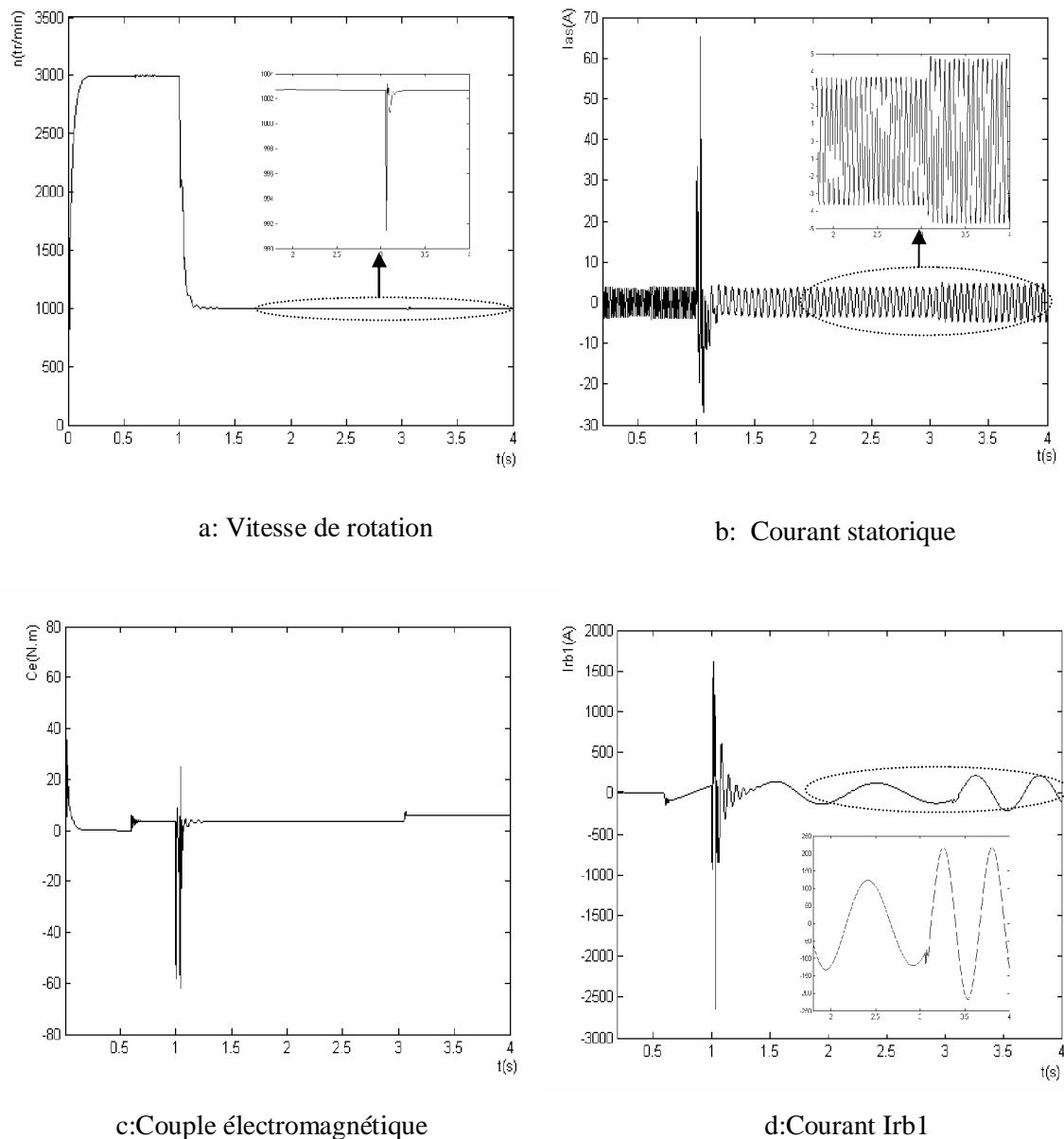


Figure IV.11 : Simulation avec modèle réduit : variation de la charge à t=3s

IV.3.2 Commande indirecte avec onduleur

IV.3.2.1 Machine avec défaut

A- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à t=0.6s une charge de 3.5N.m est appliquée. A l'instant t=2s une première barre est rompue. La barre 2 est rompue à l'instant t=3s.

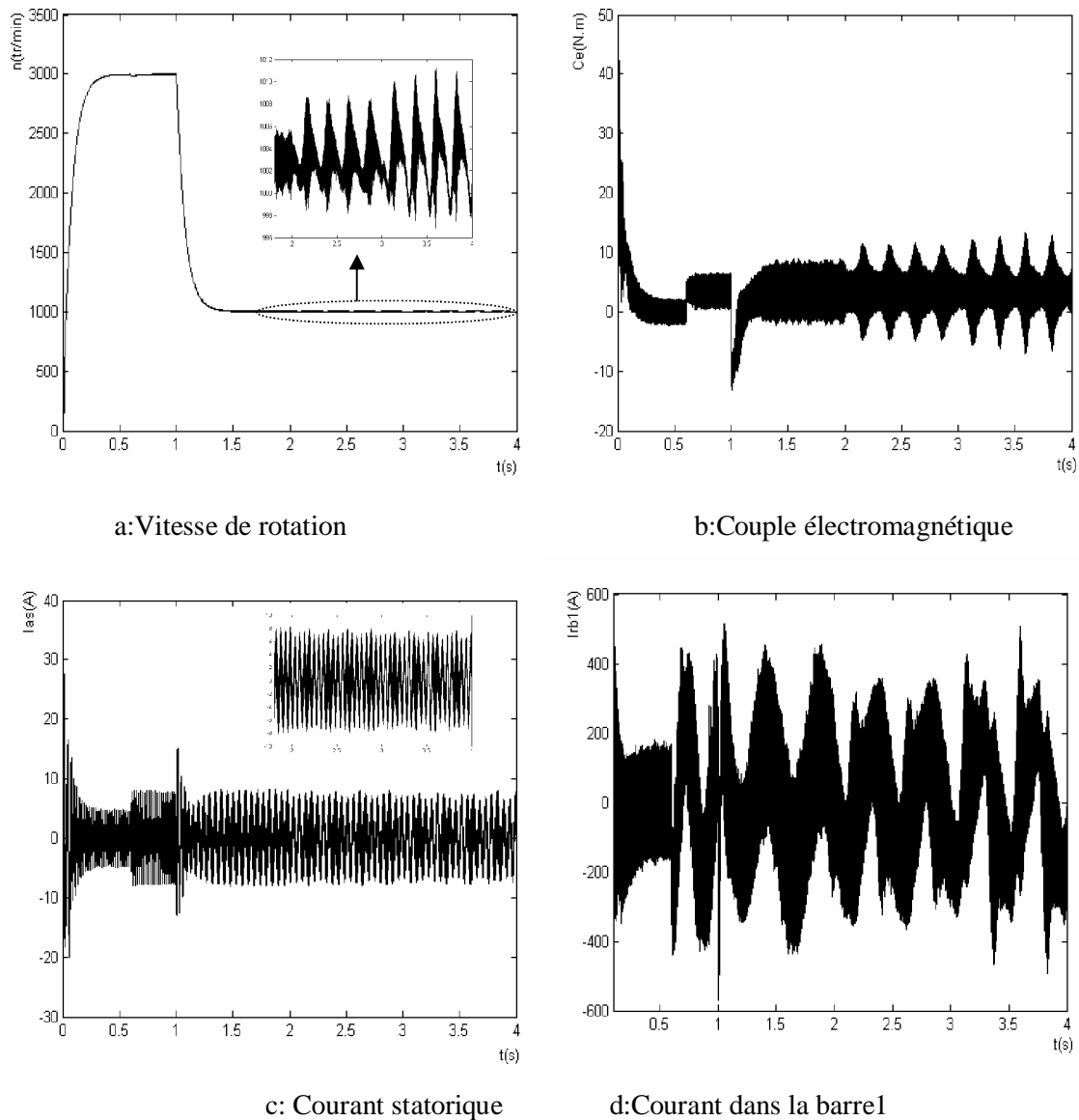


Figure IV.12 : Simulation avec le modèle réduit : machine en charge ($C_r=3.5\text{N.m}$)
alimentation par onduleur

B- Cas d'une cassure de deux barres espacées

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6\text{s}$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A l'instant $t=2\text{s}$ une première barre est rompue. La barre 7 est rompue à l'instant $t=3\text{s}$.

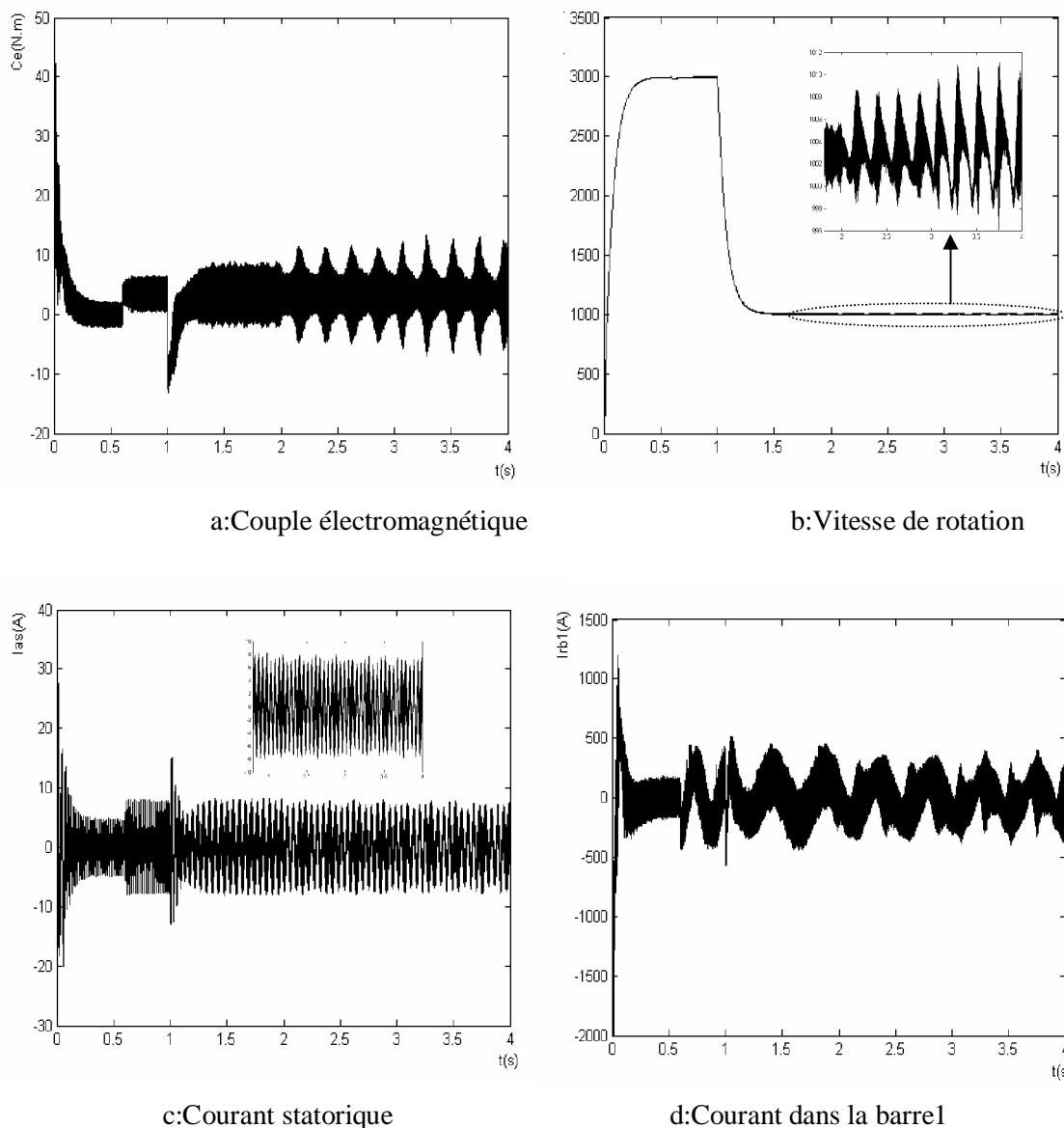


Figure IV.13 : Simulation avec le modèle réduit : avec ruptures successives des barres 1-2 à partir de $t=2$ s (alimentation par onduleur)

C- Cas d'une variation de la charge

La simulation est menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6$ s une charge de 3.5N.m est appliquée. A $t=1$ s la vitesse est égale à 1000tr/min. A l'instant $t=3$ s on applique une charge de 6N.m.

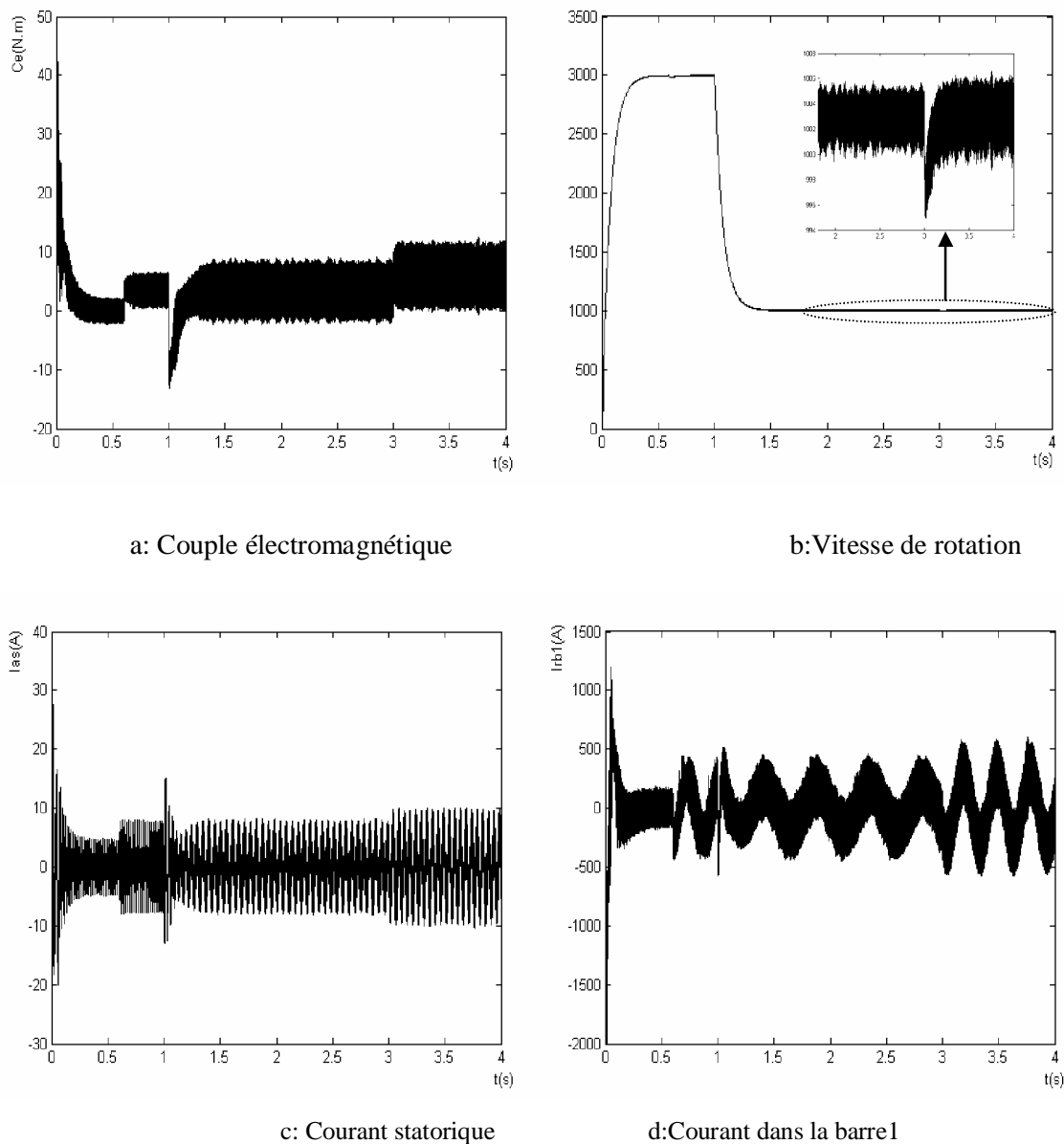


Figure IV.14 : Simulation avec modèle réduit : variation de la charge à $t=3s$

IV.3.3 Commande directe sans onduleur

IV.3.3.1 Cas d'une machine avec défaut

Dans la simulation suivante, la machine était initialement saine et chargée $Cr=3.5N.m$. Les régulateurs sont dans l'annexe2, nous présentons la simulation de la marche en commande.

A- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A l'instant $t=2s$ une première barre est rompue. La barre 2 est rompue à l'instant $t=3s$.

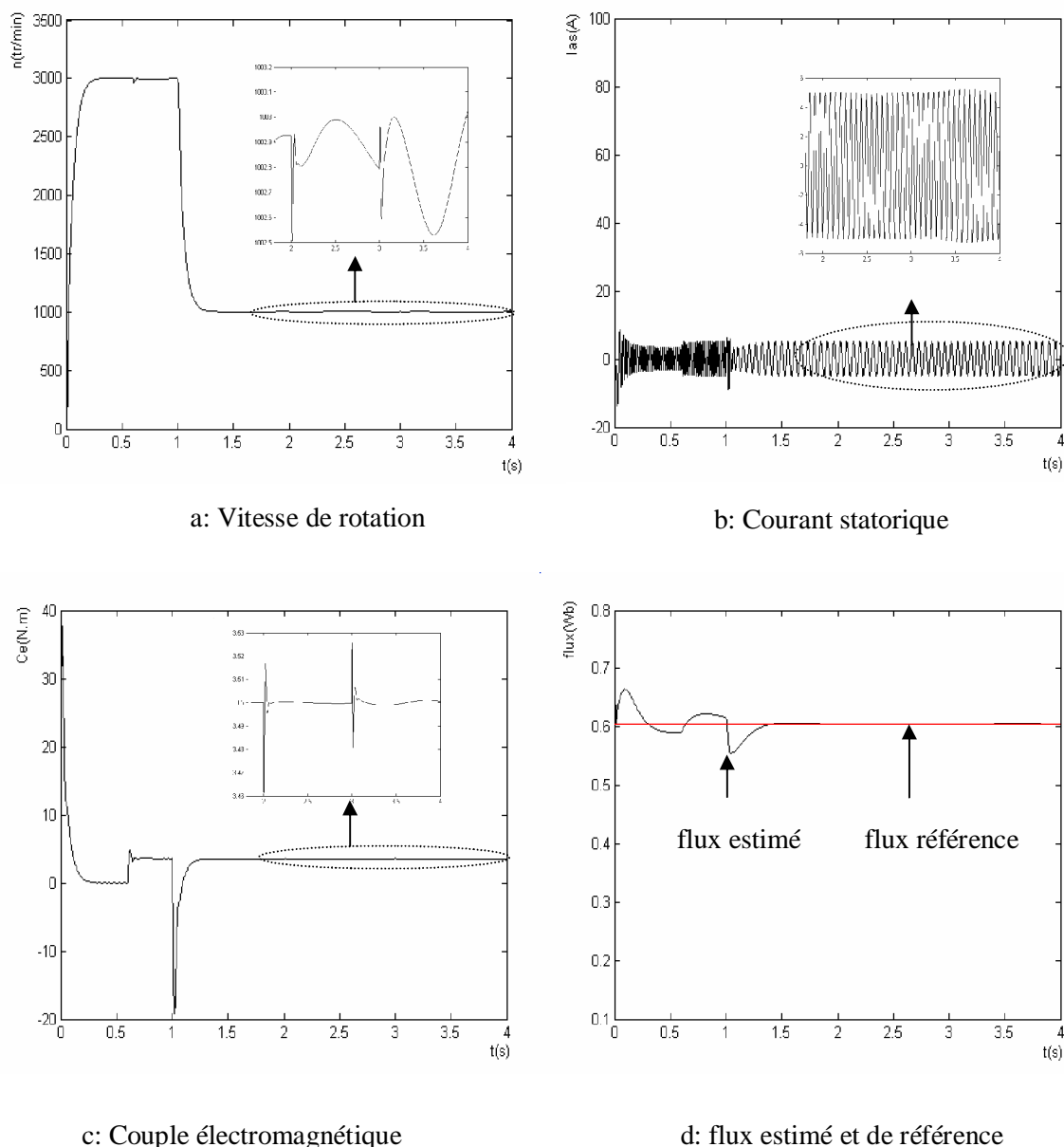


Figure IV.15 : Simulation avec modèle réduit : en charge (à $t=0.6s$), avec rupture des barres 1 (à $t=2s$) puis 2 (à $t=3s$) et diminution de vitesse à $t=1s$

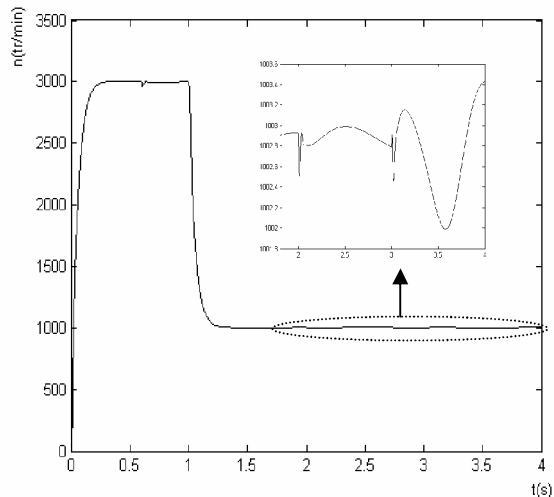
Les figures (IV.15) présentant la simulation de la marche en commande. Un échelon de couple de 3.5N.m est appliqué à $t=0.6s$. Nous observons une chute momentanée de vitesse (figure a). Le régime ainsi établi, nous procédons à la simulation d'une première rupture de barre par une augmentation de 11 fois sa résistance.

Pour le courant du stator I_{as} , à l'instant $t=2s$ on applique une cassure de barre N2. L'amplitude des oscillations du courant statorique devient importante, puis se stabilise à environ 4.8A. Quand on applique une deuxième rupture de barre, le courant prend une autre valeur de 5.4A à $t=3.5s$. A l'instant où on suppose une première rupture de barre, la vitesse de rotation oscille entre 1001 et 1004 tr/min.

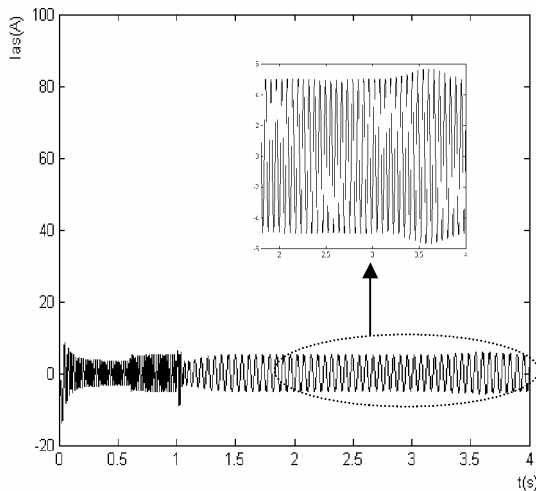
B- Cas d'une cassure de deux barres espacées

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

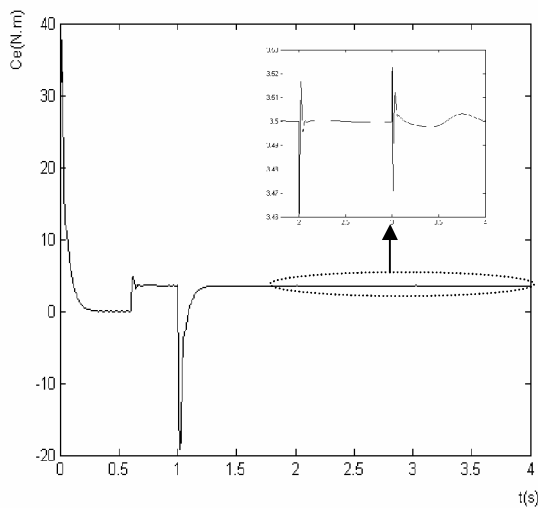
Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A l'instant $t=2s$ une première barre est rompue. La barre 7 est rompue à l'instant $t=3s$.



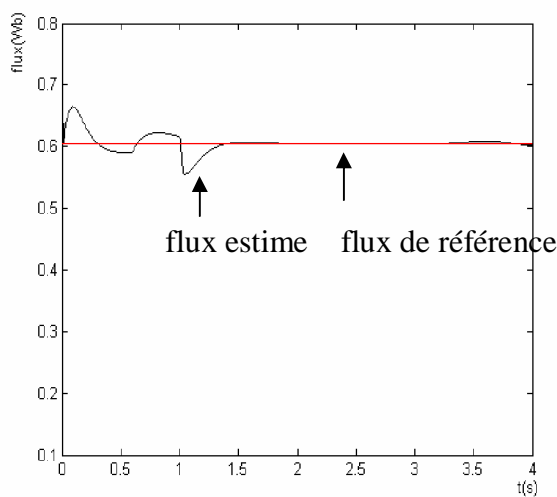
a: Vitesse de rotation



b: Courant statorique



c: Couple électromagnétique



d: flux estime et de référence

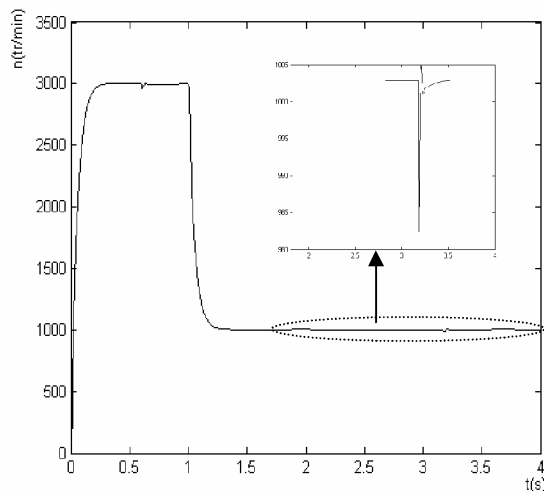
Figure IV.16 : Simulation de la machine : en charge, avec ruptures successives des barres 1 puis 7 à partir de $t=2s$

Dans ce cas, en applique une rupture des barres espacée, nous procédons à la simulation d'une première rupture de barre par une augmentation de 11 fois de sa résistance, après un régime transitoire très bref, pendant la phase de mise en vitesse le courant statorique prend la valeur 5.6A.

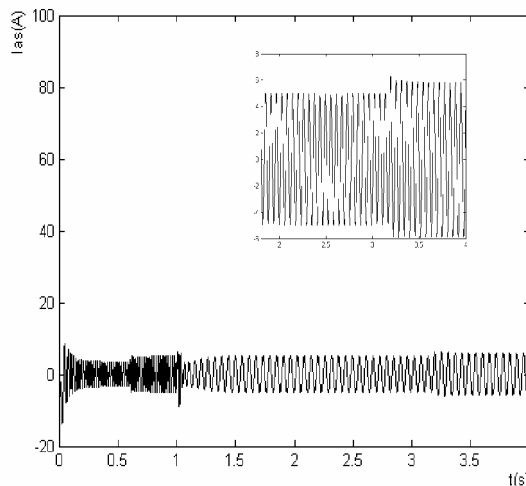
C- Cas d'une variation de la charge

La simulation est menée pendant une durée de 4s de la manière suivante :

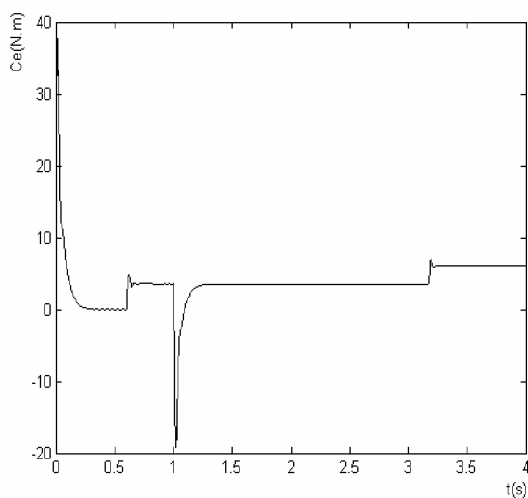
Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A $t=1s$ la vitesse est imposée égale à 1000tr/min. A l'instant $t=3s$ on applique une charge de 6N.m.



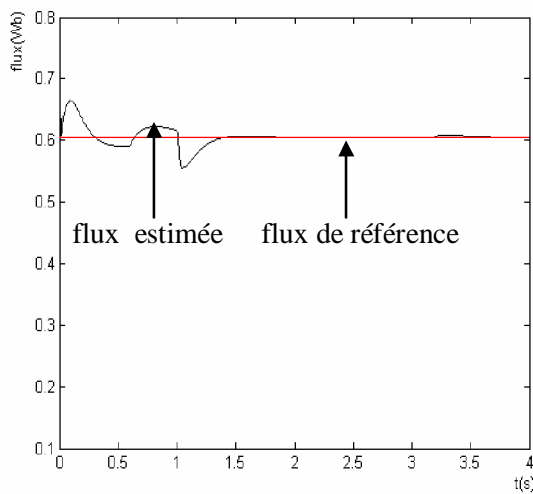
a : Vitesse de rotation



b: Courant statorique



c: Couple électromagnétique



d : flux estimée et de référence

Figure IV.17 : Simulation de la machine : en charge, avec une variation de charge (à $t=3s$ $C_r=6N.m$)

IV.3.4 Commande directe avec onduleur

IV.3.4.1 Cas d'une machine avec défaut

A- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes

Dans la simulation suivante, la machine était initialement saine et chargée $C_r=3.5\text{N.m}$. Les régulateurs sont calculés dans l'annexe2. Nous présentons la simulation de la marche en commande.

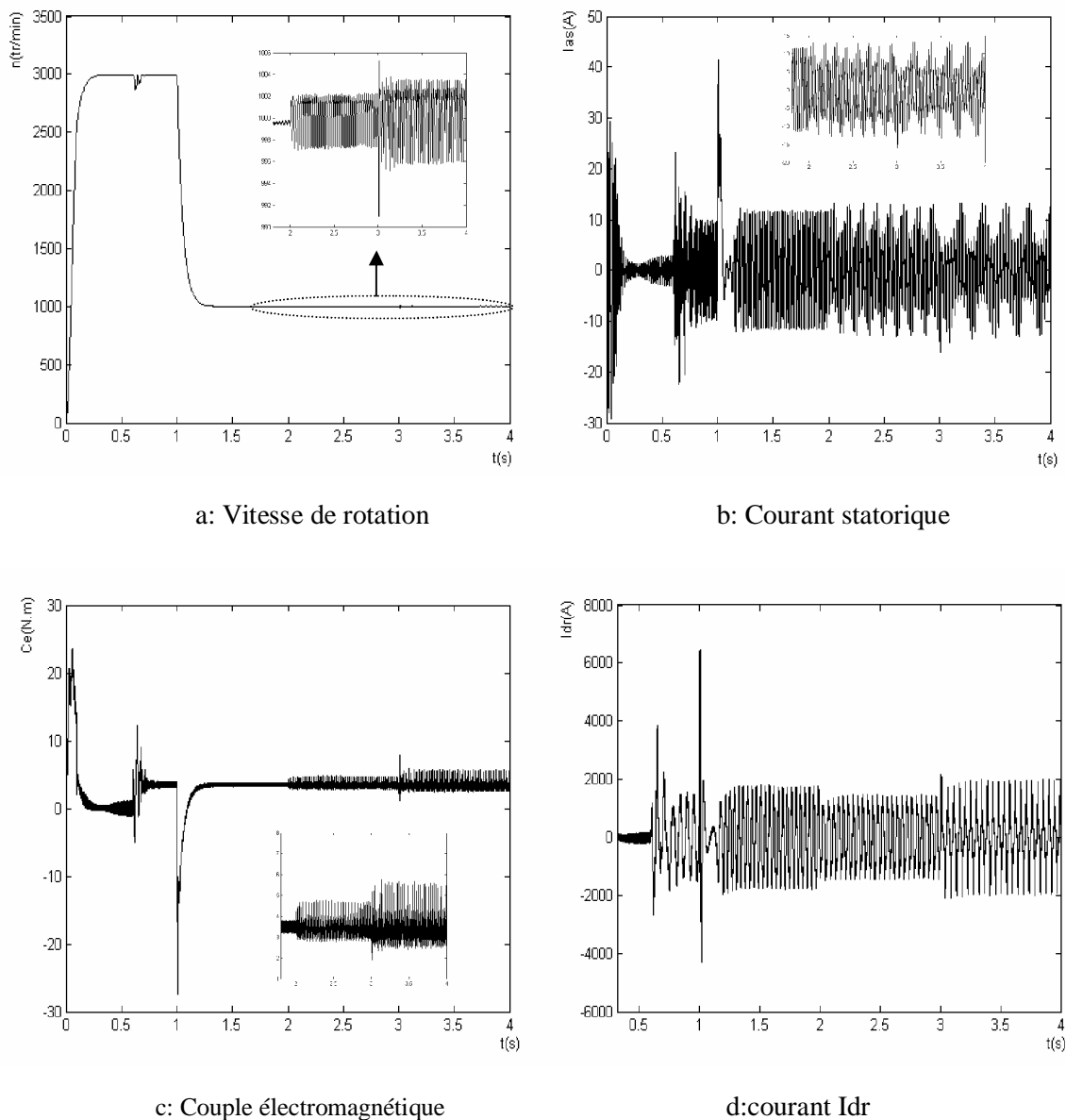


Figure IV.18 : Simulation de la machine : en charge, avec ruptures successives des barres 1 à $t=2\text{s}$ et barre 2 à $t=3\text{s}$

B- Cas d'une cassure de deux barres espacées

La simulation est, menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A l'instant $t=2s$ une première barre est rompue. La barre 7 est rompue à l'instant $t=3s$.

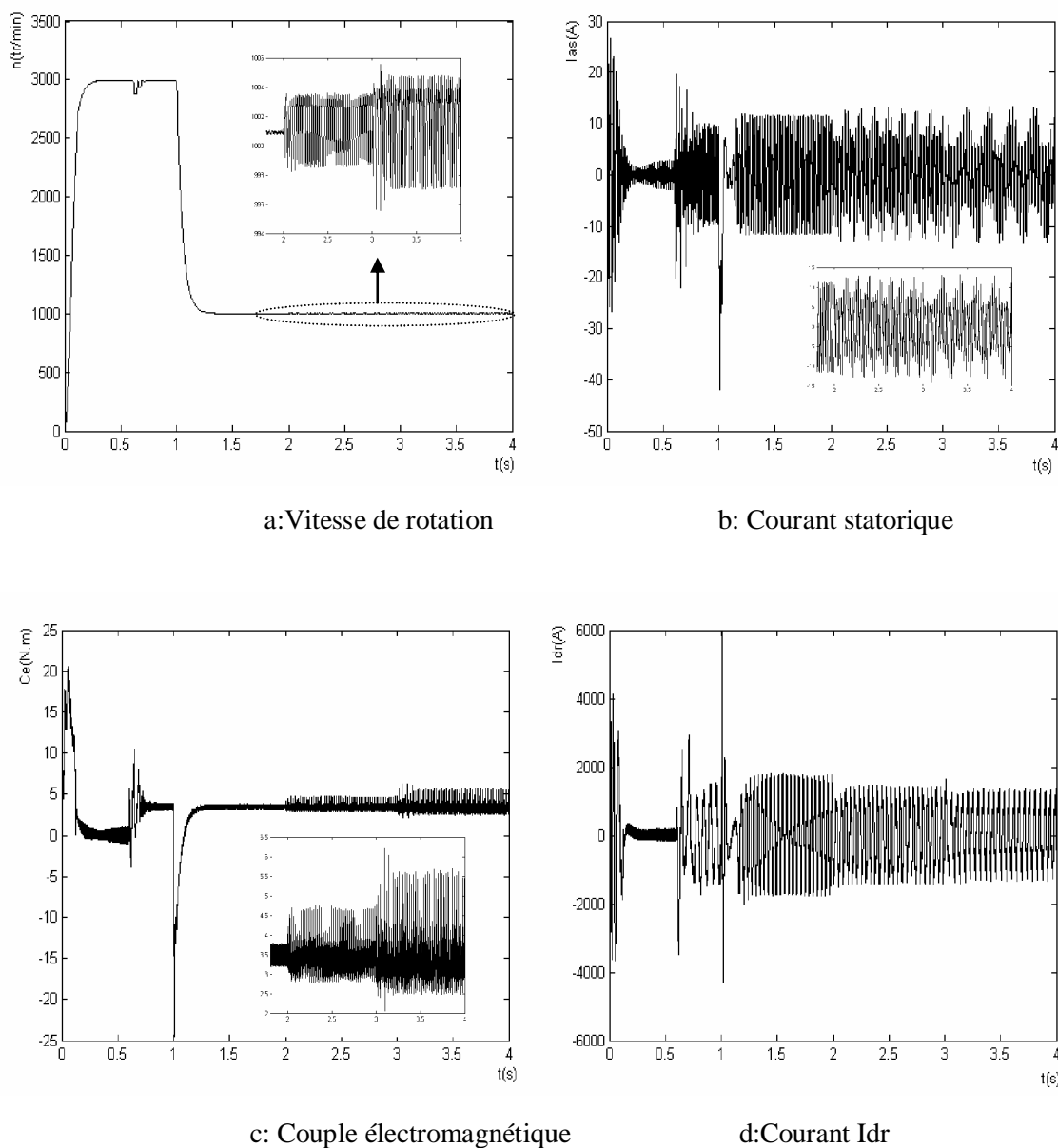
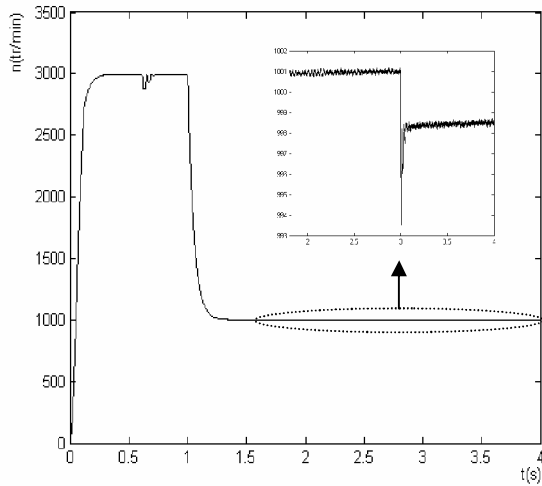


Figure IV.19 : Simulation de la machine : en charge, avec ruptures successives des barres 1 puis 7

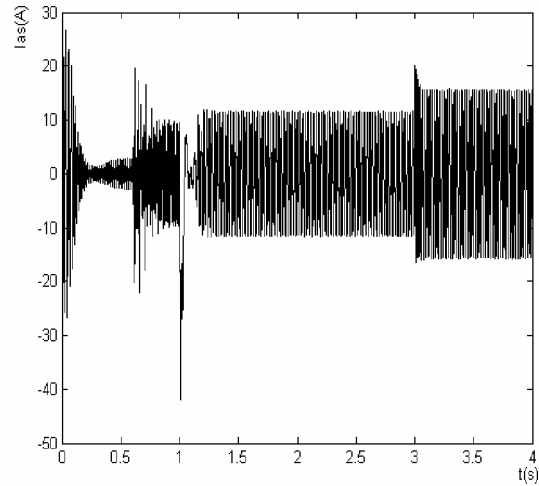
C- Cas d'une variation de charge

La simulation est menée sur une durée de 4s de la manière suivante :

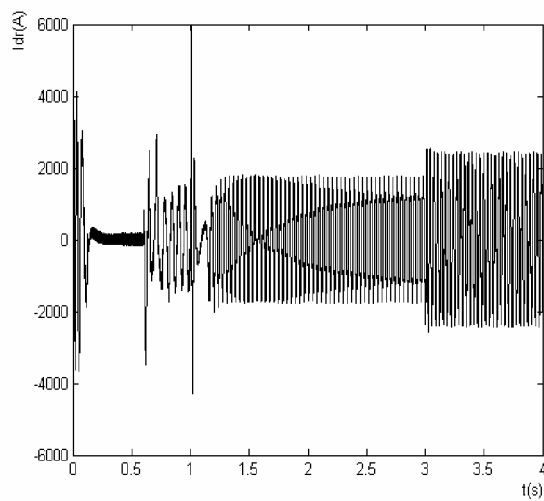
Nous avons considéré une vitesse de 3000tr/min à l'instant initial. Puis, à $t=0.6s$ une charge de 3.5N.m est appliquée. A $t=1s$ la vitesse est imposée égale à 1000tr/min. A l'instant $t=3s$ on applique une charge de 6N.m.



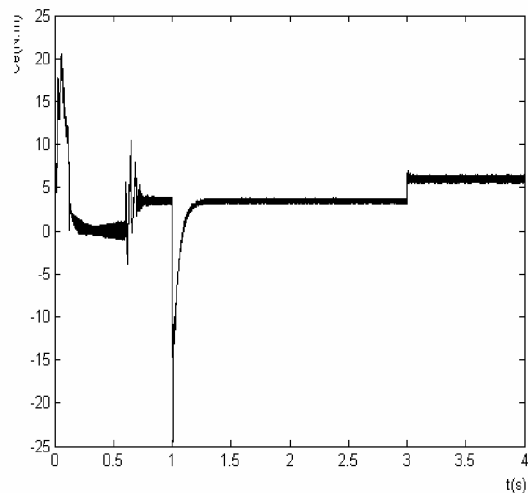
a: Vitesse de rotation



b: Courant Ia



c: Courant Idr



d: Couple électromagnétique

Figure IV.20 : Simulation de la machine : en charge, avec variation de la charge à $t=3s$

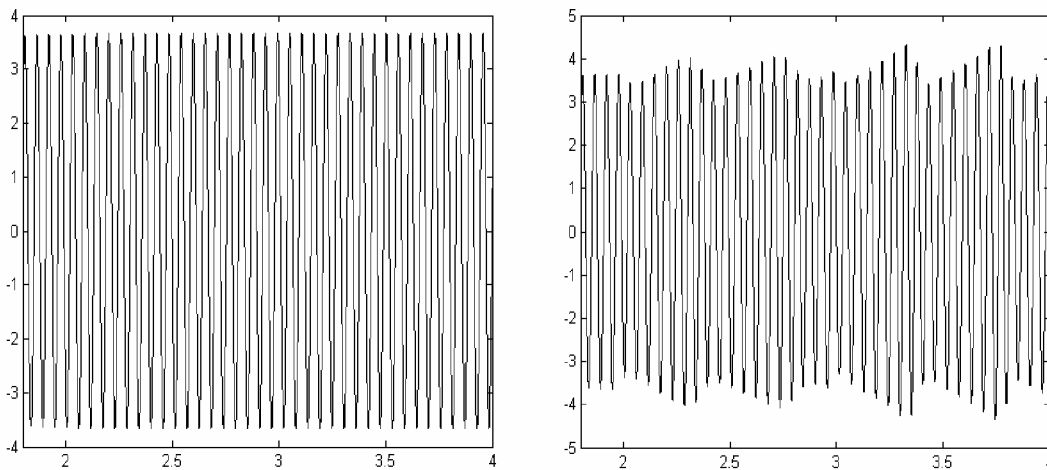
VI.4 L'analyse spectrale (transformation de Fourier)

Cette méthode a été appliquée sur différentes acquisitions de signaux en régimes transitoire. Le résultat a été négatif puisque la précision fréquentielle dépend de la fréquence d'échantillonnage (F_{ech}) et du nombre (N) d'échantillons de l'enregistrement :

$$\Delta f = \frac{F_{ech}}{\Delta t \cdot N} = \frac{F_{ech}}{N}$$

L'analyse de Fourier ne s'avère pas efficace en régime transitoire à cause de la faible durée de ce régime et donc de la faible précision fréquentielle de l'analyse.

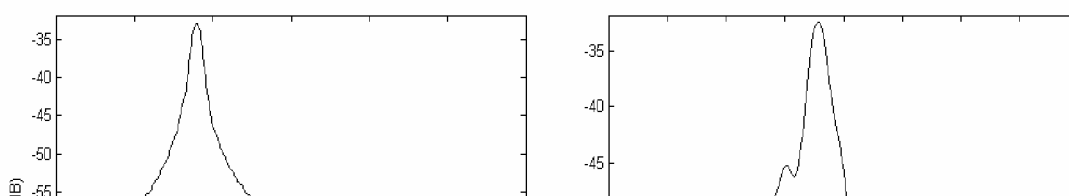
A- commande indirecte

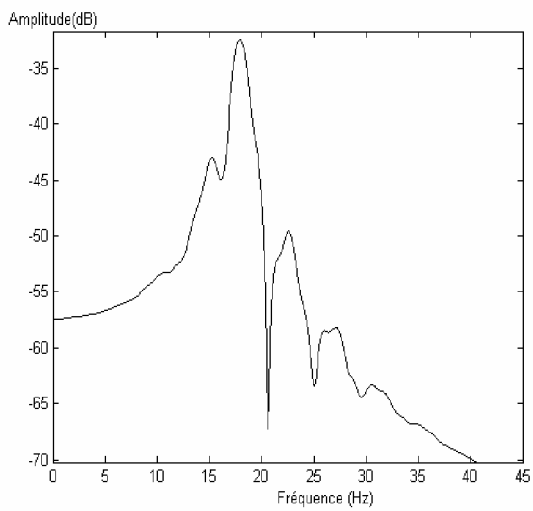


Courant statorique : état sain et défaillant

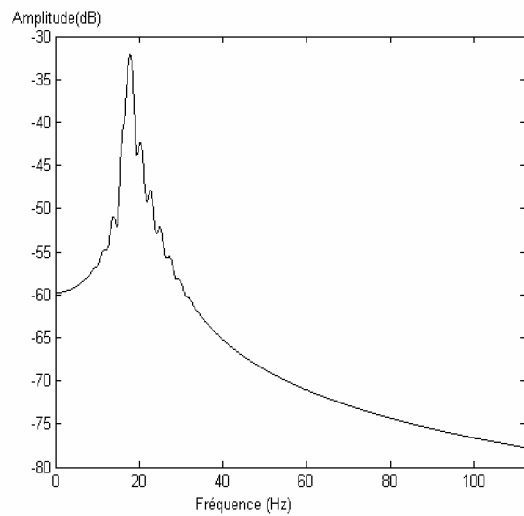
Etat rupture des barres

Nous allons effectuer l'analyse du courant statorique en cas de cassure de barre rotorique. On augmente la résistance d'une barre rotorique de 11 fois sa résistance. Nous observons l'apparition de raies autour du fondamental. Ces raies sont le résultat du défaut créé au rotor. La variation dans le spectre du courant statorique dépend de la variation de la résistance de barre cassée.

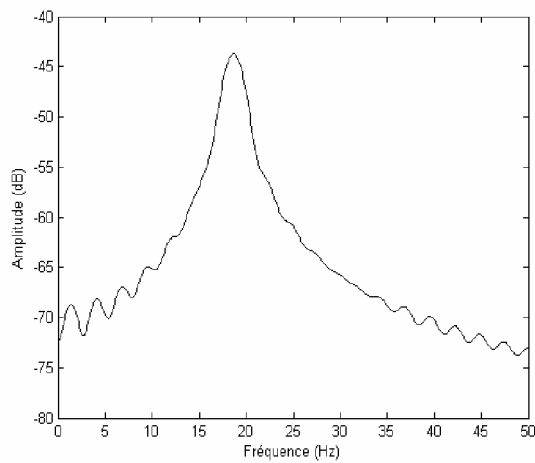




c : Spectre du courant statorique
deux barres adjacentes" 1 et 2" cassée $R=11 \times R_b$

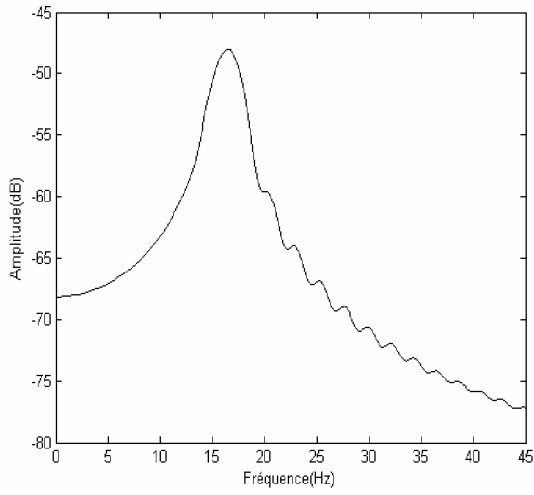


d : Spectre du courant I_{as}
deux barres espacées cassées 1 puis 7

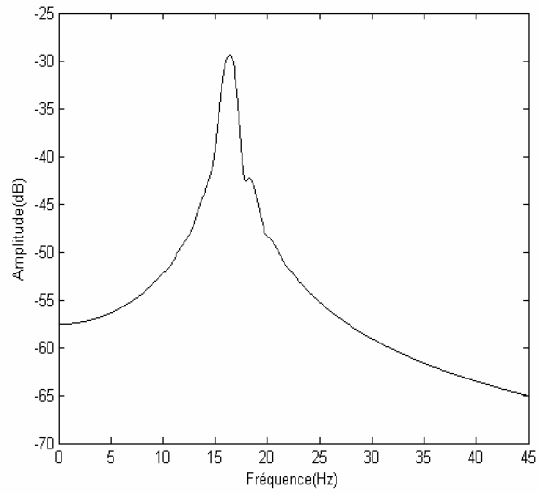


e: Spectre du courant I_{as}
variation de la charge à $t=3s$ $C_r=6N.m$

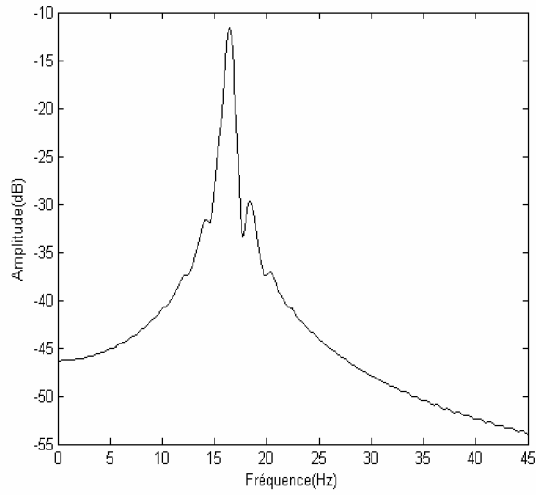
B- Commande directe



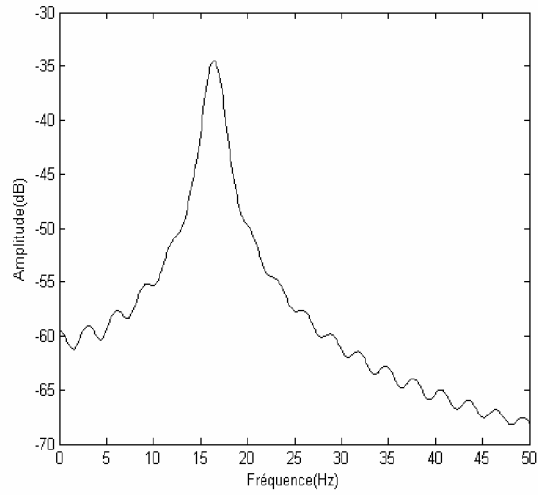
a: Spectre du courant statorique;
état sain



b: Spectre du courant I_{as} rupture
de barre 1 $R_r=R_{bx11}$



c Spectre du courant statorique
deux barre adjacents cassées



d: Spectre du courant I_{as} variation
de la charge à $t=3s$

VI.5 Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre l'influence du défaut rotorique sur le courant statorique. L'association du modèle multi enroulements à celui de Park nous a permis de réaliser la simulation et le contrôle de la machine en présence ou non d'un défaut. En fait, la présence du défaut au rotor se traduit par des ondulations du couple électromagnétique. Nous avons abordé l'influence de la commande sur la réponse de la machine asynchrone qui présente des défauts rotoriques.

Nous avons présenté également dans ce chapitre les deux méthodes de la commande vectorielle (indirecte et directe). On conclut que la commande vectorielle est un outil de contrôle intéressant permettant de traiter la machine asynchrone de façon semblable à celle à courant continu. Dans la conception du contrôle de ce type, il est important de choisir le modèle d'action convenable associé au choix du référentiel.

Pour pouvoir réaliser la commande vectorielle, il est nécessaire de connaître à chaque instant certaines grandeurs dont les plus importantes sont le module et la phase du flux pour les méthodes directes et seulement la phase du flux pour les méthodes indirectes.

La commande vectorielle classique donne des résultats dans le cas d'un système linéaire à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, ces lois peuvent être insuffisantes. Pour cela, on va étudier dans le cinquième chapitre la commande à structure variable.

Pour valider nos programmes de simulation, nous avons comparé nos résultats à ceux d'autres autres [BAG 99] et [ABE 02], il sont, en général, en bonne concordance.