

## Formulation de la Commande Tolérante Aux Défauts

### Application à la Machine Asynchrone

N. Benbaha, F.Zidani, M.-S. Nait Said

Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE,  
Département d'Electrotechnique, Université de Batna, Algérie  
E-Mail:nben22@yahoo.fr

**Abstract**— Dans cet article nous mettons en évidence le changement du modèle de la machine asynchrone (MAS) en présence des défauts et d'appliquer une technique de commande tolérante aux défauts (FTC). Les recherches concernant le diagnostic des machines électriques montrent que l'effet de tels défauts se reflète dans les courants statoriques par des harmoniques de fréquences directement liée au type de défaut. Ceci sera réalisé, par l'ajout d'un terme additif à la commande nominale issu du modèle interne qui reproduit les perturbations des défauts. Des résultats de simulation sous Simulink / Matlab sont présentés pour montrer la qualité des performances obtenues.

**Key-Words**— *Commande tolérante aux défauts; Commande robuste par backstepping; Machine asynchrone*

#### I. INTRODUCTION

LES stratégies de commande tolérante aux défauts ont pour but de conserver la maîtrise du comportement dynamique du système commandé en dépit de la présence d'un dysfonctionnement. Différentes causes peuvent être à l'origine de ces dysfonctionnements. Les défaillances internes résultent de différents facteurs plus ou moins maîtrisés: vieillissement, fatigue, maintenance mal adaptée [1].

Avec la complexification des procédés et l'augmentation des éléments technologiques matériels ou logiciels qui sont souvent intégrés aux boucles de contrôle, la tolérance aux défauts est devenue l'une des préoccupations majeures dans la conception des systèmes automatisés complexes [2].

Un système tolérant aux défauts se caractérise par son aptitude à maintenir ou retrouver des performances en dysfonctionnement (dynamiques ou statiques) proches de celles qu'il possède en régime normal de fonctionnement. De nombreux travaux pour garantir un certain degré de tolérance aux défauts sont issus de techniques classiques de commande robuste (approches dites passives [3]). Plus récemment, on assiste à une effervescence des approches dites actives, qui se caractérisent par la présence d'un module de diagnostic (FDI Fault Detection and Isolation).

L'objectif de la commande FTC est de fournir une solution à la fréquence des problèmes et de réduire les coûts de leurs traitements. Ainsi, le problème qui se pose n'est pas

tellement de discuter quelle technique de contrôle de la machine à utiliser mais surtout comment assurer un niveau de performances minimales du système d'entraînement faisant l'objet d'un défaut de fonctionnement par exemple un défaut partiel ou complet des capteurs de courant, de vitesse etc. [4].

Dans cet article, on s'intéresse à l'application de la commande tolérante aux défauts. Les résultats de la simulation numérique sont présentés et attestent l'efficacité des méthodes appliquées.

#### II. HARMONIQUES DUES AUX DEFAUTS

##### A. Défauts de roulement à billes (Bearing faults)

Les fréquences de vibrations provoquées par un défaut de roulement varient selon le type de défaut comme suit [5] :

Défaut de la cage externe du roulement :

$$f_{be} = (N/2)f_r [1 - b_d \cos(\alpha) / d_p] \quad (1)$$

Défaut de la cage interne du roulement :

$$f_{bi} = (N/2)f_r [1 + b_d \cos(\alpha) / d_p] \quad (2)$$

Défaut de billes:

$$f_b = (d_p f_r / b_d) \cdot [1 - (b_d \cos(\alpha) / d_p)^2] \quad (3)$$

##### B. Défauts statoriques

Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [6]:

$$f_{st} = \left( k \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) f_s \quad (4)$$

$f_{st}$  : fréquence des défauts au stator.

Avec  $k = 1, 3$  et  $n = 1, 2, 3, \dots (2p-1)$

C. Barres rotoriques cassées et anneaux de court-circuit rompus

Le résultat de la dissymétrie due à un défaut de barre(s) cassée(s) réside dans la création d'un champ tournant de sens opposé à celui généré par le stator, et cela à la fréquence de glissement. Par conséquent, il y aura création des courants supplémentaires dans le bobinage statorique à des fréquences induites [7]:

$$f_{bc} = [1 \pm 2ks]f_s \quad (5)$$

$f_{bc}$  : fréquence de barre cassée.

- Le signe (+) indique la conséquence des oscillations en vitesse.
- Le signe (-) indique la présence du défaut rotor (barres cassées).

D. Défauts relatifs à l'excentricité

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences données par [8]:

$$f_{ex} = \left( (k \cdot R \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm v \right) f_s \quad (6)$$

$f_{ex}$  : Fréquence d'excentricité;

$n_d$  : Connu comme un ordre d'excentricité;

$n_d = 0$ , dans le cas de l'excentricité statique.

$n_d = 1, 2, 3, \dots$  dans le cas de l'excentricité dynamique.

$R$  : Nombre d'encoche rotorique.

$v$  : Ordre des harmoniques temporelles au stator ;  
( $v = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ )

III. MODELE DE LA MAS EN PRESENCE DES DEFAUTS

Dans cette section nous mettons en évidence le changement du modèle de la MAS en présence de défauts. Un terme  $V$  s'ajoute dans le modèle qui s'écrit alors sous la forme [9],

$$\dot{x} = f(x) + B \cdot u + \dagger_f \cdot V \quad (7)$$

Avec,

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [i_d \quad i_q \quad w_d \quad w_q]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, \dagger_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

L'expression du champ de vecteurs  $f(x)$ ,

$$\begin{cases} f_1 = -a_7 x_1 + \check{S}_s x_2 + a_2 x_3 + a_1 \check{S} x_4 \\ f_2 = -\check{S}_s x_1 - a_7 x_2 - a_1 x_3 + a_2 x_4 \\ f_3 = a_6 x_1 + a_5 x_3 + (\check{S}_s - \check{S}) x_4 \\ f_4 = a_6 x_2 - (\check{S}_s - \check{S}) x_3 + a_5 x_4 \end{cases}$$

Avec,

$$a_1 = \frac{1}{\dagger L_s}, a_2 = \frac{1}{\dagger L_s T_r}, a_3 = \frac{R_s}{\dagger L_s}$$

$$a_4 = \frac{1 - \dagger}{\dagger T_r}, a_5 = \frac{-1}{T_r}, a_6 = \frac{L_s (1 - \dagger)}{T_r}$$

$$a_7 = a_3 + a_4, b = \frac{1}{\dagger L_s}$$

$$V = \begin{bmatrix} -a_7 \cdot Q_d - \check{S}_s \cdot Q_q + Q_d \cdot S \\ -\check{S}_s \cdot Q_d + a_7 \cdot Q_q - Q_q \cdot S \end{bmatrix} \cdot z = -\Gamma \cdot z$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Gamma_d \\ \Gamma_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_7 \cdot Q_d + \check{S}_s \cdot Q_q - Q_d \cdot S] \\ [\check{S}_s \cdot Q_d - a_7 \cdot Q_q + Q_q \cdot S] \end{bmatrix}$$

IV. COMMANDE ROBUSTE TOLERANTE AUX DEFAUTS PAR BACKSTEPPIN

La commande par backstepping (commande nominale) est robuste par rapport au couple de charge  $C_r$  et aux variations paramétriques mais présente une insuffisance quant au rejet de l'effet des défauts exprimé dans la perturbation  $V$ . Donc on peut écrire le modèle de la MAS sous la forme suivante [10]:

$$\begin{cases} \check{S} = \frac{\tilde{w}}{J} w_d i_{sq} - \frac{C_r}{J} \\ \dot{w}_d = -r w_d + r M i_{sd} \\ \dot{i}_{sq} = f_q + \frac{1}{\dagger L_s} u_q + V_q \\ \dot{i}_{sd} = f_d + \frac{1}{\dagger L_s} u_d + V_d \end{cases} \quad (8)$$

Avec,

$$f_d = -\gamma \cdot i_{sd} + r s \cdot w_d + P \check{S} \cdot i_{sq} + r M \frac{i_{sq}^2}{w_d}$$

$$f_q = -\gamma \cdot i_{sq} - s P \check{S} \cdot w_d - \check{S} \cdot i_{sd} - r M \frac{i_{sd} \cdot i_{sq}}{w_d}$$

L'application de cette technique revient à trouver un

terme additif  $u_{ad}$  nul en absence de défauts qu'on ajoute à la commande nominale pour compenser l'effet des défauts sur le système. Ce terme est généré par un modèle interne à partir des sorties du système à commander, la nouvelle commande s'exprime alors par :

$$u = u_{nom} + u_{ad}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_{dnom} \\ u_{qnom} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{dad} \\ u_{qad} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Avec l'expression retenue de la commande nominale :

$$u_{dnom} = \dagger L_s (k_4 (i_{sdref} - i_{sd}) + i_{sdref} - f_d)$$

$$u_{qnom} = \dagger L_s (k_3 (i_{sqref} - i_{sq}) + i_{sqref} - f_q) \quad (10)$$

La différence instantanée entre l'état du système et la consigne s'exprime par :

$$\bar{x} = x_{ref} - x = \begin{bmatrix} x_{1ref} \\ x_{2ref} \\ x_{3ref} \\ x_{4ref} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Tel que,

$$x_{ref} = \begin{bmatrix} x_{1ref} & x_{2ref} & x_{3ref} & x_{4ref} \end{bmatrix}^T$$

$$= \begin{bmatrix} w_{ref} & w_{dref} & i_{sqref} & i_{sdref} \end{bmatrix}^T$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \tilde{S} & w_d & i_{sq} & i_{sd} \end{bmatrix}^T$$

Et sa dérivée par rapport au temps est,

$$\dot{\bar{x}} = \begin{cases} \dot{x}_{1ref} - \frac{\tilde{w}_d}{J} W_d \cdot i_{sq} + \frac{C_r}{J} \\ \dot{x}_{2ref} + \Gamma W_d - \Gamma M \cdot i_{sd} \\ \dot{x}_{3ref} - f_q - \frac{1}{\dagger L_s} u_q - V_q \\ \dot{x}_{4ref} - f_d - \frac{1}{\dagger L_s} u_d - V_d \end{cases} \quad (12)$$

Après simplification on obtient,

$$\dot{\bar{x}} = \begin{cases} \dot{x}_{1ref} - \frac{\tilde{w}_d}{J} W_d i_{sq} + \frac{C_r}{J} \\ \dot{x}_{2ref} + \Gamma W_d - \Gamma M i_{sd} \\ \dot{x}_{3ref} - k_3 \bar{x}_3 - i_{sqref} - \frac{1}{\dagger L_s} u_{qad} - \Gamma_q \cdot z \\ \dot{x}_{4ref} - k_4 \bar{x}_4 - i_{sdref} - \frac{1}{\dagger L_s} u_{dad} - \Gamma_d \cdot z \end{cases} \quad (13)$$

Et aussi,  $\dot{x}_{4ref} = \dot{i}_{sdref}$  et  $\dot{x}_{3ref} = \dot{i}_{sqref}$ , donc le système d'erreurs prend la forme compacte suivante :

$$\dot{\bar{x}}_1 = \dot{x}_{1ref} - \frac{\tilde{w}_d}{J} \Phi_d \cdot i_{sq} + \frac{C_r}{J}$$

$$\dot{\bar{x}}_2 = \dot{x}_{2ref} + \Gamma \Phi_d - \Gamma M \cdot i_{sd}$$

$$\dot{\bar{x}}_3 = -k_3 \bar{x}_3 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{qad} - \Gamma_q \cdot z \quad (14)$$

$$\dot{\bar{x}}_4 = -k_4 \bar{x}_4 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{dad} - \Gamma_d \cdot z$$

- Dans la première équation on ajoute et on retranche

$$\frac{\tilde{w}_d}{J} \Phi_d \cdot i_{sqref},$$

- Dans la deuxième on ajoute et on retranche

$$\Gamma M \cdot i_{sdref}.$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = -K_1 \cdot \bar{x}_1 + \frac{\tilde{w}_d}{J} \Phi_d \cdot \bar{x}_3 \\ \dot{\bar{x}}_2 = -K_2 \cdot \bar{x}_2 + \Gamma M \cdot \bar{x}_4 \\ \dot{\bar{x}}_3 = -k_3 \bar{x}_3 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{qad} - \Gamma_q \cdot z \\ \dot{\bar{x}}_4 = -k_4 \bar{x}_4 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{dad} - \Gamma_d \cdot z \end{cases} \quad (15)$$

On remarque :

- Dans les deux premières équations si  $\bar{x}_3$  et  $\bar{x}_4$  s'annulent, on aura la convergence des deux erreurs  $\bar{x}_1$  et  $\bar{x}_2$  exponentiellement vers zéro ;
- Et les deux dernières équations ne dépendent pas des variables  $\bar{x}_1$  et  $\bar{x}_2$ .

Ainsi, dans la suite, pour la détermination de  $u_{ad}$  on considère le système suivant :

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_3 \\ \bar{x}_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Dont la dynamique se déduit facilement du système (15)

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}}_3 \\ \dot{\tilde{x}}_4 \end{bmatrix} = \begin{cases} -k_3 \bar{x}_3 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{qad} - \Gamma_q \cdot z \\ -k_4 \bar{x}_4 - \frac{1}{\dagger L_s} u_{dad} - \Gamma_d \cdot z \end{cases} \quad (17)$$

On peut écrire alors ce qui suit :

$$\dot{\tilde{x}} = H(\tilde{x}) + \tilde{B} \cdot u_{ad} - \Gamma \cdot z \quad (18)$$

Avec,

$$H(\tilde{x}) = \tilde{A} \cdot \tilde{x}, \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} -k_3 & 0 \\ 0 & -k_4 \end{bmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\dagger L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\dagger L_s} \end{bmatrix}$$

#### A. Modèle interne et commande additive

Dans cette section, nous introduisons le modèle interne qui va être utilisé par le régulateur final. Ce dernier sert à reproduire asymptotiquement les variations du terme inconnu  $V$  qui montre l'effet des défauts dans notre cas. La conception de ce modèle interne est faite selon la procédure décrite dans la référence [9].

1) *Modèle interne* : En supposant que les pulsations caractéristiques des défauts  $\tilde{S}_i$  (de nombre  $n_f$ ); et donc les matrices  $S$  et  $\Gamma$ ; sont parfaitement connues, considérons l'équation de Sylvester suivante :

$$M \cdot S + F \cdot M = G \cdot \Gamma \quad (19)$$

$F$  et  $G$  sont des matrices de dimensions adéquates tel que  $F$  est arbitraire stable (Hurwitz) et  $G$  choisie de tel sorte que la paire  $(F, G)$  est commandable.  $M$  est l'unique solution de l'équation (19) et elle est non singulière. Le modèle interne prend alors la forme suivante [9] :

$$\dot{\zeta} = S \cdot \zeta + N(\tilde{x}) \quad (20)$$

2) *Calcul de la commande additive* : On considère le système (18), et on choisit la commande additive de la forme [10] :

$$u_{ad} = \tilde{B}^{-1} \cdot \Gamma \cdot \zeta \quad (21)$$

Ce qui revient à écrire :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= H(\tilde{x}) + \Gamma \cdot (\zeta - z) \\ \dot{\tilde{x}} &= \tilde{A}(\tilde{x}) + \Gamma \cdot e \end{aligned} \quad (22)$$

Où nous avons introduit la nouvelle variable d'erreur  $e$  que nous dérivons par rapport au temps en tenant compte de la dynamique du modèle interne et celle des défauts :

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\zeta} - \dot{z} = S \cdot \zeta + N(\tilde{x}) - S \cdot z \\ \dot{e} &= S \cdot e + N(\tilde{x}) \end{aligned} \quad (23)$$

Les équations décrivant la dynamique des erreurs en boucle fermée sont donc :

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A} \cdot \tilde{x} + \Gamma \cdot e \\ \dot{e} = S \cdot e + N(\tilde{x}) \end{cases} \quad (24)$$

Et il faut trouver l'expression de  $N(\tilde{x})$  qui annule l'erreur d'observation des défauts  $e$  et permet en même temps de rejeter leur effet car elle annule aussi  $\tilde{x}$ .

Soit la fonction de Lyapunov du système (24),

$$V = \frac{1}{2} \tilde{x}^T \cdot \tilde{x} + \frac{1}{2} e^T \cdot e \quad (25)$$

Sa dérivée par rapport au temps est :

$$\dot{V} = \tilde{x}^T \cdot \tilde{A} \cdot \tilde{x} + e^T \cdot S \cdot e + \tilde{x}^T \cdot \Gamma \cdot e + e^T \cdot N(\tilde{x})$$

Le terme  $e^T \cdot S \cdot e$  est nul car la matrice  $S$  est antisymétrique par construction,

Le terme  $\tilde{x}^T \cdot \tilde{A} \cdot \tilde{x}$  vérifie  $\tilde{x}^T \cdot \tilde{A} \cdot \tilde{x} < 0$  car  $\tilde{A}$  est définie négative,

Le terme  $\tilde{x}^T \cdot \Gamma \cdot e$  est un scalaire qui est égal à son transposé :

$$\tilde{x}^T \cdot \Gamma \cdot e = (\tilde{x}^T \cdot \Gamma \cdot e)^T = e^T \cdot \Gamma^T \cdot \tilde{x} \quad (26)$$

Donc, on peut déduire l'expression de  $N(\tilde{x})$  comme suit,

$$N(\tilde{x}) = -\Gamma^T \cdot \tilde{x} \quad (27)$$

Enfin, la dérivée de la fonction de Lyapunov est négative

$$\dot{V} = \tilde{x}^T \cdot \tilde{A} \cdot \tilde{x} \leq 0 \quad (28)$$

Par conséquent  $\tilde{x}$  est stable à l'origine et on a  $\tilde{x} \rightarrow 0$  Et le système (24) devient :

$$\begin{cases} \Gamma \cdot e = 0 \\ \dot{e} = S \cdot e \end{cases} \quad (29)$$

Il en découle immédiatement  $e \rightarrow 0$

Finalement l'objectif de la commande est atteint en adoptant la procédure réalisée et on arrive à compenser l'effet des défauts sur le système ( $\tilde{x} \rightarrow 0$ ) et à les reproduire ( $e \rightarrow 0$ ) grâce au modèle interne.

## V. RESULTATS DE SIMULATION

Pour les figures 1 et 2 : Démarrage à vide, application de la charge nominale à 0.5 sec., puis à 0.7 sec., apparition de deux défauts générant trois harmoniques de phases  $/4$ , fréquence 50,80 et 20 Hz et d'amplitudes 15, 20 et 20 respectivement.

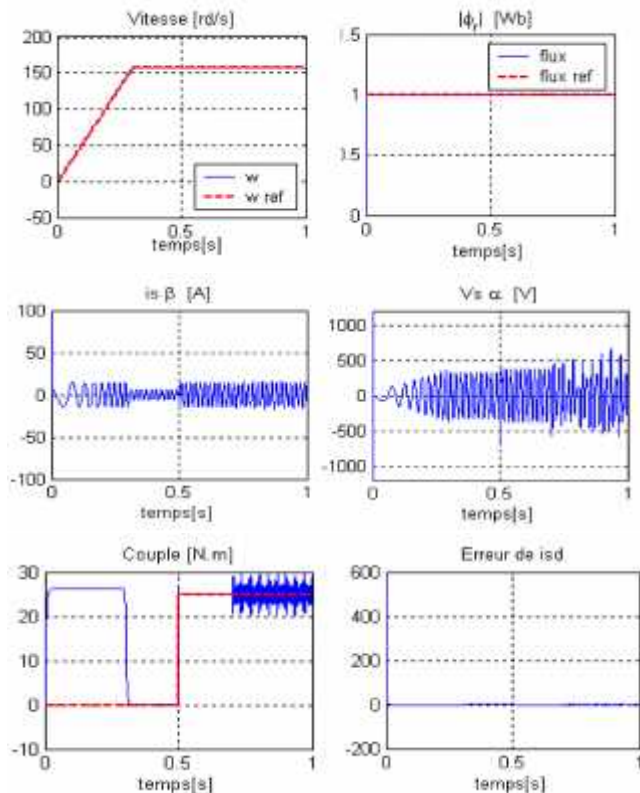


Figure 1. Commande par backstepping avec apparition des défauts.

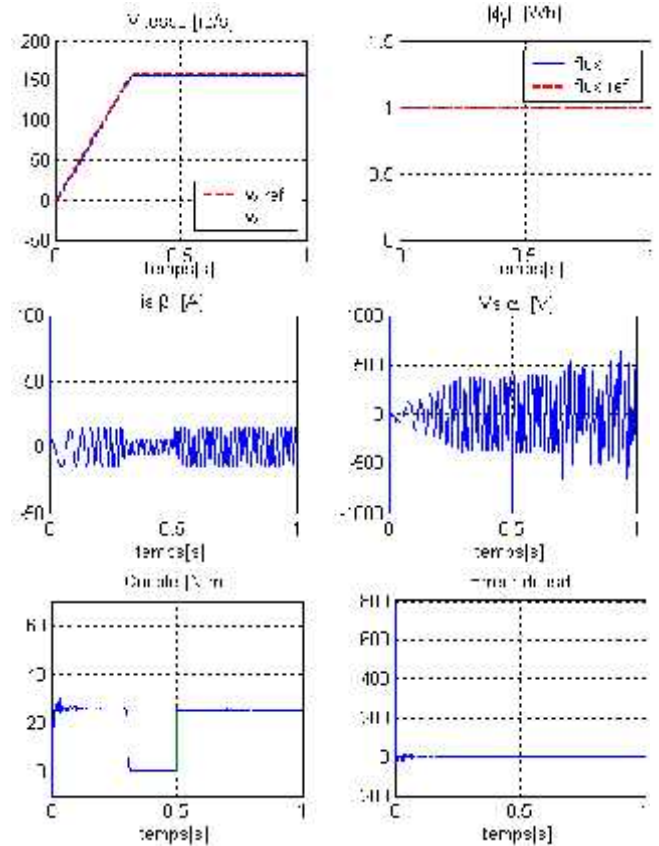


Figure 2. Résultats de simulation de la commande FTC.

## VI. CONCLUSION

Les différents résultats obtenus par simulation montrent les améliorations qu'apporte la commande FTC, notamment en terme de réduction des harmoniques de couple et les fluctuations dans les courants statoriques. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration des performances de la MAS même en présence des défauts au stator ou au rotor.

## NOMENCLATURE

- $R_s$  Résistance statorique.
- $R_r$  Résistance rotorique.
- $L_s$  Inductance cyclique propre du stator.
- $L_r$  Inductance cyclique propre du rotor.
- $T_r$  Constante de temps rotorique ( $L_r/R_r$ ).
- $M$  Inductance cyclique mutuelle entre stator et rotor.
- Coefficient de dispersion de Blondel.
- $C_e$  Couple électromagnétique délivré par la machine.
- $C_r$  Couple de charge.
- $J$  Moment d'inertie des parties tournantes
- $\omega$  Vitesse de rotation mécanique.
- $\omega_s$  Pulsation électrique statorique
- $\omega_r$  Pulsation électrique rotorique
- $p$  Nombre de paires de pôles.





# The INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS & OIL: FROM THEORY TO APPLICATIONS

March 05-06, 2013, Ouargla, Algeria



## ANNEXE

TABLEU I PARAMETRES DU MOTEUR

Puissance nominale	4 kW
Couple nominale	25 N.m
Résistance statorique	1.2
Résistance rotorique	1.8
Inductance statorique	0.1564 H
Inductance rotorique	0.1564 H
Inertie du moteur	0.024 kg.m <sup>2</sup>
Inductance mutuelle	0.15 H
Nombre de paires de pôles	2

## REFERENCES

- [1] Jerome C., *Analyse et synthèse d'une architecture coopérative pour la commande tolérante aux défauts application à un système aéronautique*, Thèse de doctorat, université Bordeaux I, 2007.
- [2] Yang G.H., Wang J.L., Soh Y.C. "Reliable H<sub>∞</sub> controller design for linear systems", *Automatica*, Vol.37, 2001, pp. 717-725.
- [3] Zhang Y., Jiang J., "Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control system" In: *Proceedings of the 5th Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS'2003)*. Washington D.C., USA, 2003, pp. 265-276.
- [4] A. Makouf, *Commande robuste d'un variateur de vitesse pour la machine asynchrone*, Thèse de doctorat, université de Batna, 2003.
- [5] G. B. Kliman and J. Stein, "Induction motor fault detection via passive current monitoring", *International Conference in Electrical Machines, Cambridge, MA*, August 1990, pp.13-17.
- [6] J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, W. T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Dec 1994, vol.9, no.4.
- [7] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, "AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect", *IEEE-IAS Annual meeting conference, San Diego*, Oct 6-10, 1996, pp. 655-662.
- [8] J. R. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow, "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors", *IEE Proceedings*, May 1986, pp. 155-163, vol. 133, pt. B, no.3.
- [9] C. Bonivento, A. Isidori, I. Marconi, A. Paoli, "Implicit Fault Tolerant Control: Application to Induction Motors". *Automatica* 40, 2004, 355-371.
- [10] O. Benzineb, H. Mekki, D. Boukhetala, M. Tadjine, M.S Boucherit "Implicit Fault Tolerant Control Technique Based Backstepping: Application to Induction Motor" *6th Conference CEE'08 Proceeding*, Batna, October 11-13, 2010, pp. 511-516.