



HAL
open science

Détection et Commande Tolérante d'un Défaut statorique de la MSAP-RE utilisant l'Algorithme Adaptatif des Colonies de Fourmis

Ahmed Belkhadir, Remus Pusca, Youssef Zidani, Driss Belkhayat, Raphael
Romary

► **To cite this version:**

Ahmed Belkhadir, Remus Pusca, Youssef Zidani, Driss Belkhayat, Raphael Romary. Détection et Commande Tolérante d'un Défaut statorique de la MSAP-RE utilisant l'Algorithme Adaptatif des Colonies de Fourmis. Symposium de Génie Electrique, SGE2023, Jul 2023, Lille, France. pp.1-6. hal-04299091

HAL Id: hal-04299091

<https://univ-artois.hal.science/hal-04299091>

Submitted on 10 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détection et Commande Tolérante d'un Défaut statorique de la MSAP-RE utilisant l'Algorithme Adaptatif des Colonies de Fourmis

Ahmed BELKHADIR^{1,2*}, Remus PUSCA¹, Youssef ZIDANI², Driss BELKHAYAT², Raphaël ROMARY¹

¹ Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement, Université d'Artois, UR 4025, F-62400 Béthune, France ; remus.pusca@univ-artois.fr (R.P.) ; raphael.romary@univ-artois.fr (R.R.)

² Laboratoire des Systèmes Electriques, Efficacité Energétique et Télécommunications, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Avenue Abdelkarim Elkhatabi, B.P. 549, Marrakech 40000, Maroc ; y.zidani@uca.ma (Y.Z.) ; driss.belkhatat@uca.ma (D.B.)

*ahmed_belkhadir@ens.univ-artois.fr ; ahmed.belkhadir@ced.uca.ma

RESUME -La présence d'un défaut dans les machines électriques peut entraîner l'arrêt complet du système, limiter la durée de vie ou provoquer des perturbations dans son fonctionnement. Par conséquent, l'intégration des approches de commandes tolérantes aux défauts est primordiale afin de garantir le bon fonctionnement et la stabilité du système. Dans cet article, la stratégie de contrôle vise la détection et la réduction des ondulations de couple en cas d'un défaut de déséquilibre présent dans l'enroulement statorique illustré par un manque de spires appliqué à une phase d'un moteur synchrone à aimant permanent à rotor externe. Pour calculer les références des courants, la loi de contrôle est basée sur le vecteur espace en utilisant une technique vectorielle qui permet de contrôler et de compenser le défaut. Comme le système est soumis à des variations physiques causées par la présence du défaut, son comportement devient non linéaire et provoquant des ondulations de couple et de vitesse. Pour augmenter la robustesse de la commande, l'algorithme adaptatif des colonies de fourmis ACO est utilisé. Il permet l'auto-ajustement des paramètres des régulateurs afin d'obtenir un contrôle efficace du couple et de la vitesse. En combinant les deux techniques, il est possible d'améliorer l'efficacité et la stabilité globale du système afin d'obtenir des performances satisfaisantes en termes de rapidité, de stabilité et de précision.

Mots-clés— *Commandes tolérantes aux défauts, détection, ondulations de couple, déséquilibre de l'enroulement statorique, manque de spires, moteur synchrone à aimant permanent à rotor externe, algorithme ACO.*

1. INTRODUCTION

Au cours de dernières années, la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des machines électriques est devenu un critère très important dans la réalisation et la conception des installations. C'est pourquoi le diagnostic et les techniques de commande tolérante aux défauts (FTC) présentent un point incontournable d'étude afin que la continuité de service soit assurée. Ces techniques permettent la surveillance, la détection et l'isolation du défaut, ainsi que la reconfiguration du système de commande afin de protéger les éléments sains de la machine et assurer la continuité de fonctionnement du système dans un mode dégradé en attendant une possible intervention [1]. Les

Machines Synchrones à Aimants Permanents à Rotor Externe (MSAP-REs) sont largement utilisés dans de nombreux domaines en raison de leurs performances, surtout l'efficacité énergétique et la densité de puissance très élevés par rapport aux autres machines [2]. Toutefois, en raison du vieillissement des matériaux, des défauts de fabrication ou des conditions sévères de fonctionnement, différents types de défauts électriques, mécaniques ou magnétiques peuvent survenir dans la machine. À titre d'exemple, les défauts d'ouverture de phase, les défauts de court-circuit entre spires, l'excentricité, la démagnétisation et les défauts du circuit magnétique. Par conséquent, l'intégration des approches de détection, de diagnostic et de contrôle tolérant aux défauts devient incontournable.

Actuellement, de nombreuses recherches ont été menées sur le diagnostic et la minimisation des ondulations de couples dans les MSAP-REs. L'approche la plus connue consiste à utiliser des méthodes d'estimation en injectant un courant harmonique dans les phases de la machine [3]. Une autre méthode recommande l'utilisation des compensateurs d'anticipation de tension à action directe et de courant d'axe virtuel en quadrature [4]. Les auteurs de [5] recommandent l'utilisation d'un observateur répétitif pour réduire les ondulations et le bruit acoustique tout en améliorant les performances de la machine.

Les Défauts de Manque de Spires (DMS) peuvent être détectés par des techniques basées sur les signaux, des données et l'utilisation des modèles. La première méthode vise à détecter les fréquences caractéristiques des défauts dans des signaux mesurés sur la machine qui sont traités par des outils d'analyse temps-fréquence tels que la transformée de Fourier, la transformée de Hilbert-Huang et la transformée des ondelettes.

Ce travail se concentre sur le développement d'une stratégie de contrôle capable de réduire les ondulations de couple et détecter le défaut par la mise en œuvre d'une technique non invasive de détection dans le domaine temporel. Cette technique permet une application simple et puissante d'une approche de diagnostic de défaut en ligne. Une fonction de fitness améliorée qui peut réduire les erreurs de régulation à l'aide d'un algorithme artificiel d'optimisation par colonies de fourmis (ACO) sera mise en œuvre.

2. MODELE DE LA MSAP A ROTOR EXTERNE

Le modèle dynamique de la MSAP-RE utilisé dans l'étude est lié au référentiel abc , en considérant les différentes grandeurs électriques et mécaniques de la machine. Un modèle précis incluant la structure de la machine défectueuse est nécessaire. La Fig. 1 illustre le modèle de la MSAP-RE avec un DMS. La topologie du stator de la machine est à bobinage concentrique à double couche avec 24 encoches et 22 pôles (24/22). En supposant que le DMS se produise dans la phase A, le modèle du circuit est illustré sur la Fig. 2.

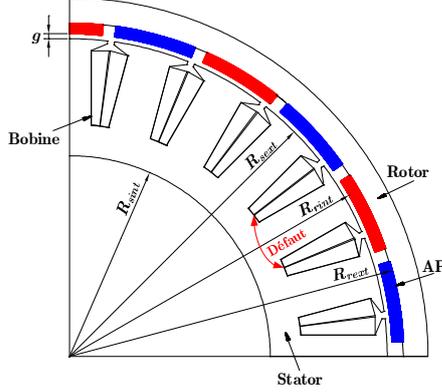


Fig. 1. Modèle de la MSAP-RE.

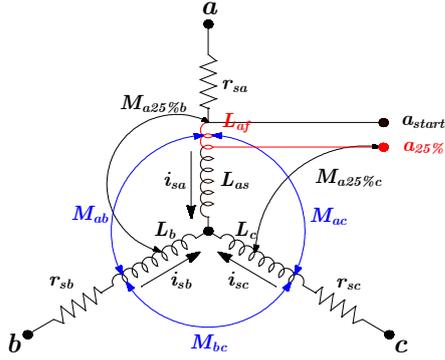


Fig. 2. Modèle électrique triphasé de la machine avec un DMS.

Il est simple de mettre en œuvre le défaut de manque de spires en utilisant le modèle mathématique suivant. Pour éliminer les ondulations du couple, le modèle abc est utilisé pour estimer l'effet du défaut.

$$[V_{s,abc}] = [r_{s,abc}] [i_{s,abc}] + [L_{abc}] \frac{d}{dt} [i_{s,abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{r,abc}] \quad (1)$$

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2)$$

En présence d'un défaut, le potentiel du point neutre peut être modifié. Par conséquent, nous utilisons les équations de tension sans V_N :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \phi_a - \frac{d}{dt} \phi_b = V_a - V_b - r_{sa} i_{sa} + r_{sb} i_{sb} \\ \frac{d}{dt} \phi_a - \frac{d}{dt} \phi_c = V_a - V_c - (r_{sa} + r_{sc}) i_{sa} - r_{sc} i_{sb} \end{cases} \quad (3)$$

$$i_{sa} = \frac{A - B i_{sb}}{C} \quad i_{sb} = \frac{D - E i_{sa}}{F} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A &= \phi_a - \phi_{ra} - \phi_b + \phi_{rb} \\ B &= M_{ab} - M_{ac} - L_b + M_{bc} \\ C &= L_a - M_{ac} - M_{ba} + M_{bc} \\ D &= \phi_a - \phi_{ra} - \phi_c + \phi_{rc} \\ E &= L_a - M_{ac} - M_{ca} + L_c \\ F &= M_{ab} - M_{ac} - M_{cb} + L_c \end{aligned} \quad (5)$$

Le produit des courants et du vecteur espace de flux génère le couple électromagnétique :

$$\Gamma_e = \frac{3}{2} p (\bar{\phi}_s \wedge \bar{i}_s) \quad (6)$$

$$\bar{\phi}_s = \frac{2}{3} \left(\phi_{sa} + \phi_{sb} e^{j2\pi/3} + \phi_{sc} e^{j4\pi/3} \right) \quad (7)$$

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} \left(i_{sa} + i_{sb} e^{j2\pi/3} + i_{sc} e^{j4\pi/3} \right) \quad (8)$$

L'identification et la détermination des paramètres de la MSAP-RE sont basées sur les méthodologies et les approches développées dans [6]. Les valeurs des différents éléments sont présentées dans l'annexe.

$$L_{ji} = (N_s)^2 R_{sect} L_{axe} K_w \int_0^{2\pi} F_{dis,j}(\theta_s) \varphi(\theta_s) F_{w,i}(\theta_s) d\theta_s \quad (9)$$

$$L_{ji} = \frac{\phi_a(t)}{i_{sa}(t)} ; M_{ji} = \frac{\phi_{ab}(t)}{i_{sa}(t)} \quad (10)$$

3. STRATEGIE DE LA COMMANDE TOLERANTE AU DEFAUT

3.1. Approche pour la détection et le diagnostic du défaut

Avant l'implémentation de la loi de commande et pour faire face aux défaillances liées au défaut de DMS, une étape de détection du défaut est primordiale. Afin de détecter les DMS qui peuvent survenir la machine, les courants triphasés statiques peuvent être utilisés comme un outil de détection. Les approches basées sur l'estimation se concentrent sur la conception des résidus qui seront utilisés comme indicateurs de défauts. Le principe de cette méthode réside dans l'exploitation des variables d'état estimées par un observateur pour générer un résidu avec une valeur moyenne non nulle dans le cas défectueux. En exploitant les résidus, nous dérivons des signatures qui seront utilisées dans le développement d'un algorithme permettant la détection et la localisation du défaut.

A. Estimation des courants statoriques

Afin d'estimer les courants statoriques de la MSAP-RE, un observateur d'état adaptatif est utilisé [7]. La reconstitution des états internes du système est basée sur un modèle proche de la MSAP-RE. La structure de l'observateur peut être décrite sous la forme suivante :

$$\hat{\dot{x}} = H\hat{x} + Gu + D\lambda \quad (11)$$

$$[\hat{x}]^T = [\hat{i}_{sd} \quad \hat{i}_{sq}] ; [u]^T = [V_{sd} \quad V_{sq} \quad \phi_{PM}] \quad (12)$$

$$[\lambda] = [i_{sd} - \hat{i}_{sd} \quad i_{sq} - \hat{i}_{sq}]^T \quad (13)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} -r_s/L_d & w_e(L_q/L_d) \\ -w_e(L_d/L_q) & -r_s/L_q \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_q & -w_e/L_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -k(r_s/L_d) & 0 \\ 0 & -kpw_e \end{bmatrix}; k \in \mathbb{R}_0^+ \quad (16)$$

La Fig. 3 représente le schéma de l'estimateur adaptatif observant l'état du système.

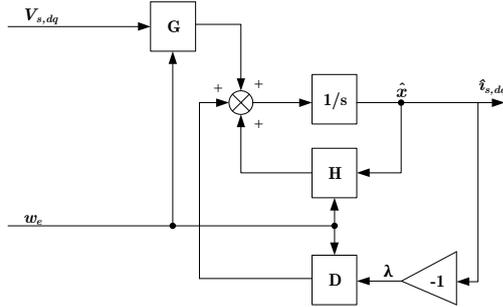


Fig. 3. Structure de l'observateur adaptatif.

B. Génération des résidus

La génération de signaux résiduels basés sur l'observateur adaptatif implique la reconstruction des sorties de la MSAP-RE pour comparer le vecteur de sortie mesuré au vecteur estimé. En effet, pour la détection du DMS affectant l'enroulement du stator de la phase a , trois signaux doivent être émis. Ces signaux sont utilisés comme des indicateurs pour indiquer la présence du défaut. Il est alors nécessaire d'introduire des seuils de détection pour éviter les fausses alarmes.

$$r_a = |i_{sa} - \hat{i}_{sa}| \quad r_b = |i_{sb} - \hat{i}_{sb}| \quad r_c = |i_{sc} - \hat{i}_{sc}| \quad (17)$$

C. Fixation de seuil

Le seuil est défini comme la valeur maximale que le résidu peut atteindre en l'absence du DMS et en présence de variations paramétriques de la résistance et de la charge. La méthode de détection ne doit pas être sensible aux perturbations dues à une variation de la résistance du stator. Le seuil défini peut être décrit comme la valeur maximale de r_a , r_b et r_c .

$$\varepsilon = \text{Max}[r_a, r_b, r_c] \quad (18)$$

D. Détection du défaut

La détection est réalisée par l'application d'une logique de décision (Fig. 4) capable de générer des signatures en fonction de la comparaison des signaux résiduels au seuil de détection ε [8].

$$\text{Indicateur}_n = \begin{cases} 0 & \text{si } r_n < \varepsilon \\ 1 & \text{si } r_n \geq \varepsilon \end{cases} \quad n = a, b, c \quad (19)$$

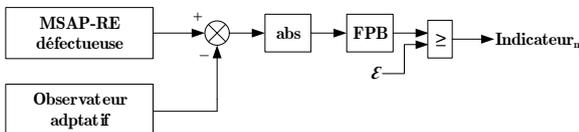


Fig. 4. Circuit de l'approche de détection proposée.

3.2. Implémentation de la commande tolérante

Avant l'implémentation de la loi de commande, nous considérons que le défaut a été détecté et localisé. Dans notre étude, la partie principale de la stratégie de contrôle consiste à minimiser les ondulations de couple et de vitesse en utilisant un contrôle du courant qui génère un système de courants déséquilibrés afin d'éliminer les ondulations et compenser les effets du défaut. De plus, le moteur doit être alimenté par des courants statoriques qui doivent être en quadrature avec les flux.

$$\Gamma_e^* = \frac{3}{2} p (\phi_{sd} i_{sq}^* - \phi_{sq} i_{sd}^*) \quad (20)$$

$$i_{sd}^* = -\frac{\phi_{sq} i_{sq}^*}{\phi_{sd}} \quad i_{sq}^* = -\frac{\phi_{sd} i_{sd}^*}{\phi_{sq}} \quad (21)$$

Les courants de référence donnant un couple constant et sans ondulations sont données par les expressions suivantes :

$$i_{sd}^* = -\frac{2}{3p} \Gamma_e^* \frac{\phi_{sq}}{\phi_{sd}^2 + \phi_{sq}^2} \quad i_{sq}^* = \frac{2}{3p} \Gamma_e^* \frac{\phi_{sd}}{\phi_{sd}^2 + \phi_{sq}^2} \quad (22)$$

En tenant compte des éléments réels et imaginaires du vecteur espace du flux :

$$\phi_{sd} = \Re(\bar{\phi}_s) \quad \phi_{sq} = \Im(\bar{\phi}_s) \quad (23)$$

Le vecteur d'espace des courants de référence est exprimé en fonction de ses parties réelles et imaginaires :

$$i_{sa}^* = \Re(\bar{i}_s^*) \quad i_{sb}^* = \Re(e^{j2\pi/3} \bar{i}_s^*) \quad i_{sc}^* = \Re(e^{j4\pi/3} \bar{i}_s^*) \quad (24)$$

$$\bar{i}_s^* = i_{sd}^* + j i_{sq}^* \quad (25)$$

3.3. Adaptation des paramètres de régulation par l'ACO

Afin d'obtenir les meilleurs gains des régulateurs, l'algorithme ACO est utilisé. Il permet une optimisation adaptative dans les conditions saines et défectueuses. La sélection est faite d'une manière aléatoire en laissant des phéromones pour identifier le chemin le plus court. L'équation suivante détermine sur quel nœud adjacent les fourmis seront situées. Plus précisément, la connexion reflète la probabilité que cet élément correspondant à une décision ij soit sélectionné [9].

$$P_{ij}^A(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i,j \in T^A} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]} \quad (26)$$

Les fourmis effectuent les sélections suivantes en fonction de cette équation de possibilité. L'itération est terminée lorsque tous les nœuds ont été visités.

$$P_{ij}^A(t) = \tau_{ij}(t) = \sigma \tau_{ij}(t-1) + \sum_{A=1}^{NA} \Delta \tau_{ij}^A(t) \quad (27)$$

Pour mettre en œuvre la procédure de réglage basée sur l'algorithme, les critères d'erreur couramment utilisés pour obtenir un contrôleur optimal sont l'erreur quadratique intégrale (ISE), l'erreur absolue intégrale (IAE), l'erreur absolue temporelle intégrée (ITAE) et l'erreur quadratique temporelle intégrale (ITSE). Ces erreurs sont exprimées comme suit :

$$ISE = \int [e(t)]^2 dt ; IAE = \int |e(t)| dt \quad (28)$$

$$ITAE = \int t |e(t)| dt ; ITSE = \int t [e(t)]^2 dt$$

Les différentes opérations et étapes d'optimisation des régulateurs avec l'algorithme ACO sont présentées par l'organigramme illustré sur la Fig. 5. Le tableau I résume les paramètres utilisés dans le programme. Le choix de ces paramètres a été obtenu à l'issue de nombreuses expériences afin de converger vers des valeurs optimales en un temps réduit.

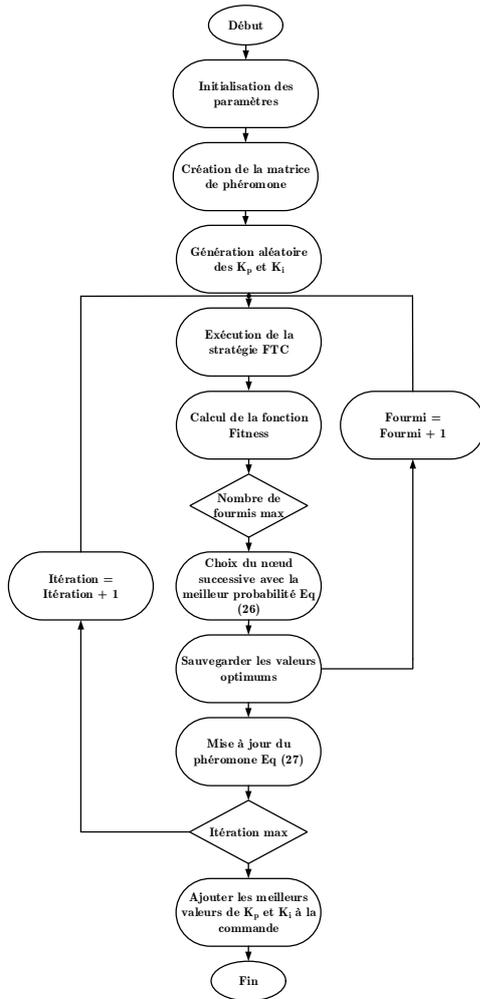


Fig. 5. Organigramme de l'algorithme ACO.

Tableau I. Paramètres du programme.

Paramètres	Valeur
Nombre de paramètres	4
Nombre de fourmis	50
Nombre maximal d'itérations	70
Nombre des nœuds	1000
Taux d'évaporation des phéromones	0,7

La structure de contrôle tolérante au DMS utilisée pour la détection et la compensation du défaut est illustrée à la Fig. 6. Les courants de référence sont déterminés à partir d'un couple de référence fourni par la boucle de vitesse et le vecteur espace de flux. Pour évaluer les performances et quantifier les ondulations, les courants seront mesurés.

4. RESULTATS DE SIMULATION

Les performances et l'efficacité de la loi de contrôle proposée sont testées à travers des simulations montrant le fonctionnement de la MSAP-RE affecté par le DMS. Les tests de simulation ont été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Une MSAP-RE de 1.5 kW est utilisé avec les paramètres spécifiés dans l'annexe (tableau II).

Les simulations suivantes sont effectuées avec un seul niveau de défaut (DMS de 25% de la section élémentaire de la phase a). Les paramètres sont pris en considération par un pas de changement à 6s de la valeur saine à celle défectueuse. Les variations paramétriques sont une condition essentielle pour une détection du défaut efficace. En effet, pour évaluer la robustesse de la détection en régime permanent, diverses variations de charge et de résistances sont appliquées. Sur la base de ces tests, la valeur seuil est déterminée après une analyse des signaux résiduels. Le seuil de détection choisi est $\varepsilon = 0.2$ A. Pour évaluer les performances et quantifier l'impact du défaut, les courants statoriques, le couple et la vitesse seront évalués. La Fig. 7 présente l'évolution du couple électromagnétique. A $t = 6s$, le couple présente de fortes ondulations qui sont apparaissent après l'apparition du DMS, ce qui provoque l'apparition de nouvelles harmoniques de défaut. La Fig. 8 illustre l'évolution de la vitesse de la machine en présence du défaut. Après l'apparition du DMS, des ondulations apparaissent sur la vitesse, et d'autre part, des vibrations dues aux ondulations de couple peuvent apparaître. Cela peut être expliqué par la diminution de la résistance et de l'inductance d'une phase, ce qui augmente la bande passante du système. Il est donc essentiel d'inclure une stratégie de détection et de commande tolérante au défaut. En corrélation avec les ondulations de couple, le courant i_{sq} et les courants statoriques (Fig. 9 et 10) présentent une asymétrie, un déséquilibre et une augmentation de l'amplitude pendant l'état défectueux.

Afin d'exploiter la méthode de détection du DMS, les essais visent à générer les résidus pour déterminer les indicateurs et les signatures spécifiques dans le cas défectueux. Les Fig. 11 et 12 illustrent l'évolution du résidu r_a et son indicateur dans le cas d'un défaut affectant l'enroulement statorique de la phase a . Le résidu r_a reste très proche de zéro pendant l'état sain ($t < 6s$). À partir de $t = 6s$, l'amplitude du résidu change considérablement et dépasse le seuil prédéfini, ce qui déclenche une alarme indiquant la présence du DMS. En raison du niveau élevé d'erreurs statiques et d'ondulations, les contrôleurs doivent être optimisés à l'aide de l'algorithme ACO en fonction du mode de fonctionnement. Pour minimiser les ondulations et empêcher la propagation des défauts, la validité de la structure adoptée doit être également vérifiée. Les simulations présentent les variations de différents paramètres de la machine en utilisant le vecteur espace. La commande génère un système de courants déséquilibrés pour compenser les effets introduits par le défaut.

D'après l'analyse de la variation du couple électromagnétique, les ondulations dans le fonctionnement tolérant au défaut semblent stables (Fig. 13). En effet, la structure proposée peut maintenir avec succès la MSAP-RE en fonctionnement continu lorsqu'un défaut survient. La Fig. 14 décrit l'évolution de la vitesse dans le cas du DMS avec la stratégie de correction. Il est évident que le moteur peut fonctionner correctement. La fig. 15 et 16 présentent le courant i_{sq} et les courants statoriques triphasés. La structure de commande tolérante proposée peut minimiser l'effet du défaut et des ondulations dans les conditions de tolérances aux défauts.

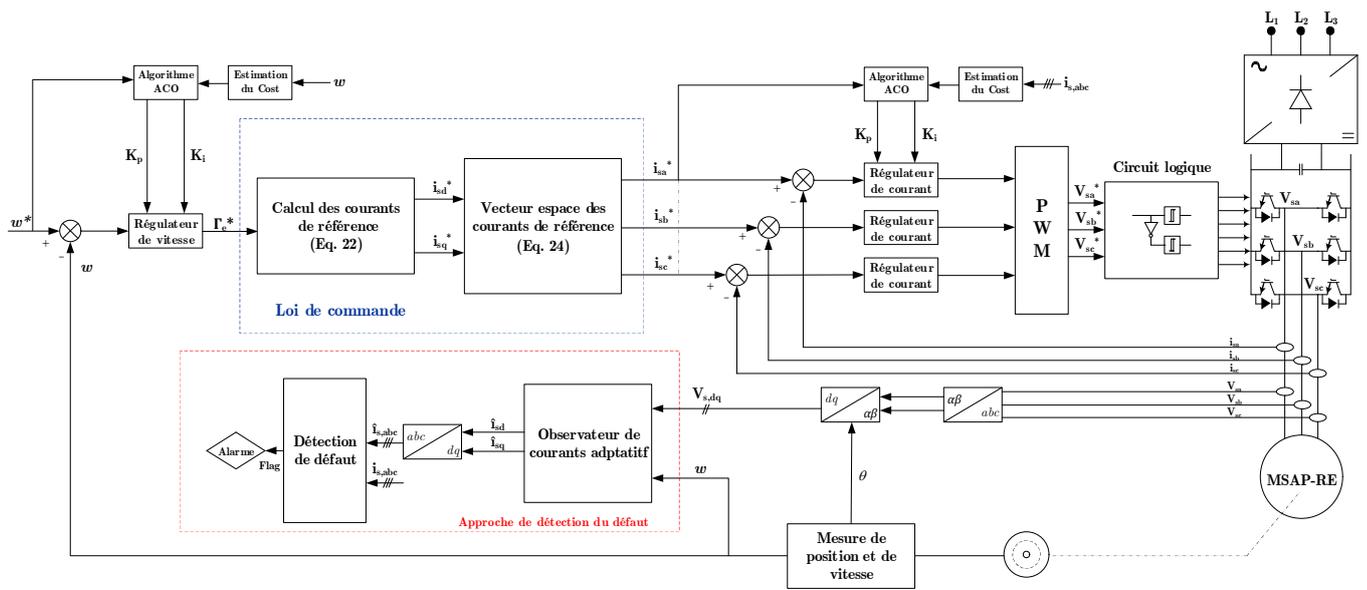


Fig. 6. Structure de contrôle de la stratégie proposée.

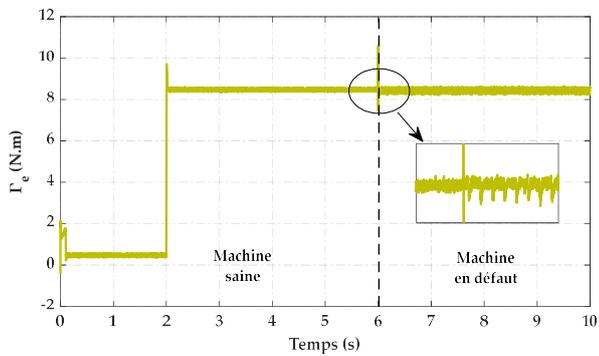


Fig. 7. Couple électromagnétique sans correction.

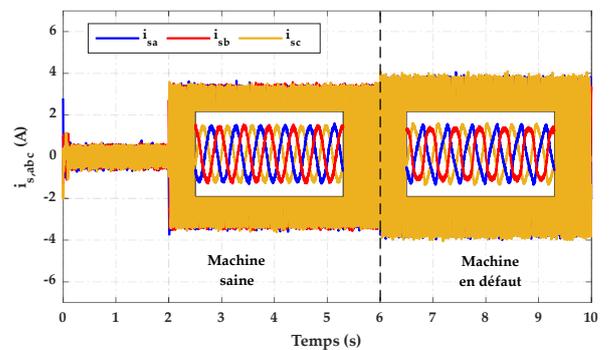


Fig. 10. Courants statoriques sans correction.

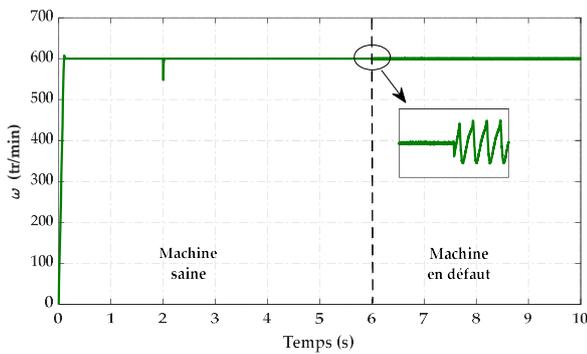


Fig. 8. Vitesse rotorique sans correction.

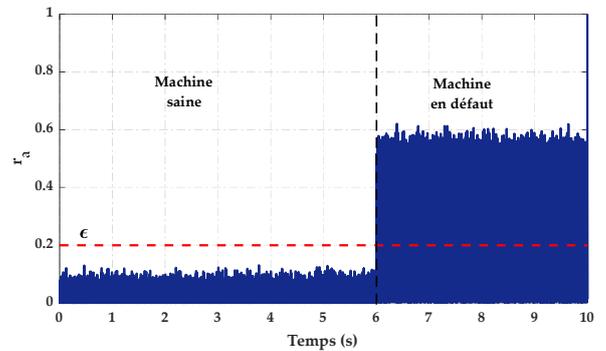


Fig. 11. Variation du signal résiduel de la phase a en cas du défaut.

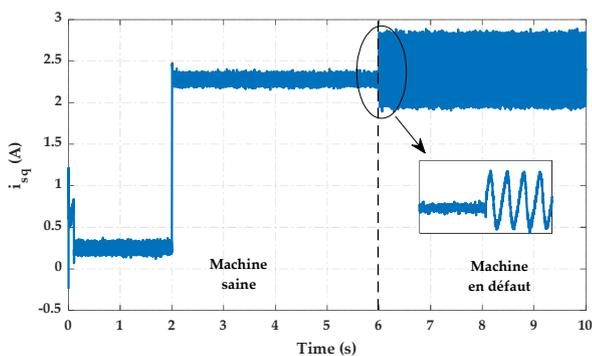


Fig. 9. Composante du courant quadratique sans correction.

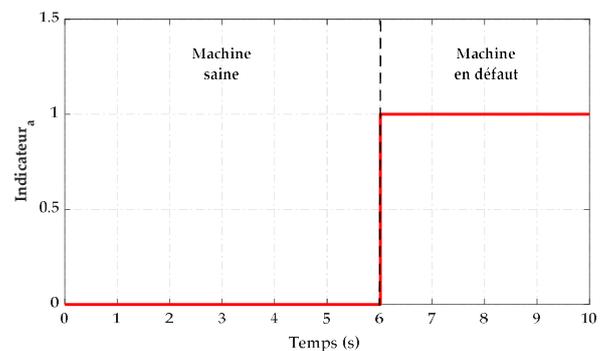


Fig. 12. Indicateur de défaut.

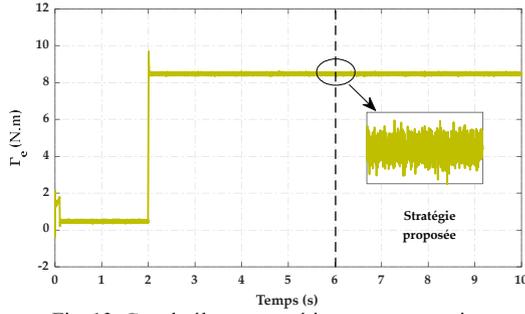


Fig. 13. Couple électromagnétique avec correction.

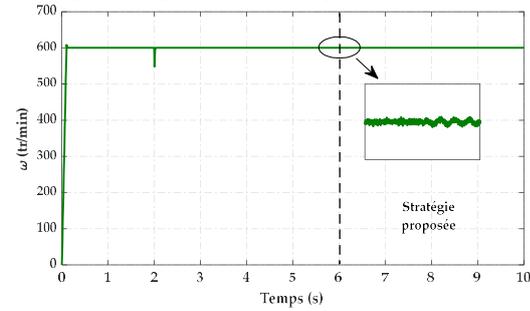


Fig. 14. Vitesse rotorique avec correction.

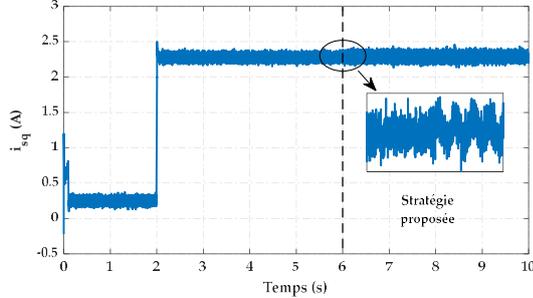


Fig. 15. Composante du courant quadratique avec correction.

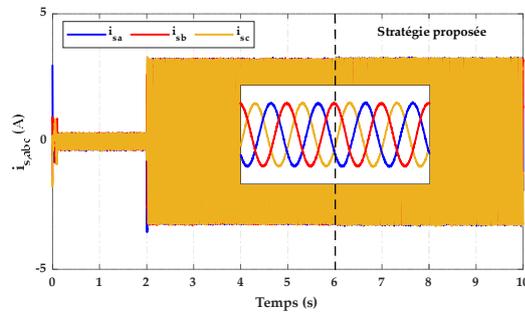


Fig. 16. Courants statoriques avec correction.

D'après différents tests pour le choix des valeurs optimales des régulateurs, nous constatons que la réponse donnée par le critère d'erreur quadratique temporelle intégrale (ITSE) est la meilleure par rapport aux autres approches et donc pour le cas présenté l'option optimale.

5. CONCLUSION

L'objectif de cet article est la détection et la réduction des ondulations de couple en cas d'un défaut de déséquilibre présent dans l'enroulement statorique. Pour cela l'algorithme de colonies de fourmis ACO s'est avéré être un outil puissant pour résoudre les problèmes d'optimisation et il est employé ici pour évaluer les paramètres des régulateurs de vitesse et de courants. La stratégie proposée repose sur le contrôle du vecteur espace du courant en injectant un courant triphasé déséquilibré dans les phases du moteur, ce qui permet de minimiser les ondulations de couple et de vitesse et ainsi de compenser le défaut. Cela évalue la faisabilité de la stratégie proposée comme commande tolérante aux défauts.

6. ANNEXE

Tableau II. Paramètres de la MSAP-RE utilisée.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Puissance P (kW)	1.5	Inductances propres L_a, L_b, L_c (mH)	2.1041
Vitesse nominale ω (tr/min)	600	Inductances mutuels M_{ab}, M_{bc}, M_{ac} (mH)	0.0832
Fréquences f (Hz)	110	Flux d'AP ϕ_{PM} (Wb)	0.1021
Bus continu V_{DC} (V)	150	Entrefer g (mm)	1.365
Courant nominal i_N (A_{RMS})	11	Rayon externe du stator R_{sext} (mm)	88.635
Couple nominal Γ_e (N.m)	24	Rayon interne du stator R_{sint} (mm)	56
Nombre de pôles $2p$	22	Rayon externe du rotor R_{rext} (mm)	93
Nombre de spires par bobine N_s	22	Rayon interne du stator R_{rint} (mm)	91.5
Resistances statorique r_{sa}, r_{sb}, r_{sc} (Ω)	0.265	Profondeur du stator L_{ave} (mm)	35

ϕ est le flux magnétique produit par une phase i traversant un enroulement de phase j ; K_w est le facteur d'enroulement; F_{dis} est la fonction de distribution de la machine; \wp est la perméance de l'entrefer; F_w est la fonction d'enroulement; θ_s est la position angulaire par rapport à l'axe de référence du stator.

7. REFERENCES

- [1] T. Orłowska-Kowalska *et al.*, "Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of PMSM Drives—State of the Art and Future Challenges," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59979–60024, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3180153.
- [2] N. Hashemnia and B. Asaei, "Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles," in *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Sep. 2008, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157.
- [3] H. Liu, D. Wang, X. Yi, and F. Meng, "Torque Ripple Suppression Under Open-Phase Fault Conditions in a Five-Phase Induction Motor With Harmonic Injection," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 9, no. 1, pp. 274–288, Feb. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2952374.
- [4] R. Cui, Y. Fan, and C. Li, "On-Line Inter-Turn Short-Circuit Fault Diagnosis and Torque Ripple Minimization Control Strategy Based on OW Five-Phase BFTHE-IPM," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 4, pp. 2200–2209, Dec. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2851615.
- [5] M. Tang, S. Odhano, A. Formentini, and P. Zanchetta, "Reuse of a Damaged Permanent Magnet Synchronous Motor for Torque Ripple and Acoustic Noise Elimination using a Novel Repetitive Observer," in *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2019, pp. 334–338. doi: 10.1109/ECCE.2019.8912822.
- [6] A. Belkhadir, R. Pusca, D. Belkhatay, R. Romary, and Y. Zidani, "Analytical Modeling, Analysis and Diagnosis of External Rotor PMSM with Stator Winding Unbalance Fault," *Energies*, vol. 16, no. 7, p. 3198, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16073198.
- [7] Y. Azzoug, M. Sahraoui, R. Pusca, T. Ameid, R. Romary, and A. J. M. Cardoso, "A Variable Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Without Current Sensors," in *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Jun. 2020, pp. 1523–1528. doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152572.
- [8] Y. Azzoug, R. Pusca, M. Sahraoui, A. Ammar, T. Ameid, R. Romary, and A. J. M. Cardoso, "An Active Fault-Tolerant Control Strategy for Current Sensors Failure for Induction Motor Drives Using a Single Observer for Currents Estimation and Axes Transformation," *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 467–474, Dec. 2021, doi: 10.18280/ejee.230606.
- [9] S. Mahfoud, A. Derouich, A. Iqbal, and N. El Ouanjli, "ANT-colony optimization-direct torque control for a doubly fed induction motor: An experimental validation," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 81–98, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.239.

