

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Electrotechnique**



**Thèse**

Préparée au sein du Laboratoire LSPIE'2000 Batna

Présentée pour l'obtention du diplôme de :  
**Doctorat LMD en Electrotechnique**  
**Option : Electrotechnique**

Sous le Thème :

**Commande & Diagnostic**  
**D'un Véhicule Electrique à Propulsion Bimoteur**  
**à Induction Défaillant**

Présentée par :

**YAHIA CHERIF Salah**

**Devant le jury composé de :**

|                           |       |                         |               |
|---------------------------|-------|-------------------------|---------------|
| M. DRID Said              | Prof. | Université de Batna 2   | Président     |
| M. BENOUDJIT Djamel       | MCA   | Université de Batna 2   | Rapporteur    |
| M. NAIT SAID Mohamed Said | Prof. | ENS-ERE-DD Batna        | Co-Rapporteur |
| M. BOUTABBA Tarek         | MCA   | Université de Khenchela | Examineur     |
| M. BENLALOUI Idriss       | MCA   | Université de Batna 2   | Examineur     |

**Septembre 2022**

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail a été préparé au sein du Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE'2000 à l'Université de Batna 2.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Djamel BENOUDJIT Maître de Conférences A, à l'Université de Batna 2 et Monsieur NAIT SAID Mohamed Saïd, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Energies Renouvelables, de l'Environnement et du Développement Durable pour avoir accepté de diriger ce travail, et pour leur contribution au développement et à la présentation des idées décrites dans ce travail. J'apprécie de tout cœur leurs qualités humaines, leur soutien, leur disponibilité ainsi que leurs précieux conseils scientifiques quotidiens qui m'ont permis de finaliser cette thèse.*

*Je remercie chaleureusement Monsieur N. NAIT SAID, Professeur à l'Université de Batna 2, directeur du laboratoire LSP-IE'2000.*

*Mes vifs remerciements à Monsieur S. DRID, Professeur à l'université de Batna 2, de m'avoir honoré pour présider le jury de soutenance de cette thèse de Doctorat. Je tiens à remercier également Messieurs T. BOUTABBA, Maître de Conférences A, à l'Université Abbès Laghrour de Khenchela, et I. BENLALOUI Maître de Conférences A, à l'Université de Batna 2, membres de jury pour avoir acceptés d'y siéger et d'examiner la présente thèse.*

*Salah Yahia Cherif*

# SOMMAIRE

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| ملخص.....                 | i   |
| Résumé.....               | ii  |
| Abstract.....             | iii |
| Notations & Symboles..... | iv  |

## *Introduction Générale*

|   |                          |    |
|---|--------------------------|----|
| 1 | Problématique.....       | 01 |
| 2 | Objectif.....            | 02 |
| 3 | Structure de thèse ..... | 02 |
|   | Références 0.....        | 03 |

## *Chapitre Un*

### **Généralités sur les Systèmes de Propulsion pour Véhicule Electrique**

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Introduction.....                                 | 04 |
| 1.2     | Définition.....                                   | 05 |
| 1.3     | Historique.....                                   | 05 |
| 1.4     | Structures de propulsion électrique.....          | 05 |
| 1.4.1   | Partie moteur électrique.....                     | 08 |
| 1.4.1.1 | Moteur à courant continu.....                     | 08 |
| 1.4.1.2 | Moteur synchrone à aimants permanents "MSAP"..... | 08 |
| 1.4.1.3 | Le Moteur synchrone à rotor bobiné.....           | 09 |
| 1.4.1.4 | Moteur à induction.....                           | 09 |
| 1.4.1.5 | Moteur à réluctance variable.....                 | 10 |
| 1.4.1.6 | Choix d'un moteur électrique.....                 | 11 |
| 1.4.2   | Partie batterie.....                              | 11 |
| 1.5     | Défaillances dans les Véhicules Electriques ..... | 12 |
| 1.5.1   | Les défauts électriques.....                      | 13 |
| 1.5.1.1 | Court-circuit.....                                | 13 |
| 1.5.1.2 | Ruptures de barres.....                           | 13 |
| 1.5.2   | Les défauts mécaniques.....                       | 14 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.5.2.1 | Excentricité.....  | 14 |
| 1.5.2.2 | Défauts de roulements.....                                 | 14 |
| 1.6     | Les Techniques de diagnostic de défaut.....                | 14 |
| 1.6.2   | Les méthodes de diagnostic avec modèle analytique.....     | 15 |
| 1.6.2.1 | Techniques d'identification.....                           | 15 |
| 1.6.2.2 | Technique d'estimation d'état.....                         | 15 |
| 1.6.2.3 | Technique de génération de résidus.....                    | 15 |
| 1.6.3   | Les méthodes de diagnostic sans modèle analytique.....     | 16 |
| 1.6.3.1 | Méthode de diagnostic par traitement du signal.....        | 16 |
| 1.6.3.2 | Méthode de diagnostic par l'intelligence artificielle..... | 16 |
| 1.7     | Conclusion.....  | 16 |
|         | Références 1.....  | 16 |

## *Chapitre Deux*

### **Modélisation du moteur à induction (Sain/Défaillant)**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2     | Introduction.....   | 19 |
| 2.1   | Modèle sain du moteur à induction.....  | 19 |
| 2.2   | Modèles de défauts statoriques du moteur à induction .....                              | 20 |
| 2.2.1 | Modèle de Smail Bachir.....   | 20 |
| 2.2.2 | Modèle du moteur à induction avec un court-circuit dans la 1 <sup>ère</sup> phase ..... | 22 |
| 2.3   | Résultats de simulation.....  | 23 |
| 2.4   | Conclusion.....   | 26 |
|       | Références 2.....   | 26 |

## *Chapitre Trois*

### **Commande du moteur à induction en présence des défauts de capteur de vitesse**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3     | Introduction.....                                   | 28 |
| 3.1   | Stratégies de commande d'un moteur à induction..... | 28 |
| 3.1.1 | Commande vectorielle à flux orienté.....            | 28 |
| 3.1.2 | Contrôle direct du couple "DTC" .....               | 30 |
| 3.1.3 | Commande par Backstepping.....                      | 31 |
| 3.2   | Défauts du capteur de vitesse.....                  | 34 |
| 3.2.1 | Défaillance totale du capteur.....                  | 34 |

|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 3.2.2 | Biais du capteur.....        | 34 |
| 3.2.3 | Défaut d'offset.....         | 34 |
| 3.3   | Résultats de simulation..... | 35 |
| 3.4   | Conclusion.....              | 41 |
|       | Références 3.....            | 42 |

## *Chapitre Quatre*

### **Structures de Commande d'un Système de Propulsion Bimoteur à Induction Saint &/ou Défaillant**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4     | Introduction.....  | 44 |
| 4.1   | Structure de commande d'un système de propulsion.....                            | 45 |
| 4.2   | Résultats de simulation.....   | 47 |
| 4.2.1 | Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par FOC.....          | 47 |
| 4.2.2 | Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par DTC.....          | 49 |
| 4.2.3 | Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par Backsteeping..... | 50 |
| 4.3   | Structure de propulsion bimoteur à induction défaillant.....                     | 51 |
| 4.3.1 | Effet du défaut de court-circuit.....  | 52 |
| 4.3.2 | Effets des défauts de capteur de vitesse.....                                    | 54 |
| 4.4   | Conclusion.....  | 60 |
|       | Références 4.....  | 61 |

## *Chapitre Cinq*

### **Emulation du couple de charge de la roue d'un système de propulsion**

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5   | Introduction.....                           | 63 |
| 5.1 | Modèle du générateur à courant continu..... | 64 |
| 5.2 | Résultats de simulation.....                | 65 |
| 5.3 | Conclusion.....                             | 69 |
|     | Références 5.....                           | 70 |

## **Conclusion Générale**

|    |                                 |    |
|----|---------------------------------|----|
| 1. | Travail accompli.....           | 72 |
| 2. | Suggestions & perspectives..... | 73 |

## **Annexe**

## ملخص

السيارة الكهربائية هي تكيف للمركبة التقليدية مع إدراج الأنظمة الكهرو ميكانيكية (المحركات الكهربائية). تعد واحدة من أكثر التقنيات الواعدة التي يمكن أن تؤدي إلى تحسينات كبيرة في أداء السيارة بالإضافة إلى تقليل الانبعاثات الملوثة. يعتمد مبدأ عمل السيارة الكهربائية على تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية من خلال المحركات الكهربائية لقيادة العجلات.

أثناء تشغيل السيارة الكهربائية (بدء التشغيل، التسارع، التباطؤ،...)، يتعرض المحرك الكهربائي باستمرار للاضطرابات، مما يؤدي أحياناً إلى حدوث أعطال (أعطال كهربائية وميكانيكية). وبالتالي، فإن معرفة الأعطال التي يمكن أن تؤثر على المحرك وتوصيف العمليات الخاطئة أصبح ضرورة لتجنب أي عطل، لا سيما في تطبيقات مثل السيارة الكهربائية حيث تكون سلامة النظام العام مهمة للغاية.

العمل المقدم في هذه الأطروحة يهتم بدراسة هيكل التحكم في نظام دفع سيارة كهربائية ذو محركين كهربائيين غير متزامنين أحدهما مصاب بأعطال، من خلال الكشف عن شدة الأعطال وتحديد موقعها (أعطال قصر الدائرة الكهربائية و أعطال حساس السرعة)، بهدف الحد من آثارها مع ضمان استمرارية الخدمة دون تدهور الأداء.

**الكلمات المفتاحية :** سيارة كهربائية، نظام الدفع، محرك غير متزامن، التحكم، أعطال.

## **RESUME**

*Le véhicule électrique est une adaptation du véhicule conventionnel avec une intégration de systèmes électromécaniques (moteurs électriques). Il semble être l'une des technologies les plus prometteuses pouvant conduire à des améliorations significatives dans les performances des véhicules ainsi que la réduction des émissions polluantes. Le principe de fonctionnement d'un véhicule électrique est basé sur la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique via des moteurs électriques, pour actionner les roues.*

*Au cours des opérations d'un véhicule électrique (démarrage, accélération, décélération, etc), le moteur électrique est continuellement exposé à des perturbations, conduisant parfois à des pannes (défauts électriques et mécaniques). Par conséquent, la connaissance des défaillances pouvant affecter le moteur et la caractérisation des fonctionnements défaillants devient donc primordiale pour éviter toute panne, en particulier dans les applications comme le véhicule électrique où la sécurité du système global est très importante.*

*Ce travail de thèse s'intéresse à l'étude d'une structure de commande bimoteur à induction défaillant, destinée pour la propulsion d'un véhicule électrique, du point de vue commande via la détection et la localisation de la gravité des défauts (défauts électriques de court-circuit & défauts de capteur de vitesse), visant à limiter leurs effets tout en permettant d'assurer la continuité du service sans dégradation des performances.*

**Mots-Clés :** *Véhicule Electrique, Structure de Propulsion, Moteur à Induction, Commande, Défauts.*

## **ABSTRACT**

*Electric vehicle is an adaptation of conventional vehicle, with an integration of electromechanical systems (electric motors). It seems to be one of the most promising technologies that can lead to significant improvements in vehicle performance as well as reducing pollution emissions.*

*The principle of an electric vehicle operation is based on the conversion of electrical energy into mechanical energy via electric motors, to drive the wheels.*

*During the electric vehicle operations (starting, acceleration, deceleration, etc.), electric motor is continuously being exposed to disturbances, leading sometimes to breakdowns (electrical and mechanical faults). Consequently, knowledge of the failures that can affect a motor and the characterization of faulty operations therefore become essential to avoid any unplanned outage, particularly in applications such as electric vehicle where safety of the global system is very important.*

*This thesis work focuses on the study of a faulty dual-induction motor control structure, intended for the propulsion of an electric vehicle, from the control point of view via the detection and localization of the faults severity (electrical short-circuit faults & speed sensor faults), aimed at limiting their effects while ensuring the continuity of service without performance degradation.*

**Keywords:** *Electric Vehicle, Propulsion Structure, Induction Motor, Control, faults.*

## NOTATIONS & SYMBOLES

|                           |   |
|---------------------------|---|
| VE                        | Véhicule Electrique   |
| s, r                      | Indices stator, rotor   |
| d, q                      | Indices de Park direct, en quadrature                             |
| $\alpha, \beta$           | Indices référentiel lié au stator                                 |
| $\theta$                  | Position du rotor par rapport au stator (angle électrique)        |
| V                         | Tension [V]   |
| i                         | Courant [A]   |
| $\Phi$                    | Flux [Wb]   |
| $\omega$                  | Pulsation mécanique [rd/s]  |
| p                         | Nombre de paire de pôles  |
| $\Omega$                  | Vitesse du rotor ( $\Omega = \omega/p$ )                          |
| $\omega_s$                | Pulsation statorique [rd/s]                                       |
| $T_e$                     | Couple électromagnétique [Nm]                                     |
| $R_s, R_r$                | Résistance par phase du stator, du rotor [ $\Omega$ ]             |
| $L_s, L_r$                | Inductances propres (cycliques) stator, rotor [H]                 |
| M                         | Inductance mutuelle (cyclique) [H]                                |
| $\sigma$                  | Coefficient de dispersion total                                   |
| J                         | Moment d'inertie des masses tournantes [ $\text{Kg.m}^2$ ]        |
| $\eta_{cc}$               | Le nombre de spires court-circuitées                              |
| $\eta$                    | Le nombre total de spires d'une phase                             |
| $\delta_f = x_{sc}$       | Le rapport de court-circuit : $\delta_f = \frac{\eta_{cc}}{\eta}$ |
| PI                        | Proportionnel Intégral  |
| $\Omega_1, \Omega_2$      | Vitesses de rotation du moteur I, moteur II en [rd/s] du véhicule |
| $\Omega_0, \Omega_{diff}$ | Vitesse du véhicule, différence de vitesse                        |

- D'autres notations spécifiques peuvent être définies dans les chapitres s'il y a lieu.

# Introduction Générale

## 1. Problématique

Face à la pollution atmosphérique croissante (l'émission de gaz à effet de serre ou encore la dégradation directe de la qualité d'air) [1-2], causée en milieu urbain par le développement incontrôlé des moyens de transports routiers, notamment la voiture à moteur thermique, le véhicule électrique (VE) possède à première vue l'avantage d'une nuisance atmosphérique locale sensiblement nulle.

Les véhicules électriques présentent de nombreuses similitudes avec les véhicules conventionnels à moteur à combustion, conduisant à dire que, le véhicule électrique est une adaptation du véhicule conventionnel avec une intégration de systèmes électromécaniques (moteurs électriques). Dans ces systèmes, la structure de propulsion électrique est la partie principale du véhicule, dont le rôle principal est de faire la liaison entre la source d'alimentation électrique (généralement des batteries) avec les roues du véhicule, en transférant l'énergie dans les deux sens selon les besoins, avec un rendement élevé, sous le contrôle du conducteur à tout moment.

En outre, comme dans les véhicules électriques, le poids des différents organes constitutifs de la chaîne de propulsion (batteries, moteurs, carrosserie, ...) a un impact direct sur la consommation énergétique, qui affecte sérieusement l'autonomie du véhicule, les principaux défis sont l'autonomie limitée et le coût élevé du véhicule. Afin d'étendre l'autonomie et de réduire les coûts, des configurations avancées dans la technologie du véhicule électrique, sont utilisées dans la littérature, en fonction du type de la structure de propulsion, du type de moteur et des techniques de commande.

Un système basé sur une commande optimale et une utilisation rationnelle de l'énergie est un enjeu majeur dans la recherche scientifique. Ainsi, il est évident que la surveillance et le diagnostic des moteurs électriques (principaux éléments dans une chaîne de propulsion pour véhicule électrique) constituent un enjeu économique et scientifique, conjuguant à la fois sécurité et continuité de service pour les entraînements électriques à vitesse variable.

Il est donc important, de détecter et d'identifier n'importe quel défaut naissant qui se produit dans le circuit électrique du moteur pour éviter toute panne [3], en particulier dans les applications comme le véhicule électrique où la sécurité du système global est très importante.

## **2. Objectif**

Dans ce contexte, et en vue de satisfaire les éléments qui font une idée directrice sur la recherche de solutions innovantes et économiques dans la technologie du véhicule électrique. Ce thème concerne une étude d'une structure de commande bimoteur à induction défaillant, destinée pour la propulsion d'un véhicule électrique, du point de vue commande via la détection et la localisation de la gravité des défauts, visant à limiter leurs effets tout en permettant d'assurer la continuité du service sans dégradation des performances.

## **3. Structure du thèse**

Le présent mémoire est constitué de cinq chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre sera consacré en premier lieu, à l'étude des systèmes de propulsion électrique (historique, définition, structures, etc.). Par la suite, on présentera les différents types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques, en identifiant les défauts qui peuvent affecter le fonctionnement du moteur électrique. On terminera par mettre en relief, quelques techniques pour le diagnostic des défauts.

Dans un premier lieu, le deuxième chapitre fera l'objet de la présentation du modèle mathématique de Park de la machine à induction à l'état sain. Dans un second lieu, il sera question de présenter les modèles du moteur à induction avec un défaut électrique naissant de court-circuit dans une phase statorique. On terminera par présenter les résultats de simulation, en faisant apparaître les évolutions au cours du temps des différentes grandeurs électriques.

Le troisième chapitre sera dédié à la présentation de trois stratégies de commande d'un moteur à induction (commande vectorielle à flux orienté, le contrôle direct du couple et la commande par Backstepping).

Ensuite, une partie du chapitre, concernera la présentation des défauts de capteur de vitesse et leurs influences sur les performances de la commande d'un moteur à induction. Enfin, de nombreux résultats de simulation viendront valider les schémas de contrôle proposés, en comparatif avec et sans le défaut de capteur considéré.

Le quatrième chapitre présentera la structure de commande bimoteur à induction sain et/ou défaillant, destinée pour la propulsion d'un véhicule électrique, du point de vue commande et localisation de la gravité des défauts (électriques et défauts de capteur de vitesse), visant à limiter leurs effets tout en permettant d'assurer la continuité du service sans dégradation des performances.

Le cinquième chapitre sera consacré essentiellement à vérifier les performances de la structure de propulsion basée sur un émulateur du couple de charge de la roue, pour des profils de charge imprévisibles, agissant sur l'un des deux moteurs électriques, rencontrés pendant la conduite du véhicule avec des manœuvres spécifiques. Cela étant par le biais d'un schéma de contrôle pour un générateur à courant continu couplé à un moteur à induction, en considérant l'effet de l'inertie de rotation.

Finalement, ce travail sera clôturé par une conclusion générale en mettant l'accent sur les perspectives probables.

## Références 0

- 1 Ehsani, M., Singh, K. V., Bansal, H. O., & Mehrjardi, R. T. (2021). *State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. Proceedings of the IEEE, 109(6), 967-984.*
- 2 Rezvani, Z., Jansson, J., & Bodin, J. (2015). *Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. Transportation research part D: transport and environment, 34, 122-136.*
- 3 Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). *Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. Mechanical systems and signal processing, 144, 106908.*

# **Chapitre Un**

## **Généralités sur les Systèmes de Propulsion Pour Véhicule Electrique**

### **1. Introduction**

Les véhicules électriques sont des solutions prometteuses pour la conservation des combustibles fossiles et la réduction de la pollution de l'air causé principalement d'émissions gazeuses et tout particulièrement des véhicules thermiques (le secteur du transport s'en partage près de 14 % des émissions de CO<sub>2</sub>), pour la santé humaine, l'environnement et un transport durable [1-3]. Cela a motivé les efforts des chercheurs scientifiques pour remplacer les véhicules à base de moteur à combustion par des systèmes électriques alternatifs durables et propres. L'électrification des transports est une approche prometteuse pour résoudre les problèmes de santé et d'environnement [1]. Ainsi, les véhicules électriques (VEs) sont considérés comme un substitut pour les véhicules à combustion. En effet, le VE offre la possibilité de zéro émissions de gaz toxiques, entretien réduit, notamment le VE tout électrique possède moins de pièces mobiles qu'un véhicule thermique (boîte de vitesse et embrayage supprimés), économie d'énergie, dans la mesure où le VE transforme pratiquement toute l'énergie stockée dans ses batteries (l'énergie cinétique du véhicule est transformée en énergie électrique pendant la décélération et le freinage, servant ainsi de générateur pour la batterie). Cependant, la technologie du VE est associée aux problèmes d'un coût initial élevé, temps de recharge plus long par rapport aux véhicules à moteur thermique, et éventuellement le véhicule électrique est exposé à de nombreux dysfonctionnements (défauts électriques et mécaniques au niveau du moteur, les défauts des capteurs, défauts des convertisseurs de puissance, etc.).

Ce chapitre, présente des généralités sur les systèmes de propulsion électrique pour véhicule électrique (définition, historique, structures). On terminera par mettre en évidence certains dysfonctionnements (défauts électriques & mécaniques) pouvant affecter le moteur dans la chaîne de propulsion du véhicule durant les différentes opérations, ainsi que la présentation sous forme condensée de quelques techniques pour le diagnostic des défauts sus indiqués.

## 1.2 Définition

Un véhicule électrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue [3-5] [22].

## 1.3 Historique

Le premier véhicule électrique a été développé en 1834 [1][6]. Au 19<sup>ème</sup> siècle, de nombreuses entreprises tentaient de concevoir des véhicules électriques avec des technologies plus avancées. Cependant, les limites de la technologie du véhicule utilisant des batteries et l'avancement rapide du véhicule à moteur thermique avec son autonomie, conduiront à la disparition des véhicules électriques dans les années trente. Au début du 21<sup>ème</sup> siècle, compte tenu de la pollution atmosphérique croissante engendrée en milieu urbain par le développement incontrôlé de la voiture à moteur thermique, un intérêt intense pour les véhicules à zéro émission a suscité un regain d'intérêt pour les véhicules électriques. Plusieurs produits du VE sont devenus disponibles depuis lors [7-9].

## 1.4 Structures de propulsion électrique

Le système de propulsion électrique est l'organe principal du véhicule électrique, la source d'énergie étant électrique (généralement des batteries), on actionne les roues par des moteurs électriques. Différents travaux de recherche présentant les structures (configurations) pour un VE et les possibilités d'association d'entraînement peuvent être trouvées dans la littérature, par exemple, un à quatre moteurs électriques, à courant continu ou moteurs à courant alternatif, avec ou sans embrayage et boîte de vitesses, etc. [10-11]. La structure de base d'un système de propulsion pour véhicule électrique est illustrée par la figure 1. Elle se compose principalement de quatre principales parties : la partie moteur électrique, la partie convertisseur de puissance, la partie commande ou contrôleur et la partie batterie. La partie contrôleur est une partie essentielle d'un VE. Ainsi, le système de propulsion électrique ne peut être conçu sans cette partie. En fait, c'est sans aucun doute indispensable pour contrôler ou optimiser les différentes opérations et ressources énergétiques durant diverses conditions de conduite (phases de démarrage, accélération, décélération, croisière et arrêt).

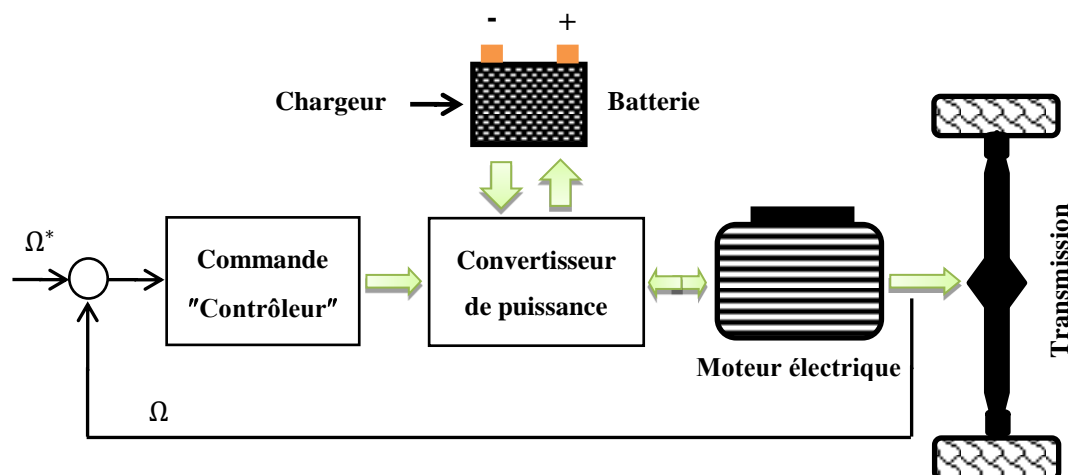


Fig. 1 Structure basique d'un système de propulsion

Pour remplacer le moteur thermique, la première structure (configuration) de base d'un système de propulsion pour VE (Fig. 2), n'utilise qu'un seul moteur associé à un embrayage et une boîte de vitesses, mais en maintenant le différentiel mécanique, dont le rôle permet d'entraîner les roues à des vitesses différentes dans les virages [10-11].

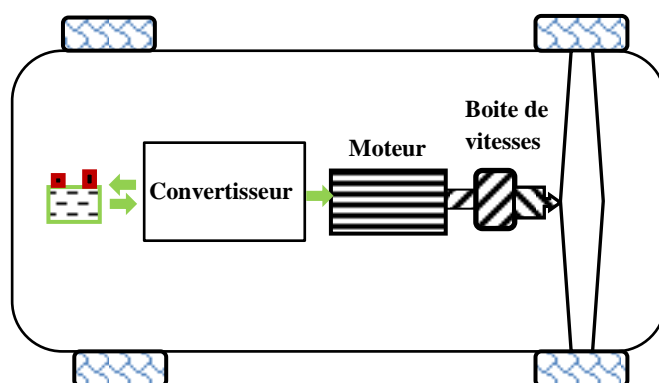


Fig. 2 Structure monomoteur

La configuration à plusieurs moteurs utilise deux ou quatre moteurs pour entraîner indépendamment des roues [13-19]. Cette structure du système de propulsion offre une transmission plus simple, plus efficace sans boîte de vitesses et sans différentiel mécanique.

Comme le montre la (Fig. 3), une solution avantageuse et intéressante consiste en l'utilisation d'une configuration bimoteur, dans laquelle deux moteurs électriques entraînent séparément les roues arrière du véhicule via un réducteur fixe (réduction de la vitesse du moteur à la vitesse de roue souhaitée et couple important élevé) [11].

Cette configuration fournit les forces de propulsion par des moteurs situés à l'intérieur des roues motrices, sans nécessiter aucun composant mécanique alors que les deux moteurs fonctionnant à des vitesses différentes sont commandés indépendamment, l'action différentielle pouvant être réalisée électriquement. Ainsi, la structure du véhicule est simplifiée et ses opérations et son efficacité peuvent être améliorées, ce qui conduit également à augmenter l'autonomie du véhicule, ce qui est un facteur important pour les véhicules électriques.

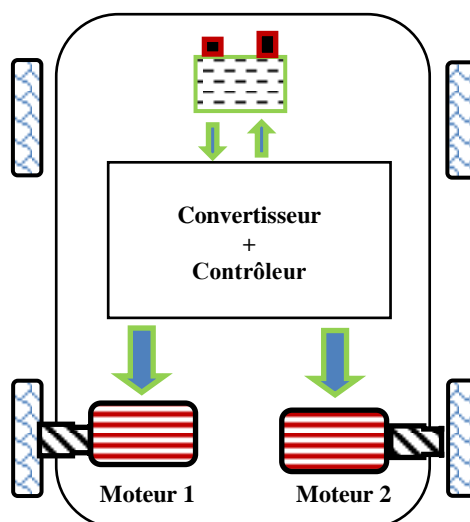


Fig. 3 Structure bimoteur

La figure 4 montre une autre configuration de propulsion pour le VE, dans laquelle quatre moteurs entraînent directement des roues (entraînement par moteur dans la roue). Cette disposition élimine tous les composants mécaniques [11].

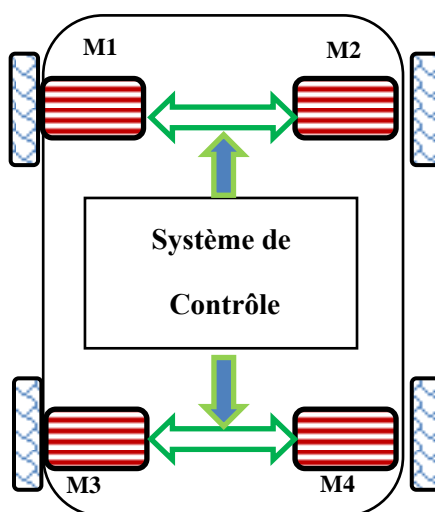


Fig. 4 Structure à quatre moteurs

### 1.4.1 Partie moteur électrique

Le moteur électrique est le dispositif qui distingue le véhicule électrique des autres types de véhicules, ce type de moteur à une meilleure efficacité de conversion énergétique que les moteurs à combustion thermique, pas d'émissions polluantes et moins de bruit.

Il existe plusieurs critères que les constructeurs de voitures électriques utilisent lors du choix d'un moteur électrique telle que : Assurer un démarrage avec un couple élevée, obtenez la vitesse maximale, conception simple et cout de fabrication faible. Il y a plusieurs types de moteur électrique utilisé dans les véhicules électriques chaque type il a des avantages et des inconvénients.

#### 1.4.1.1 Moteur à courant continu MCC

Le moteur à courant continu "MCC" l'un des premiers types de moteurs utilisés dans la motorisation des véhicules électriques, cela constitue la solution la plus économique et facile à contrôler. En raison des problèmes d'entretien régulier du système balais collecteur que cela nécessite, il a été remplacé par d'autres types [3].

#### 1.4.1.2 Moteur synchrone à aimants permanents "MSAP"

Le moteur synchrone à aimants permanents est le moteur plus utilisé par les constructeurs des véhicules électriques. L'utilisation de ce type de moteur est due à son excellent rendement, l'excitation magnétique créée par les aimants ne consomme pas d'énergie et le moteur plus léger pour une puissance et un couple maximale. Il existe des modèles de sociétés célèbres qui utilisent ce moteur : BMW i3, Toyota Prius, Tesla modèle 3.



Fig 5 BMW i3 et Tesla modèle 3

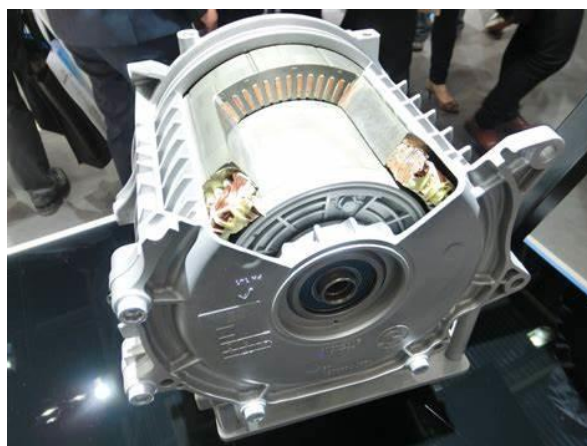


Fig. 6 Le moteur MSAP de BMW i3

#### 1.4.1.3 Le Moteur synchrone à Rotor Bobiné

Ce type de moteur n'est utilisé que par Renault. Alstom est la seule entreprise qui avait développé ce moteur pour la locomotive BB26000 "Sybic" et le TGV Atlantique (8 moteurs de 1100 kW). Ce type de moteur présente plusieurs avantages, notamment:

- Plage de vitesse à puissance maximale constante très importante,
- Fonctionnement possible à facteur de puissance unitaire, ce qui permet de minimiser les courants de phase et donc de réduire le calibre en courant des transistors du convertisseur de puissance, ou de réduire ses pertes par conduction et par commutation
- Optimisation du rendement global moteur + convertisseur dans tout le plan vitesse-couple, grâce à 3 paramètres de réglage ;
- Bon rendement (> 95 %) dans une zone très large du plan vitesse-couple, ce qui permet d'obtenir un bon rendement global.

#### 1.4.1.4 Moteur à Induction MI

Comme d'autres types de moteurs, Mercedes-Benz avec le modèle EQC 400, Audi avec le modèle e-tron, et Tesla avec ses modèles S et X ont choisi le moteur à induction cela est dû principalement aux caractéristiques :

- Conception simple et coût de fabrication faible
- Bonne robustesse mécanique de rotor
- Grande vitesse de rotation entraînant une puissance massique assez élevée



Fig. 7 Audi e-tron, Mercedes-Benz EQC

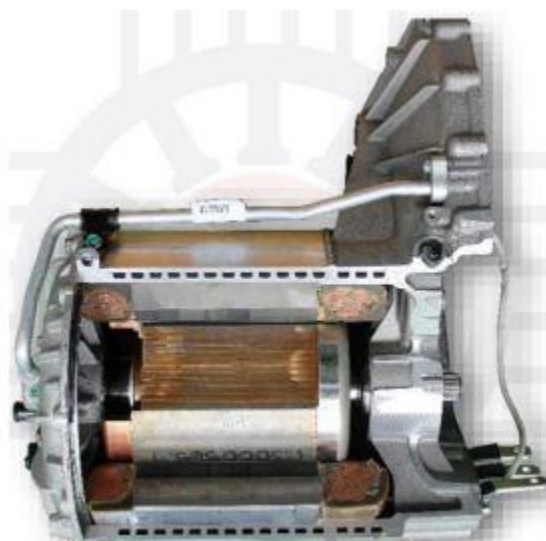


Fig. 8 Moteur à induction de Tesla modèle s

#### 1.4.1.5 Moteur a réluctance variable MRV

Dans le domaine de la propulsion électrique, le moteur réluctance variable présente de bonnes caractéristiques qui lui permettent d'être compétitif dans ce domaine, car il est conçu comme un moteur asynchrone mais avec un rapport puissance/poids très important [20].

Néanmoins, les ondulations de couple et les effets acoustiques du moteur sont des inconvénients spécifiques au moteur.

### 1.4.1.6 Choix d'un moteur électrique

Le choix du moteur de propulsion électrique et de sa transmission de puissance est initialement déterminé par les caractéristiques les plus importantes suivantes [3], [21-22]. :

- Couple élevé à bas régime (au démarrage, en accélération ou en côte),
- Vitesse maximum,
- Une stratégie de contrôle pour minimiser la consommation d'énergie (rendement élevé sur de larges plages de vitesse et de couple).

### 1.4.2 Partie batterie

La batterie est la source d'énergie la plus utilisée pour alimenter les véhicules électriques, pour assurer une autonomie variant en fonction du type et le volume. Il y a plusieurs types de batteries telle que :

#### **Batterie Lithium-ion**

La batterie Lithium-ion est le type de source d'énergie la plus utilisée actuellement dans la plupart des véhicules électriques. Par rapport aux autres batteries, les batteries lithium-ion présentent les avantages d'une énergie spécifique élevée, d'une densité d'énergie élevée par unité de masse, d'une longue endurance, d'une faible autodécharge et d'une longue durée de vie [23].



Fig. 9 Batterie lithium-ion du VE Tesla [24]

## Batteries nickel-hydrure métallique NA/MH

Les batteries NA/MH présentent des caractéristiques : large plage de températures, de capacités de charge et de décharge élevées et le respect de l'environnement [24].

### 1.5 Défaillances dans les Véhicules Electriques

Les voitures électriques dépendent fortement des systèmes électriques pour fonctionner correctement. Le contrôleur, le convertisseur de puissance, le moteur électriques et d'autres systèmes électriques et électroniques contrôlent une grande partie des fonctionnalités des voitures électriques. On se limite dans cette section à présenter les défauts qui peuvent affecter le moteur électrique à induction.

Un système de commande des moteurs électrique à haute robustesse est un enjeu important dans la recherche. Ainsi, il est évident que la surveillance et le diagnostic des machines constituent un challenge économique et scientifique, alliant sécurité et continuité de service pour les entraînements électriques.

Environ 35 à 40 % des défauts totales du moteur à induction ont lieu en raison de défauts électriques (Fig. 10).

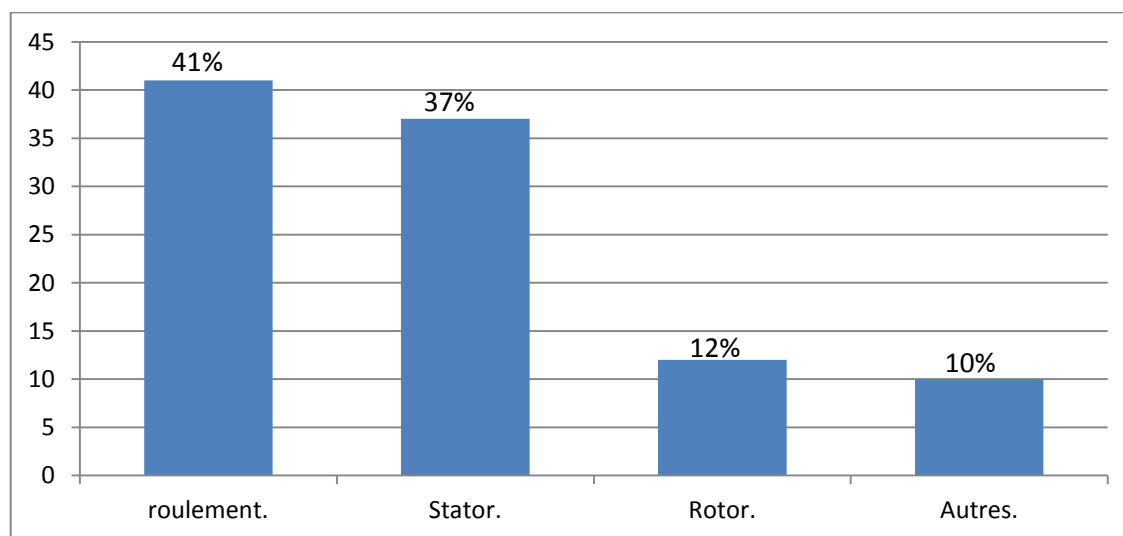


Fig. 10 Evaluation des défauts du moteur à induction [25]

La figure 11 illustre les différents défauts pouvant affecter le moteur à induction.

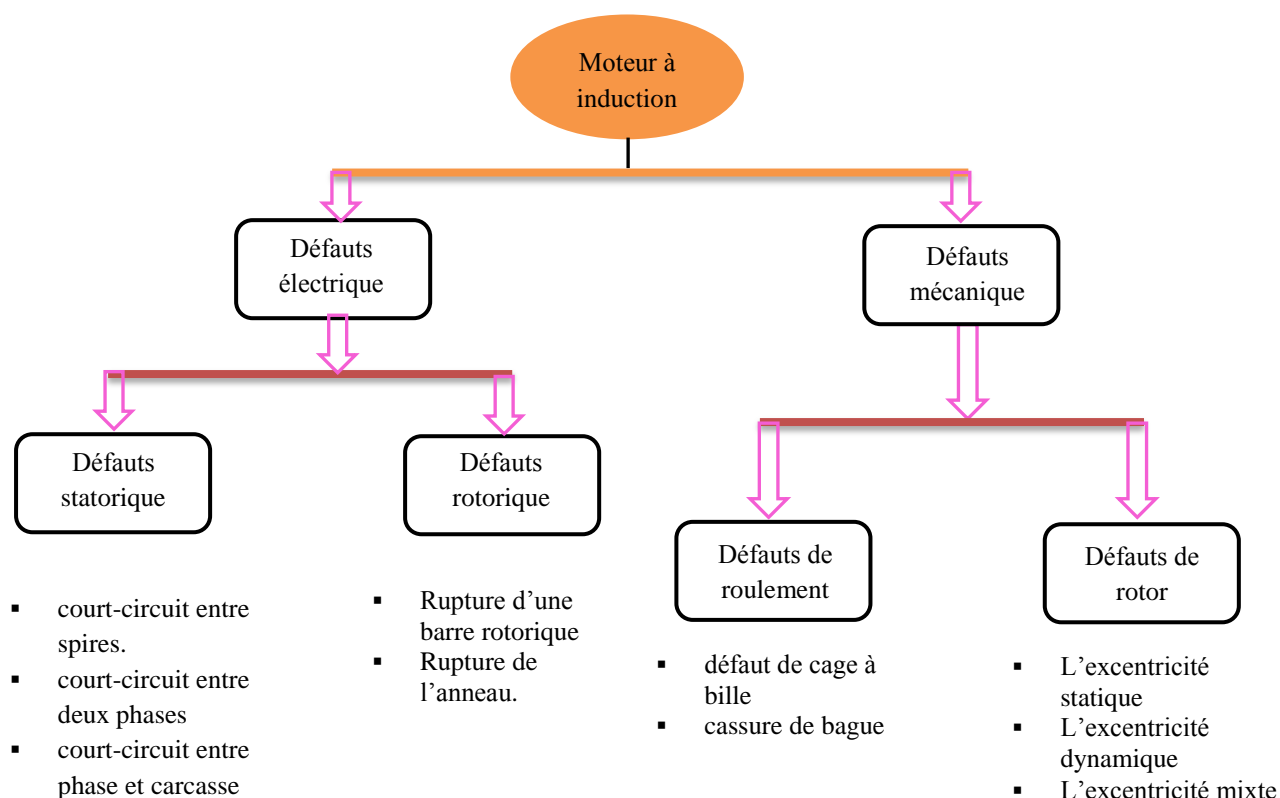


Fig.11 les défauts dans le moteur à induction

## 1.5.1 Les défauts électriques

### 1.5.1.1 Court-circuit

Le défaut de court-circuit est un défaut relativement dangereux, souvent causée par la détérioration de l'isolant. Il existe plusieurs types de défauts du court-circuit tel que le court-circuit entre spires, le court-circuit entre phase et le court-circuit entre phase et la carcasse du moteur. En raison de ce dysfonctionnement, les caractéristiques du moteur telles que la vitesse et le couple sont affectées [26].

### 1.5.1.2 Rupture de barres

Le rotor d'un moteur électrique à cage d'écureuil est constitué des barres court-circuité par des anneaux. Les défauts les plus importants qui affectent le rotor sont une rupture d'une ou plusieurs barres, une rupture de l'anneau [27].

## 1.5.2 Les défauts mécaniques

### 1.5.2.1 Excentricité

L'excentricité c'une panne mécanique dans le rotor, de plusieurs types [28] :

- Excentricité statique : le rotor n'est pas au centre du stator du moteur ou l'entrefer n'est pas le même pour le rotor.
- Excentricité dynamique : le rotor est incliné par rapport au centre de rotation.
- Excentricité mixte : il combine les deux défauts précédents.

### 1.5.2.2 Défauts de roulements

Les roulements sont des pièces plus importantes et plus sensibles dans le système mécanique. Les défauts des roulements c'est souvent dû à des erreurs de fabrication, certains défauts qui affectent le rouleau sont causés par des erreurs de fabrication, des erreurs d'installation, une mauvaise sélection du type approprié, de la rouille, un manque d'entretien et une surcharge [29].

## 1.6 Les techniques de diagnostic de défaut

Le moteur électrique sont exposés à beaucoup de défauts comme nous l'avons mentionné plus haut ce qui entraîne des dommages dans de nombreux cas, ce qui peut mettre en danger la vie du passager.

De nombreuses techniques et méthodes ont été développées pour le diagnostic rapide des défauts afin d'intervenir au bon moment et de minimiser au maximum l'impact du défaut. Dans ce qui suit, nous en aborderons quelques-uns.

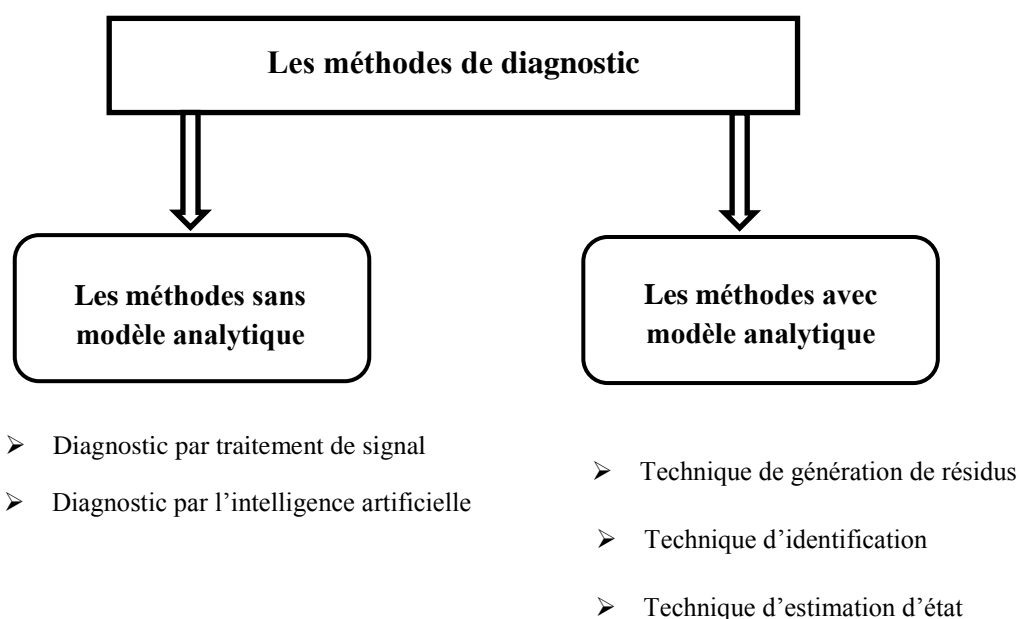


Fig.12 les méthodes de diagnostic

## **1.6.2 Les méthodes de diagnostic avec modèle analytique**

Ces méthodes se font en comparant les signaux obtenus par deux modèles, le premier étant un modèle valide, et le second modèle étant inconnu, grâce à cette comparaison, l'erreur est définie, si la différence entre les deux signaux dépasse un seuil prédéfini le défaut est indiqué [30].

### **1.6.2.1 Technique d'identification**

La technique d'identification paramétrique vise à identifier un modèle de la dynamique du système à surveiller basé sur un modèle de référence. Ce modèle est sensible aux défauts qui affectent le moteur, ce qui lui permet de les distinguer. Cette technique utilise un algorithme pour réduire l'erreur entre la sortie de la machine et celle du modèle. Grâce à cette méthode, nous pouvons surveiller et détecter certains défauts tels que : le court-circuit entre spires d'une même phase du stator, les ruptures de barres, d'excentricité statique et dynamique ...etc. [31].

### **1.6.2.2 Technique d'estimation d'état**

La méthode d'estimation d'état basé sur le filtre de Kalman et l'observateur de Luenberger, il est conçu pour comparer les sorties mesurées avec des sorties estimées, a été utilisé dans le monde de l'automatisation pour contrôler les commandes en boucle fermée. [32-33].

### **1.6.2.3 Technique de génération de résidus**

Dans cette méthode en comparant entre le modèle et le système à surveiller, des signaux sont produits (résidus) qui reflètent la taille de l'écart, ce qui révèle la présence de défauts dans le cas où certaines valeurs sont atteintes, et dans le cas sain, ces signaux se rapprochent de zéro [34].

## **1.6.3 Les méthodes de diagnostic sans modèle analytique**

Ces méthodes ne nécessitent pas la création d'un modèle de système, mais fonctionnent plutôt pour identifier les signatures de défauts, ces signatures sont classées dans une base de données et sont exploitées ultérieurement par leur analyse ou par un système expert.

### 1.6.3.1 Méthode du diagnostic par traitement de signal

Cette méthode est utilisée pour le diagnostic en raison de sa simplicité et de sa grande efficacité. Elle est basée sur la comparaison du comportement d'un système sain avec les signaux mesurés [28].

### 1.6.3.2 Méthode du diagnostic par l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle a fait une percée dans le domaine du diagnostic des pannes, ce qui a conduit à une augmentation de l'efficacité dans ce domaine important, car il comprend plusieurs technologies, telles que : les algorithmes génétiques [32], les réseaux de neurones [33], la logique floue [34]. Machine à vecteurs de support (SVM).

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence des généralités sur les systèmes de propulsion pour véhicule électrique. Nous avons également mentionné certains défauts et dysfonctionnements électriques et mécaniques pouvant affecter le moteur électrique dans la chaîne de propulsion, et à la fin de ce chapitre, nous avons fait référence à quelques méthodes utilisées dans le diagnostic des défauts.

## Références 1

- 1 Ehsani M., Singh, K.V., Bansal H.O., & Mehrjardi, R. T, "*State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles*", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 109, N°6, pp. 967-984, June 2021.
- 2 Kumar, R. R., & Alok, K., "*Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability*", *Journal of Cleaner Production*, N 253, 119911, 2020.
- 3 Sun, Y. K. "*High-capacity layered cathodes for next-generation electric vehicles*", *ACS Energy Letters*, Vol. 4, N° 5, pp. 1042-1044, 2019.
- 4 Lukasiewicz, M., Steinhorst, S., Andalám, S., Sagstetter, F., Waszecki, P., Chang, W., & Chakraborty, S, "*System architecture and software design for electric vehicles*", *Proceedings of the 50th Annual Design Automation Conference*, pp. 1-6, May 2013.
- 5 Tran, D. D., Vafaeipour, M., El Baghdadi, M., Barrero, R., Van Mierlo, J., & Hegazy, O, "*Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle power trains: Topologies and integrated energy management strategies*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109596, 2020.

- 6 Sahoo, B., Routray, S. K., & Rout, P. K., "Robust control approach for stability and power quality improvement in electric car", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 30, N° 12, e12628, 2020.
- 7 Ismadiyorov, A. A., & Sotvoldiyev, O. U., "Model of assessment of fuel consumption in car operation in city conditions", *Academic research in educational sciences*, Vol. 2, N° 11, pp. 1013-1019, 2021.
- 8 Fayziyev, P. R., Ikromov, I. A., Abduraximov, A. A., & Dehqonov, Q. M., "Timeline: History of the Electric Car, Trends and the Future Developments", *Eurasian Research Bulletin*, Vol. 6, pp. 89-94, 2022.
- 9 Standage, T., "The lost history of the electric car-and what it tells us about the future of transport", <https://www.theguardian.com/technology/2021/aug/03/lost-history-electric-car-future-transport>. Checked on, 16, 2021.
- 10 C.C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles", *Proc. of the IEEE*, Vol. 90, N° 2, pp. 247-275, Feb. 2002.
- 11 S. J. Rind, Y. Hu, J. Wang, L. Jiang, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review", *Chinese Journal of electrical engineering*, Vol. 3, N° 3, pp. 1-17, Dec. 2017.
- 12 C.C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen, "Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and Modeling", *IEEE Trans. on vehicular technology*, Vol. 59, N° 2, pp. 589-598, 2010.
- 13 L. Shao, A. E. Hartavi Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti, M. Cheng, "Design approaches and control strategies for energy-efficient electric machines for electric vehicles-A review", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 116900-116913, May 2020.
- 14 F.C. Correa, J. J. Eckert, L. C. Silva, F. M. Santiciolli, E. S. Costa, F. Giuseppe Dedini, "Study of different electric vehicle propulsion system configuration", *Proc. IEEE vehicle power and propulsion conference (VPPC)*, Montreal, QC, Canada, 19-22 Oct. 2015.
- 15 C. A. Bilațiu, S. I. Cosman, R. A. Marțiș, C. S. Marțiș, S. Morariu, "Identification and evaluation of electric and hybrid vehicles propulsion systems", *Proc. electric vehicles International Conf. (EV)*, Bucharest, Romania, 03-04 Oct. 2019.
- 16 Z. Wang, J. Zhou, G. Rizzoni, "A review of architectures and control strategies of dual-motor coupling powertrain systems for battery electric vehicles", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 162, pp. 1-20, July 2022.
- 17 S. G. Selvakumar, "Electric and hybrid vehicles – a comprehensive overview", *IEEE 2nd International Conf. on electrical power and energy systems (ICEPES)*, Bhopal, India. Dec 10-11, pp. 1-6, 2021.
- 18 C. H. T. Lee, W. Hua, T. Long, C. Jiang, L. V. Iyer, "A critical review of emerging technologies for electric and hybrid vehicles", *IEEE open Journal of vehicular technology*, Vol. 2, pp.471-485, Dec. 2021.
- 19 G. Maggetto, J. Van Mierlo, "Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey", *IEE seminar electric, hybrid and fuel cell vehicles*, Durham, UK, pp. 1-6, April 2000.
- 20 Ilea, D., "Conception optimale des moteurs à réluctance variable à commutation électronique pour la traction des véhicules électriques légers", *Thèse de Doctorat délivrée conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et l'université Technique de Cluj-Napoca, Roumanie*, 2011.
- 21 T.M. Jahns, V. Blasko, "Recent advances in power electronics technology for industrial and traction machine drives", *Proc. of IEEE Conf.*, Vol. 89, N° 6, pp. 963-975, 2001.
- 22 I. Husain, B. Ozpineci, S. Islam, E. Gurpinar, G. J Su, W. Yu, S. Chowdhury, L. Xue, D. Rahman, R. Sahu. "Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles", *Proc. of IEEE*, Vol. 109, N° 6, pp. 1039-1059, June 2021.
- 23 Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., & Du, Z, "A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles", *Energy*, Vol. 238, 121652, 2022.

- 24 Young, K. H., & Yasuoka, S., "Capacity degradation mechanisms in nickel/metal hydride batteries", *Batteries journal*, Vol. 2, N° 3, 2016.
- 25 Belhamdi, S., "Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques De Comande", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- 26 Zhang, P., Du, Y., Habetler, T. G., & Lu, B., "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, N° 1, pp. 34-46, 2010.
- 27 Ibrahim, A., "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques: Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée", Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet-Saint-Etienne, 2009.
- 28 Trajin, B., "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2009.
- 29 BAZI, S. "Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur", Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- 30 Batteux, M., "Diagnosticabilité et diagnostic de systèmes technologiques pilotés", Thèse de Doctorat, Université Paris Sud-Paris XI, 2011.
- 31 Razik, H., Corrêa, M. B. R., & Da Silva, E. R. C., "An application of genetic algorithm and fuzzy logic for the induction motor diagnosis", *IEEE 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 3067-3072, 2008.
- 32 Bouzid, M. B. K., Champenois, G., Bellaaj, N. M., Signac, L., & Jelassi, K., "An effective neural approach for the automatic location of stator inter turn faults in induction motor", *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 55, N° 12, pp. 4277-4289, 2008.
- 33 Zidani, F., Diallo, D., Benbouzid, M. E. H., & Naït-Saïd, R., "A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 55, N° 2, pp. 586-593, 2008.
- 34 Konar, P., & Chattopadhyay, P., "Bearing fault detection of induction motor using wavelet and Support Vector Machines (SVMs)", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, N° 6, pp. 4203-4211, 2011.

# Chapitre Deux

## Modélisation du Moteur à Induction (Sain/Défaillant)

### 2. Introduction

Le modèle mathématique ou bien la modélisation des machines électriques consiste en l'élaboration d'un modèle mathématique, regroupant tous les paramètres résistifs, inductifs et inertiels, permet de faire une simulation informatique approfondie, pour faciliter l'étude des caractéristiques opérationnelles de ces moteurs, que ce soit pour la commande ou bien pour la prédiction des défauts. Ainsi, il pourra être mis en évidence certains phénomènes apparaissant lors du fonctionnement de la machine et particulièrement pour sa commande. Donc il est nécessaire de définir a priori le caractère de variation des grandeurs (électromagnétiques, électromécaniques) et leurs évolutions dans le temps, pour un fonctionnement dans des conditions saines et défectueuses. Dans ce chapitre, on présentera en premier lieu, le modèle de Park du moteur à induction à l'état sain. Ensuite, on passera en revue les modèles du moteur à induction avec un défaut électrique naissant de court-circuit inter-spores d'une phase statorique. Ce chapitre, terminera avec la présentation des résultats de simulation en vue de valider l'approche de modélisation choisie.

### 2.1 Modèle sain du moteur à induction

En se basant sur des hypothèses simplificatrices, bien entendu avec l'usage des transformations conformes, le modèle de Park d'un moteur à induction sain, lié au référentiel statorique  $(\alpha, \beta)$  est donné par les expressions ci-dessous [1-2]:

Equations électriques :

$$U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}}{dt} \quad (2.1)$$

$$U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + M \frac{di_{r\beta}}{dt} \quad (2.2)$$

$$0 = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r \Phi_{rb} \quad (2.3)$$

$$0 = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + M \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \quad (2.4)$$

Equations électromagnétiques flux-courant :

$$\Phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \quad (2.5)$$

$$\Phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \quad (2.6)$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \quad (2.7)$$

$$\Phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \quad (2.8)$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_e = \frac{3}{2} p M (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (2.9)$$

## 2.2 Modèles de défauts statoriques du moteur à induction

Le système de contrôle automatique et le diagnostic d'un moteur électrique constitue un défi scientifique et économique conjuguant à la fois sécurité et continuité de service des systèmes d'entrainements à base de machines électriques. Environ 35% à 40% de la totalité des défauts du moteur à induction sont des défauts électriques [3]. Le défaut d'isolation de l'enroulement statorique due à un court-circuit inter-spires est l'un des plus sévères et fréquents défauts électriques affectant un moteur électrique [4-6]. Conduisant ainsi, à la circulation de courant induit dans les spires court-circuitées sensiblement plus élevé, donc augmentation de la température de l'enroulement jusqu'à ce que la rupture de l'isolation se produise. Par conséquent, il est primordial de pouvoir détecter et identifier un défaut électrique naissant, pour éviter d'éventuelle panne et arrêt de service. Pour la modélisation du moteur à induction défaillant, avec un défaut de court-circuit dans l'enroulement du stator, différents travaux de recherche peuvent être trouvés dans la littérature [7-13]. On se limite ici, à la présentation de deux modèles : Smail Bachir & Court-circuit 1<sup>ère</sup> phase.

### 2.2.1 Modèle de Smail Bachir [8-9]

Ce modèle se compose de deux modèles, un modèle sain et un modèle en défaut appelé différentiel, représenté par une matrice  $\mathbf{D}(x)$  dans la représentation du système d'état, prenant en compte le défaut encourt-circuit dans les trois phases, schématisé par une bobine supplémentaire court-circuitée  $B_{cc}$  dont le nombre de spires est donné par le rapport  $\eta_{cc}$ . La localisation du bobinage en défaut est repéré par l'angle électrique  $\theta_{cc}$ , où il ne peut prendre que trois valeurs  $0, \frac{2\pi}{3}$  ou  $\frac{4\pi}{3}$  correspondantes respectivement à un court-circuit sur les phases  $a_s, b_s$  ou  $c_s$  telle que schématisé sur la figure (2.1).

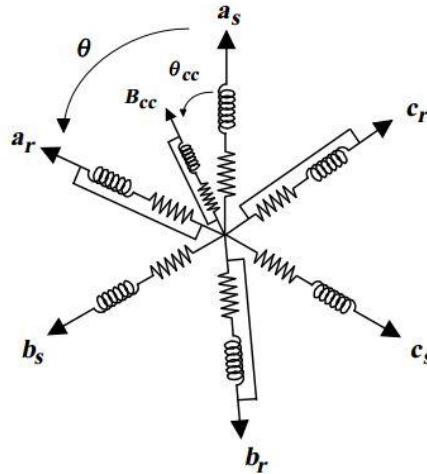


Fig. 2.1 Enroulements triphasés avec un défaut de court-circuit

Le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime transitoire dans le repère de Park donne sur la figure (2.2), en tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une ou plusieurs phases.

La représentation d'état du modèle avec défaut de court-circuit s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = A(w).x + B.U \\ Y = C.x + D(\eta_{cc}, \theta_{cc}).U \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec :

$$x = [i'_{ds} \ i'_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]^t, \quad U = [U_{ds} \ U_{qs}]^t, \quad Y = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]^t$$

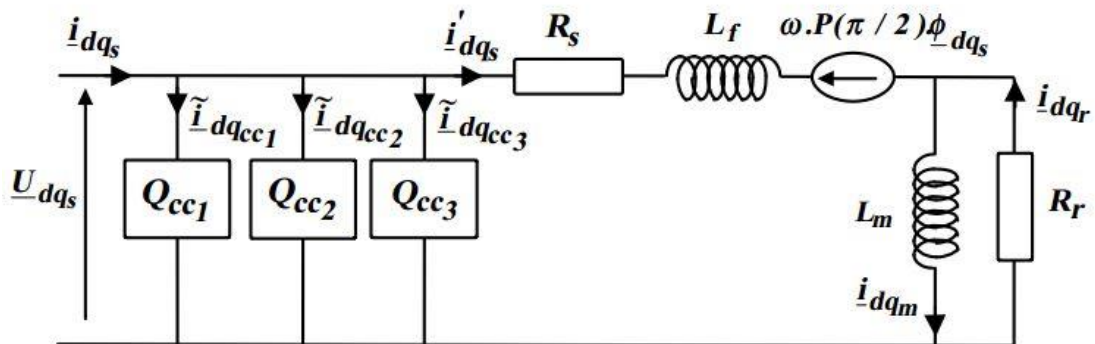


Fig. 2.2 Modèle équivalent du moteur à induction avec un défaut de court-circuit

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_r}{L_f} & p\Omega & \frac{R_r}{L_m L_f} & \frac{1}{L_f} p\Omega \\ -p\Omega & -\frac{R_s+R_r}{L_f} & -\frac{1}{L_f} p\Omega & \frac{R_r}{L_m L_f} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \end{bmatrix}^t, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$[U] = [U_{ds} \ U_{qs}], \quad D(\eta_{cck}, \theta_{cck}) = \frac{2}{3R_s} \sum_{k=1}^3 \eta_{cck} P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cck}) \cdot P(\theta).$$

$$\eta_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s} = \frac{\text{Nombre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}}.$$

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \cdot Q(\theta_{cc}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc})^2 & \cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc}) \\ \cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc}) & \sin(\theta_{cc})^2 \end{bmatrix}.$$

Avec :

$L_m = M$ : Inductance mutuelle stator-rotor;  $L_f$ : Inductance de fuite totalisée au stator,

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ : Constante de temps rotorique.

k est l'indice de phase tel que k = a, b ou c.

$\theta_{cc}$  : L'angle électrique de localisation du défaut,

$P(\theta)$  : Matrice de rotation de l'angle  $\theta$ .

### 2.2.2 Modèle du moteur à induction avec un court-circuit dans la 1<sup>ère</sup> phase

Ce modèle tient en compte le défaut de court-circuit dans la 1<sup>ère</sup> phase d'un moteur à induction. Comme illustré sur la Fig. 2.3, l'idée principale, consiste à décomposer la bobine défectueuse en deux parties, une première partie saine tandis que la deuxième est court-circuitée à travers une résistance de défaut  $R_f$ [13].

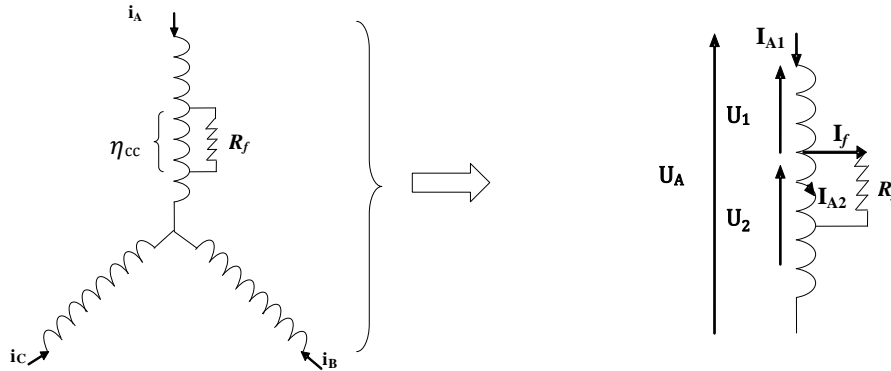


Fig. 2.3 Schéma d'un court-circuit dans la 1<sup>ère</sup> phase de stator

En se référant au schéma de la Fig. 2.3 et avec l'usage des transformations conformes (passage triphasé-biphasé, matrice de rotation), le modèle du moteur à induction défaillant avec un court-circuit dans la 1<sup>ère</sup> phase A (après toute transformation faite voir [13]), s'écrit par la représentation d'état par :

$$U = D_1 i + \omega D_2 + D_3 \frac{di}{dt} \quad (2.11)$$

Avec :

$$U = [U_{s\alpha} U_{s\beta} 0_{r\alpha} 0_{r\beta} 0_f]^t, I = [i_{s\alpha} i_{s\beta} i_{r\alpha} i_{r\beta} i_f]^t.$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -\sqrt{\frac{2}{3}}\delta_f R_s \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}}\delta_f R_s & 0 & 0 & 0 & -(R_f + \delta_f R_s) \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r & 0 \\ -M & 0 & -L_r & 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}m\delta_f \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 & \sqrt{\frac{2}{3}}\delta_f L_s \\ 0 & L_s & 0 & M & 0 \\ M & 0 & L_r & 0 & -\sqrt{\frac{3}{2}}\delta_f m \\ 0 & M & 0 & L_r & 0 \\ \delta_f \sqrt{\frac{2}{3}}L_s & 0 & m\delta_f \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 & -\delta_f^2 L_s \end{bmatrix}.$$

On définit  $\delta_f$  comme étant le rapport entre le nombre de spires court-circuitées  $\eta_{cc}$  et le nombre total des spires  $\eta$  d'une phase [13].

$$\delta_f = \frac{\eta_{cc}}{\eta}.$$

### 2.3 Résultats de simulation

La première application du modèle est sa mise en œuvre dans la simulation numérique d'un démarrage direct du moteur à vide, suivi de l'application d'un couple charge  $C_r=20N.m$  à l'instant 0,5s. Cela permet notamment d'attester en première approche la validité du modèle utilisé à l'état sain et défaillant, où le défaut d'un court-circuit dans la première phase du stator est activé à l'instant 1 s. A noter que les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du logiciel SIMULINK sous MATLAB, dont les paramètres du moteur utilisé sont consignés en annexe. Les figures 2.3(a,b) détaillent séparément l'évolution de la vitesse de rotation, du couple électromagnétique et celles des courants de phases statoriques du moteur à induction sain(modèle de Park).

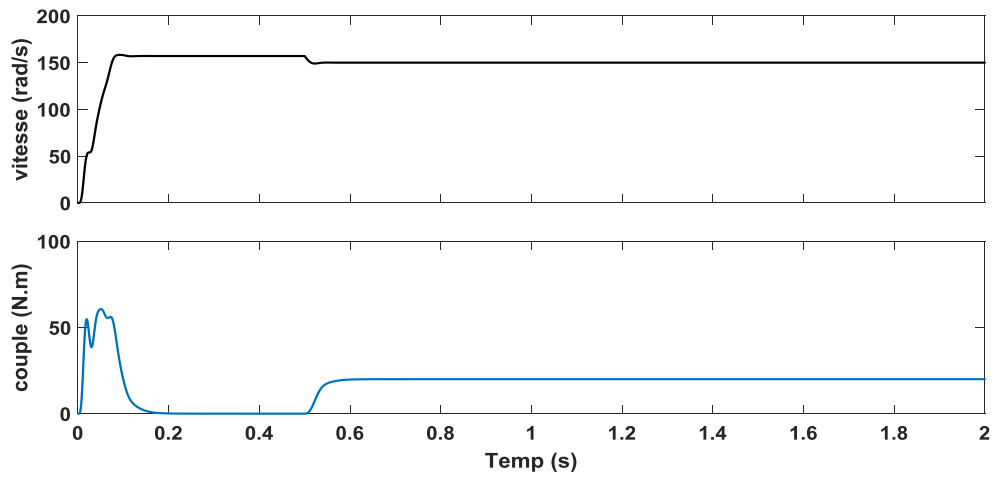


Fig. 2.3a Vitesse et le Couple du moteur à induction Sain (modèle de Park)

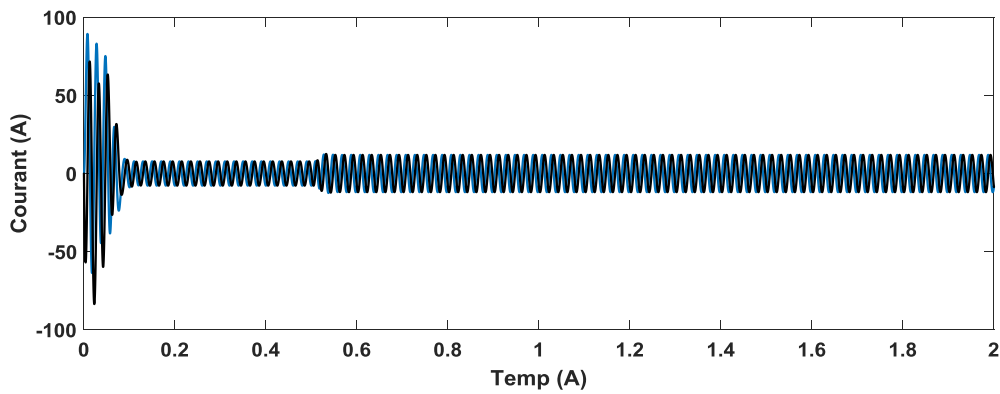


Fig. 2.3b Courant de phase statorique du moteur à induction Sain (modèle de Park)

Les figures 2.4(a,b)-2.5(a,b) pour le même profil précédent, illustrent l'évolution des mêmes grandeurs d'un moteur défaillant (modèle de Smail Bachir & le modèle [13]), suite à un court-circuit naissant au niveau de la 1<sup>ère</sup> phase du stator.

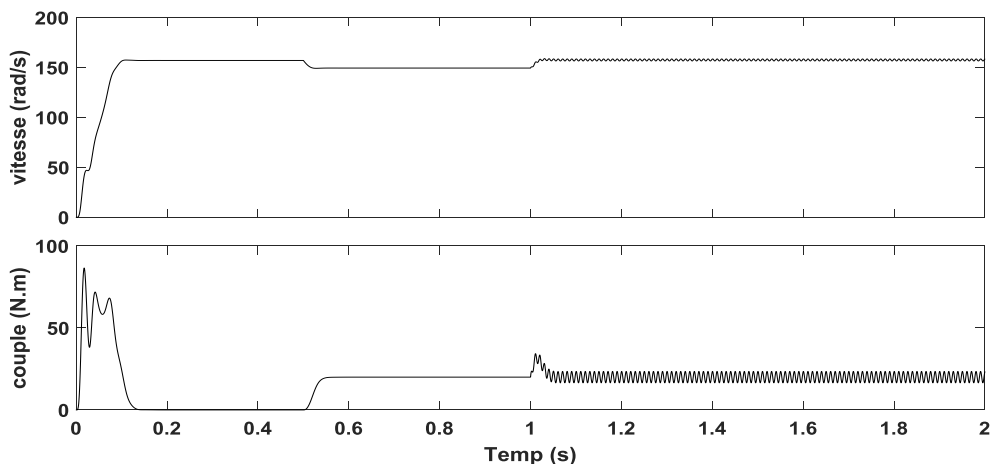


Fig. 2.4a Vitesse et couple du moteur à induction défaillant (modèle Smail Bachir)

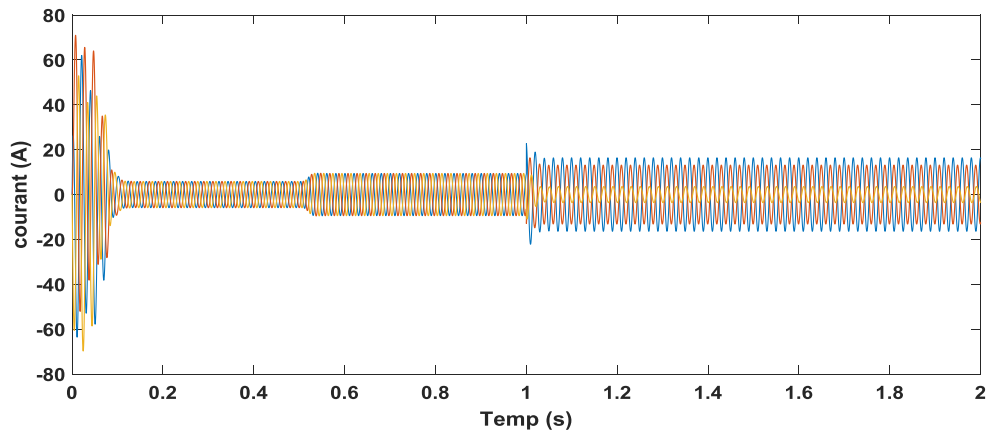


Fig. 2.4b Courant de phase statorique du moteur à induction défaillant (modèle Smail Bachir)

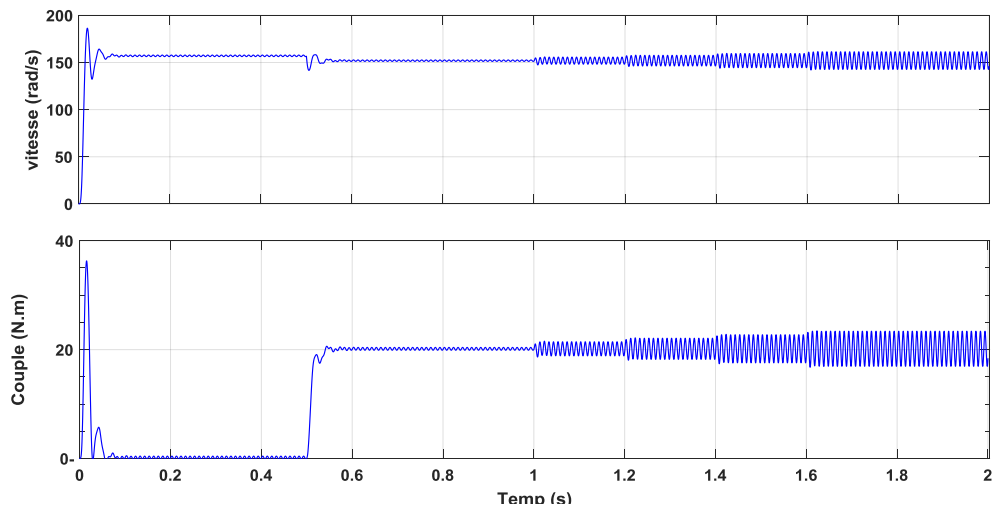


Fig. 2.5a Vitesse et Couple du modèle à induction défaillant (modèle d'un c.c. de la 1<sup>ère</sup> phase [13])

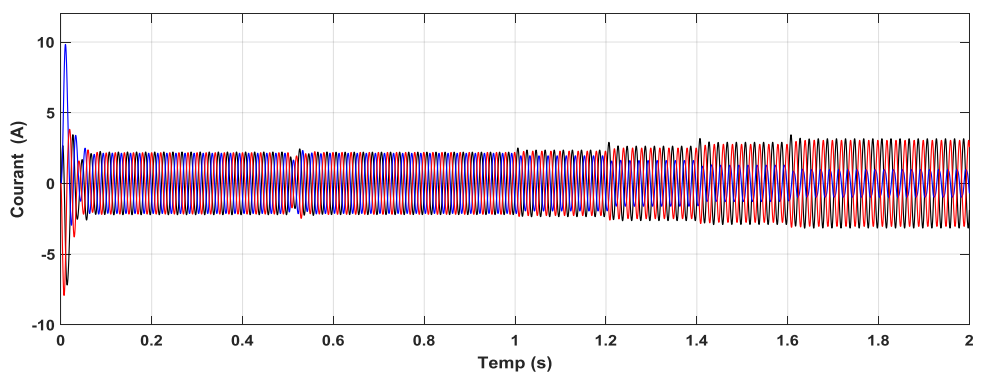


Fig. 2.5b Courant de phase statorique du moteur à induction (modèle d'un c.c. de la 1<sup>ère</sup> phase [13])

A travers les résultats de simulation pour le modèle défaillant, on constate d'emblée l'importance des courants notamment en présence du défaut de court-circuit au niveau de la première phase du stator, ainsi que son effet sur toutes les grandeurs du moteur (déséquilibre des courants et taux d'ondulation de la vitesse et du couple).

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation du moteur à induction à l'état sain et à l'état défaillant avec un défaut électrique de court-circuit naissant sur une phase de l'enroulement du stator a été présentée. Comme il a été souligné, ce défaut a été introduit dans deux modèles pour un moteur à induction par une transformation du schéma équivalent, sans tenir en compte l'effet intrinsèque de la variation de la température, mais tout en reflétant l'effet du défaut sur le fonctionnement du moteur.

Les résultats obtenus par simulation ont montré l'influence que peut avoir le défaut d'un court-circuit naissant sur les caractéristiques du moteur, notamment une nette augmentation de l'amplitude du courant dans la phase en défaut, ainsi que son effet sur l'évolution des autres phases, conduisant à l'apparition d'ondulations de la vitesse et du couple développé par le moteur, surtout pour un nombre de spires court-circuitées relativement élevé. Le moteur électrique ainsi modélisé, pourra être utilisé dans une structure de propulsion pour un véhicule électrique. A présent, le chapitre suivant concernera la commande du moteur à induction en présence des défauts de capteur de vitesse.

## Références 2

1. S.Khelfa,"*Commande Vectorielle d'une Machine à Induction, Impacts de la Saturation de laMachine et la Modélisation du Convertisseur*",Thèse de Magister, encadrée par Prof. M. SaïdNait-Saïd, Université de Batna, juillet 2001.
2. L. Baghli,"*Modélisation & Commande de la Machine Asynchrone, Notes de cours*",IUFM deLorraine- Université Henri Poincaré, Nancy 1, Paris, 2002-2003.
3. P.Gangsar, R. Tiwari, "*Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review*",Mechanical systems and signal processing, Vol. 144, pp. 1–37, October 2020.

4. M.A.Mazzoletti, G.R.Bossio, C.H.De Angelo, D.R.Espinoza-Trejo, "A Model-Based Strategy for Inter turn Short-Circuit Fault Diagnosis in PMSM",IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, N° 9, pp. 7218–7228, September 2017.
5. Y. Wu, B. Jiang, Y. Wang, "Incipient winding fault detection and diagnosis for squirrel-cage induction motors equipped on CRH trains",ISA Transactions, Vol. 99, pp. 488–495, 2020.
6. J.B. Tegui, G.C.F. God promesseKenne, "Induction Motor Windings Faults Detection Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System Estimator",International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT), Vol. 23, N°2, pp. 66–86., 2 November 2020.
7. B. Vaseghi, N.Takorabet, F. Meibody-Tabar, "Transient finite element analysis of induction machines with stator winding turn fault", Prog. Electromag. Res.; Vol. 95, pp. 1–18, 2009.
8. S. Bachir, S. Tnani, JC. Trigeassou, G. Champenois,"Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines",IEEE Trans. Ind. Electron Vol. 53, pp. 963–73, 2006.
9. S. Bachir, "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique", Thèse de Doctorat, Poitiers, Paris, 2002.
10. S.S. Dhamal, MV. Bhatkar, "Modelling and Simulation of Three-Phase Induction Motor to Diagnose the Performance on Inter-Turn Short Circuit Fault in Stator Winding", International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), 28-29 Sept. pp. 1166–1172, Greater Noida, India, 2018.
11. A. Hamoudi, B. Kouadri, "On-Line Stator Winding Inter-Turn Short-Circuits Detection in Induction Motors Using Recursive Levenberg-Marquardt Algorithm" International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 9, N°1, p. 42–57, March 2017.
12. M. Bouakoura,"Contribution au Diagnostic et à la Gestion d'une Commande Tolérante pour une Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en Sciences sous la direction du prof. M.S, Naït-Saïd, Université de Batna 2, 2019.
13. M. Bouakoura, M.S.Naït-Saïd, N. Nait-Said, N., "Incipient Inter-Turn Short Circuit Fault Estimation Based on a Faulty Model Observer and ANN-Method for Induction Motor Drives", Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, Vol. 12, pp. 1–7, 2019.

## Chapitre Trois

### Commande du Moteur à Induction en Présence des Défauts de Capteur de Vitesse

#### 3. Introduction

A travers les avancées technologiques et les outils de calcul, les modèles des machines électriques se sont affinés, des exigences nouvelles vis-à-vis de la commande voient le jour. La simplicité de conception, la robustesse et le moindre coût énergétique deviennent les critères les plus importants dans de nombreuses applications. On s'oriente alors à développer des modèles de système de commande les plus complets possibles, capable de rendre compte du fonctionnement dynamique de la machine. Ils sont le reflet des recherches destinées à optimiser la machine afin de lui conférer un bon rendement. L'objectif de ce chapitre est de présenter en premier lieu, trois différentes stratégies de commande d'un moteur à induction à savoir : la commande vectorielle à flux orienté, le contrôle direct du couple "DTC" et la commande par Backstepping. Ensuite, on s'intéresse à la présentation des défauts de capteur de vitesse et leurs influences sur les performances de la commande d'un moteur à induction. Enfin, de nombreux résultats de simulation viendront valider les schémas de contrôle proposés, en comparatif avec et sans le défaut de capteur considéré.

#### 3.1 Stratégies de Commande d'un Moteur à Induction

##### 3.1.1 Commande Vectorielle à Flux Orienté

La commande vectorielle à flux rotorique orienté dans sa forme la plus simple (méthode indirecte) consiste à contrôler de façon indépendante le terme de flux et le terme decourant pour imposer un couple. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine à courant continu [1-3]. Le modèle mathématique d'un moteur à induction après l'orientation du flux rotorique est donné par :

Les équations des tensions statoriques :

$$v_{sd} = \left( R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} \right) + e_q \quad (3.1)$$

$$v_{sq} = \left( R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} \right) + e_d \quad (3.2)$$

Les termes de couplage sont définis par :

$$e_q = \omega_s \left( \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r} \phi_r \right) \quad (3.3)$$

$$e_d = \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} - \sigma L_s \omega_s i_{sq} \quad (3.4)$$

Le flux rotorique n'est pas directement accessible, mais peut être estimé à partir des grandeurs statoriques (composante directe du courant statorique) :

$$\phi_r = \frac{M}{1+T_r s} i_{sd} \quad (3.5)$$

L'angle d'orientation du flux rotorique est donné par la position déduite de la pulsation d'autopilotage :

$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int \left( \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_{rd}} + p\Omega \right) dt \quad (3.6)$$

Le couple développé par le moteur s'écrit :

$$T_e = p \frac{M}{L_r} \phi_{rd} i_{sq} \quad (3.7)$$

La figure 3.1 présente le schéma bloc de la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté d'un moteur à induction.

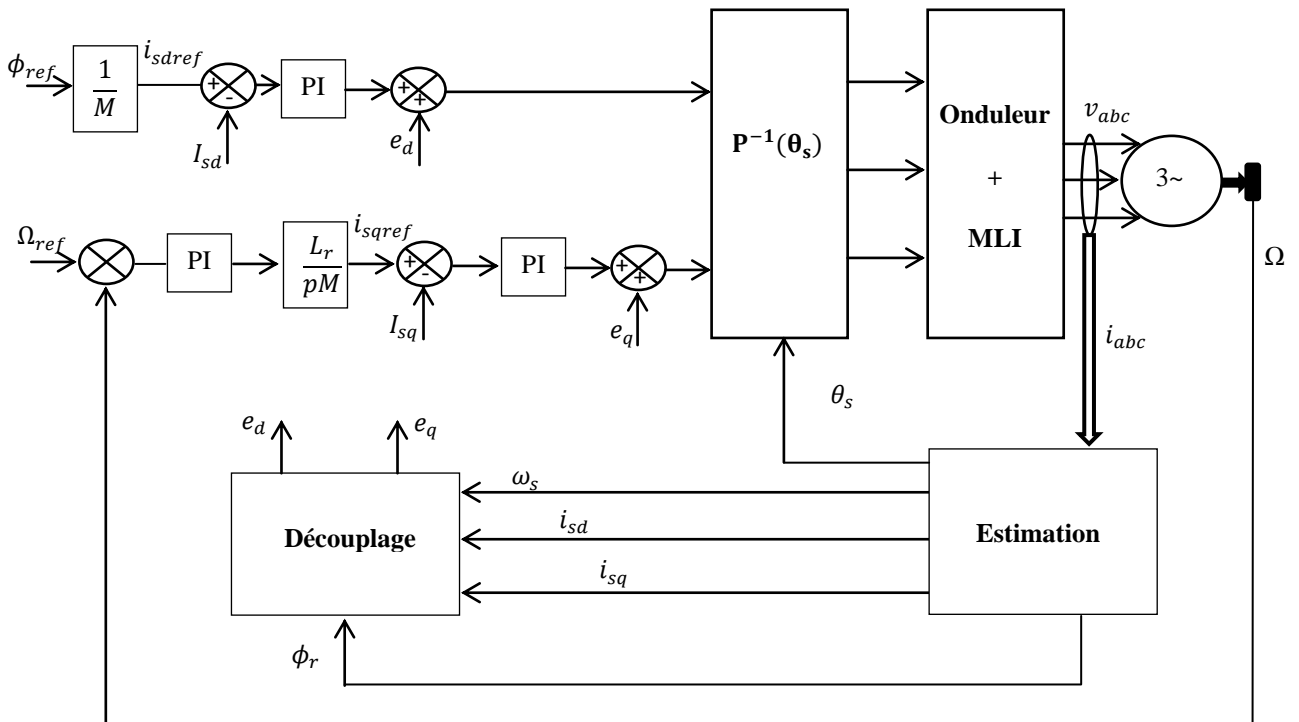


Fig. 3.1 Schéma fonctionnel de la commande vectorielle indirecte d'un moteur à induction

### 3.1.2 Contrôle direct du couple "DTC"

Le contrôle direct du couple (Direct Torque Control, en anglais), est une commande basée sur l'orientation du flux statorique. Le couple et le flux sont directement imposés par la détermination directe de la séquence de commande appliquée aux interrupteurs d'un onduleur de tension. L'optimisation de ces séquences de commutation peut conduire à une diminution des ondulations de couple et de bruit acoustique [4-5]. Le modèle mathématique de cette commande est définie par :

L'équation du flux statorique est donnée par :

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int_0^t (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \phi_{s\beta} = \int_0^t (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (3.8)$$

La position de l'angle du flux estimé est déterminée par l'expression ci-dessous :

$$\theta = \text{Arctan} \left( \frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \right) \quad (3.9)$$

L'équation du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$T_e = p(\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (3.10)$$

Le schéma bloc du moteur à induction commandé par DTC est donné par la Fig. 3.2.

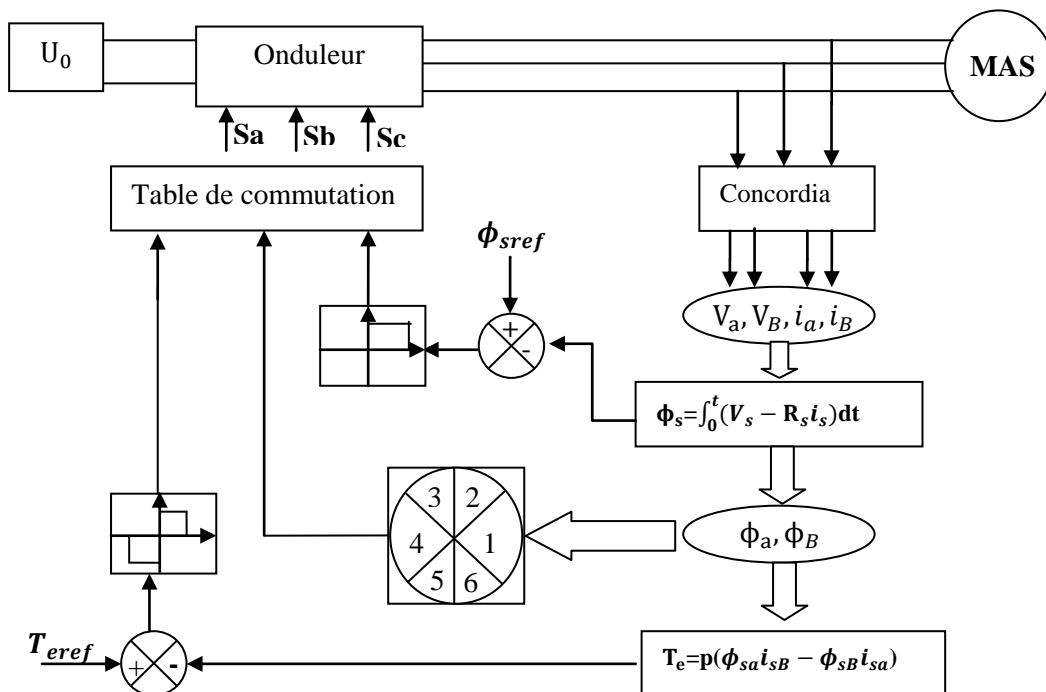


Fig. 3.2 Schéma fonctionnel de la commande directe du couple d'un moteur à induction

La table ci-dessous, donne l'état de commande des interrupteurs de l'onduleur, en fonction du secteur et de l'évolution du flux et du couple on peut choisir le vecteur tension  $V_s$  à appliquer de manière à respecter la consigne du flux et de couple. L'élaboration de la table se base principalement sur les erreurs de flux  $\Delta\phi_s$  et de couple  $\Delta T_e$  et selon la position du vecteur de flux statorique.

Table : 3.1 Table de la stratégie d'une commande DTC

| $\Delta\phi_s$ | $\Delta T_e$ | Sect.1 | Sect.2 | Sect.4 | Sect.5 | Sect.6 | Sect.7 |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1              | 1            | $V_6$  | $V_2$  | $V_3$  | $V_1$  | $V_5$  | $V_4$  |
|                | 0            | $V_7$  | $V_0$  | $V_7$  | $V_0$  | $V_7$  | $V_0$  |
|                | -1           | $V_5$  | $V_4$  | $V_6$  | $V_2$  | $V_3$  | $V_1$  |
| 0              | 1            | $V_2$  | $V_3$  | $V_1$  | $V_5$  | $V_4$  | $V_6$  |
|                | 0            | $V_0$  | $V_7$  | $V_0$  | $V_7$  | $V_0$  | $V_7$  |
|                | -1           | $V_1$  | $V_5$  | $V_4$  | $V_6$  | $V_2$  | $V_3$  |

### 3.1.3 Commande par Backstepping

La commande par Backstepping permet de manière séquentielle et systématique de construire une fonction de Lyapunov stabilisante.

L'idée principale de cette méthode consiste à sélectionner de manière récursive les variables d'état appropriées afin d'assurer la convergence des erreurs vers zéro et de réaliser la stabilité et l'équilibre du système [6-8].

Le modèle du moteur à induction incluant les deux dynamiques électriques et mécaniques, dans le référentiel d,q lié au champ tournant, bien entendu, après orientation du flux rotorique est donné par [8-9] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{pM}{JL_r} \phi_r i_{sq} - \frac{T_L}{J} \\ \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_r \\ \frac{di_{sd}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{M^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}\right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} U_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{M^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}\right) i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{M\omega}{\sigma L_s L_r^2} \phi_r + \frac{1}{\sigma L_s} U_{sq} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

La technique par backstepping se résume principalement en deux étapes. Pour la première étape, l'objectif est de remplacer le régulateur classique proportionnel intégral PI, en calculant les valeurs de références des composantes du courant statorique ( $i_{sd}^*$ ,  $i_{sq}^*$ ).

Dans notre cas, les dynamiques des erreurs de poursuites de la vitesse de rotation ( $\dot{e}_\Omega$ ) et du flux rotorique ( $\dot{e}_\phi$ ), en utilisant les expressions du système d'équations (3.11), sont définies comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_\Omega = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} = \dot{\Omega}^* - \frac{1}{J} \frac{pM}{L_r} \phi_r i_{sq} + \frac{T_L}{J} \\ \dot{e}_\phi = \dot{\phi}_r^* - \dot{\phi}_r = \dot{\phi}_r^* - \frac{M}{T_r} i_{sd} + \frac{1}{T_r} \phi_r \end{cases} \quad (3.12)$$

Ensuite, par un choix approprié de la fonction de Lyapunov  $V_1$  du système décrit précédemment, telle que :

$$V_1 = \frac{1}{2} (e_\Omega^2 + e_\phi^2) \quad (3.13)$$

Pour laquelle sa dérivée  $\dot{V}_1$  doit être négative pour garantir la stabilité du système :

$$\begin{cases} \dot{e}_\Omega = -k_\Omega \cdot e_\Omega \\ \dot{e}_\phi = -k_\phi \cdot e_\phi \end{cases} \quad (3.14)$$

Avec :  $k_\Omega, k_\phi$  des coefficients positives.

Les valeurs de références des composantes du courant du stator, sont données par :

$$\begin{cases} i_{sd}^* = \frac{J L_r}{p M \phi_r} \left( \dot{\Omega}^* + K_\Omega e_\Omega + \frac{1}{J} T_L \right) \\ i_{sq}^* = \frac{T_r}{M} \left( \dot{\phi}_r^* + K_\phi e_\phi + \frac{1}{T_r} \phi_r \right) \end{cases} \quad (3.15)$$

Dans la deuxième étape, l'objectif principal est d'arriver à déterminer la grandeur d'entrée du contrôle, en calculant la référence de la tension du stator (composantes de la tension  $U_{sd}^*$ ,  $U_{sq}^*$ ). Pour se faire, on définit les expressions des erreurs du courant du stator, exprimées par leurs dérivées comme suit :

$$\begin{cases} \dot{e}_{id} = \dot{i}_{sd}^* - \dot{i}_{sd} \\ \dot{e}_{iq} = \dot{i}_{sq}^* - \dot{i}_{sq} \end{cases} \quad (3.16)$$

En remplaçant les expressions des courants du système (3.10) dans (3.15), il vient :

$$\begin{cases} \dot{e}_{id} = \dot{i}_{sd}^* - d_1 - \frac{1}{\sigma L_s} U_{sd} \\ \dot{e}_{iq} = \dot{i}_{sq}^* - d_2 - \frac{1}{\sigma L_s} U_{sq} \end{cases} \quad (3.17)$$

Avec :

$$\begin{cases} d_1 = - \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{M^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} \right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{M R_r}{\sigma L_s L_r^2} \phi_r \\ d_2 = - \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{M^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} \right) i_{sq} - \omega_s i_{sd} - \frac{M \omega}{\sigma L_s L_r} \phi_r \end{cases} \quad (3.18)$$

A partir des expressions du système (3.16), la tension d'alimentation du stator (composantes de la tension d'entrée), peut être déterminé, en définissant une autre fonction de Lyapunov sous la forme :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}(e_{id}^2 + e_{iq}^2) \quad (3.19)$$

Sa fonction dérivée est toujours négative, de manière à vérifier :

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - k_{id}e_{id}^2 - k_{iq}e_{iq}^2 \quad (3.20)$$

Avec :  $k_{id}, k_{iq}$  des coefficients positives.

Finalement, les composantes de la tension d'entrée sont choisies comme suit :

$$\begin{cases} U_{sd}^* = \sigma L_s (\dot{i}_{sd}^* - d_1 + k_{id}e_{id}) \\ U_{sq}^* = \sigma L_s (\dot{i}_{sq}^* - d_2 + k_{iq}e_{iq}) \end{cases} \quad (3.21)$$

La figure 3.4 montre nous le schéma bloc de la commande Backstepping d'un moteur à induction [9].

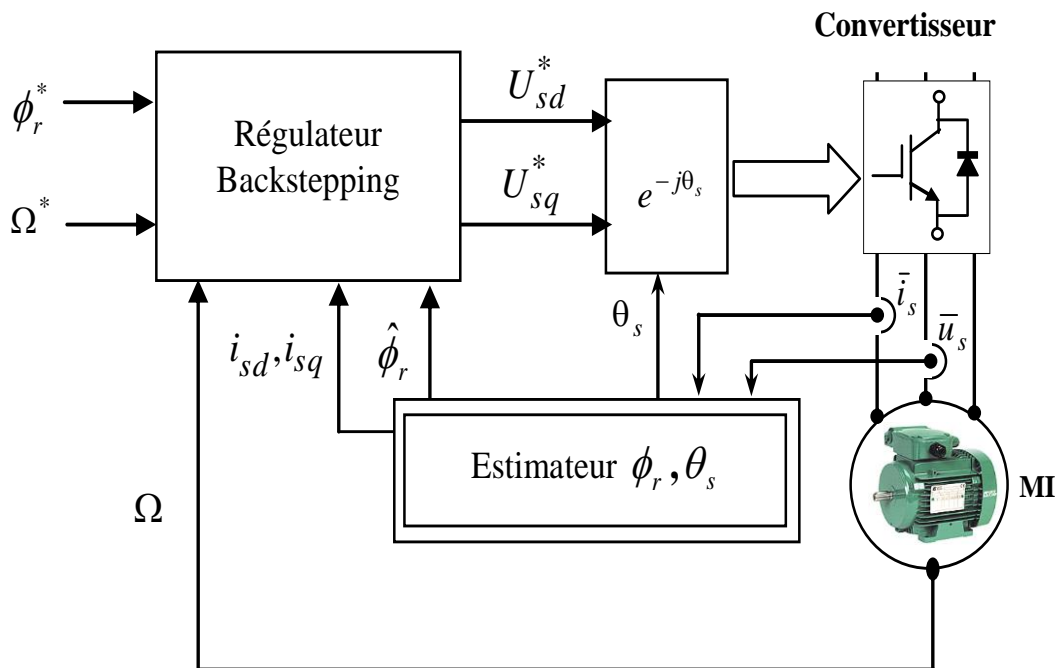


Fig. 3.3. Schéma bloc de la commande Backstepping d'un moteur à induction

### 3.2 Défauts du capteur de vitesse

Généralement, il existe trois types de défauts dans un système de commande d'un moteur à induction : défauts électriques, défauts mécaniques et défauts de capteurs [10]. Les défauts du capteur sont l'un des problèmes majeurs rencontrés dans les applications industrielles [11]. En effet, dans certaines conditions de fonctionnement, l'efficacité du capteur diminue avec le temps, produisant ainsi des défauts.

Dans cette partie, on présentera trois types de défauts qui peuvent affecter un capteur de vitesse (défaillance totale du capteur, biais du capteur et défaut d'offset). A travers les résultats de simulation, on illustre l'effet et l'influence des défauts du capteur de vitesse sur les performances de la commande d'un moteur à induction.

#### 3.2.1 Défaillance totale du capteur

Ce défaut est le plus dangereux car le capteur soudainement, cesse de fonctionner et n'émet aucun signal à la sortie (Zero Feedback : perte totale de l'information)[10-13]. Cette panne peut être due à des problèmes électriques ou de communication [11].

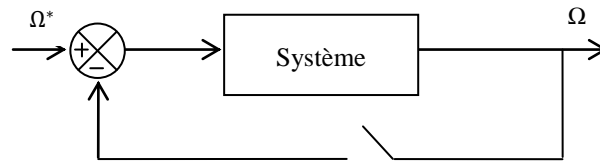


Fig. 3.4. Schéma bloc d'une défaillance totale du capteur

#### 3.2.2 Biais de capteur

Sachant que toute opération de mesure est entachée d'une certaine imprécision qui constitue l'erreur de mesure, il arrive que le capteur à un instant donné, délivre toujours à sa sortie la même valeur (biais constant) [10].

#### 3.2.3 Défaut d'offset

Un défaut d'offset représente un décalage constant entre la vitesse réelle et sa valeur mesurée par le capteur [10].

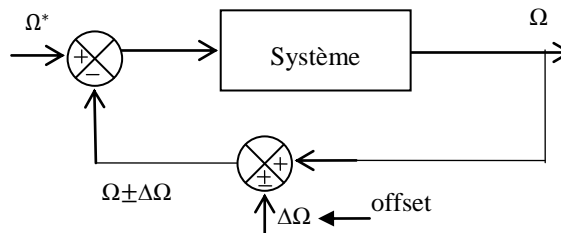
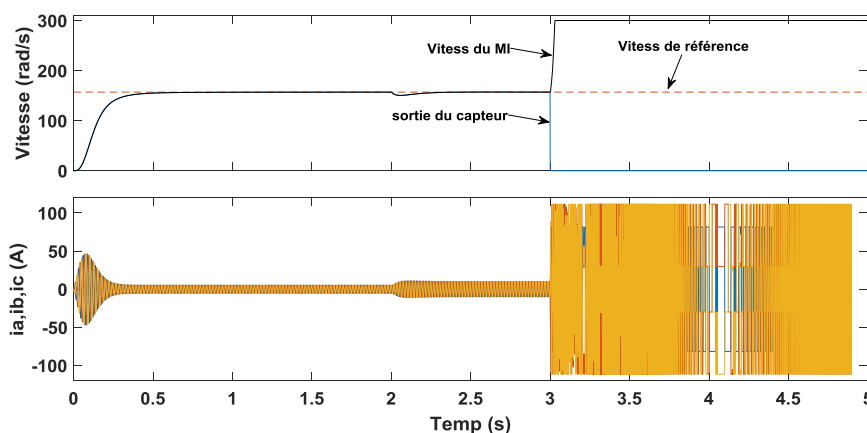


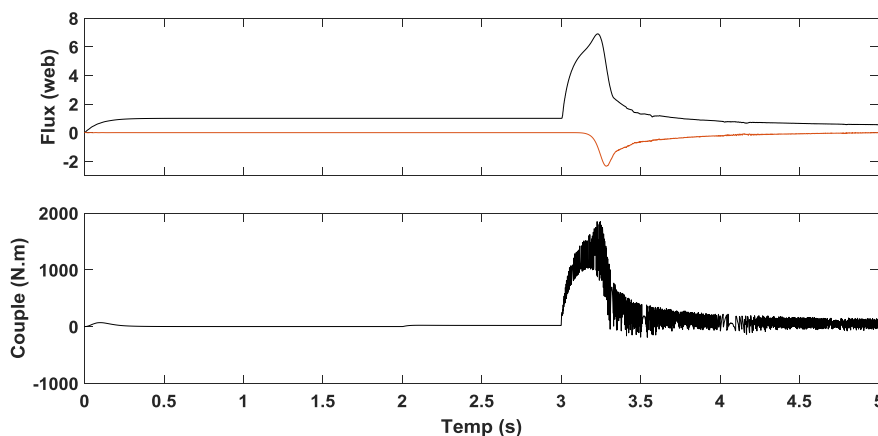
Fig. 3.6 Schéma bloc du défaut d'offset

### 3.3 Résultats de simulation

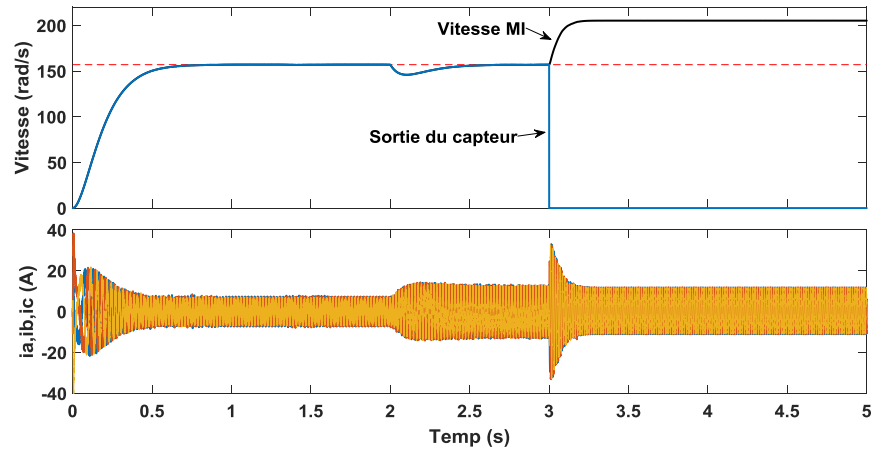
Les figures 3.7((a,a1), (b,b1), (c,c1)), 3.8((a,a1), (b,b1), (c,c1)) et 3.9((a,a1), (b,b1), (c,c1)) détaillent séparément l'évolution des réponses de la vitesse du MI (moteur à induction), le courant du stator, la sortie du capteur, le Flux et le couple pour chaque défaut du capteur de vitesse précédemment indiqué appliqué à l'instant  $t = 3s$ , pour un moteur à induction commandé par trois stratégies (FOC, DTC et Backstepping), avec l'application d'un couple de charge  $C_r = 20 \text{ N.m}$  à l'instant  $t = 2 \text{ s}$ .



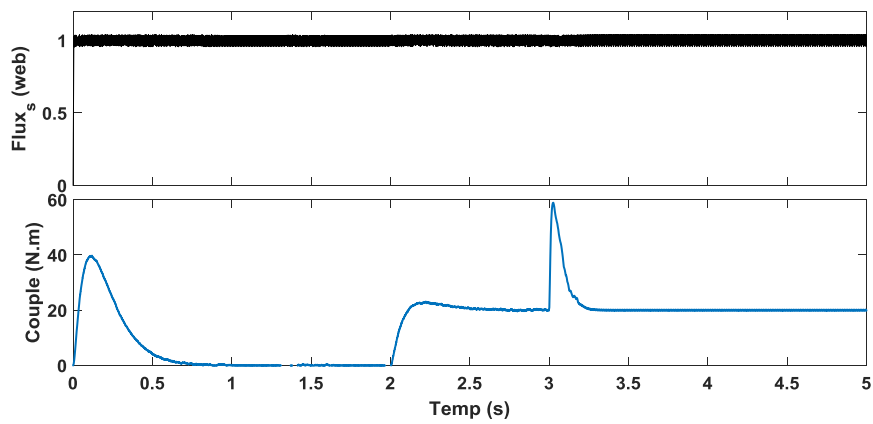
**Fig. 3.7a** Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse et courant du stator du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un défaut de capteur zéro feedback



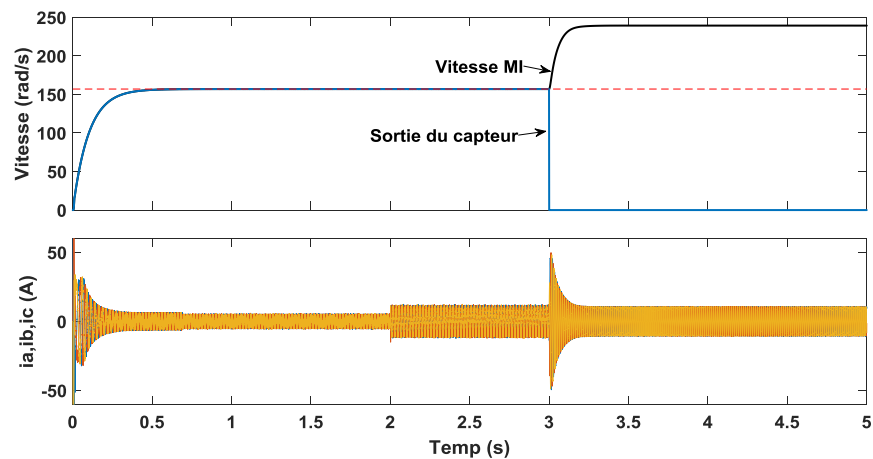
**Fig. 3.7a1** Flux rotorique et couple du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un défaut de capteur zéro feedback



**Fig. 3.7b** Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse et courant du stator du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un défaut de capteur zéro feedback



**Fig. 3.7b1** Flux du stator et couple du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un défaut de capteur zéro feedback



**Fig. 3.7c** Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un défaut de capteur zéro feedback

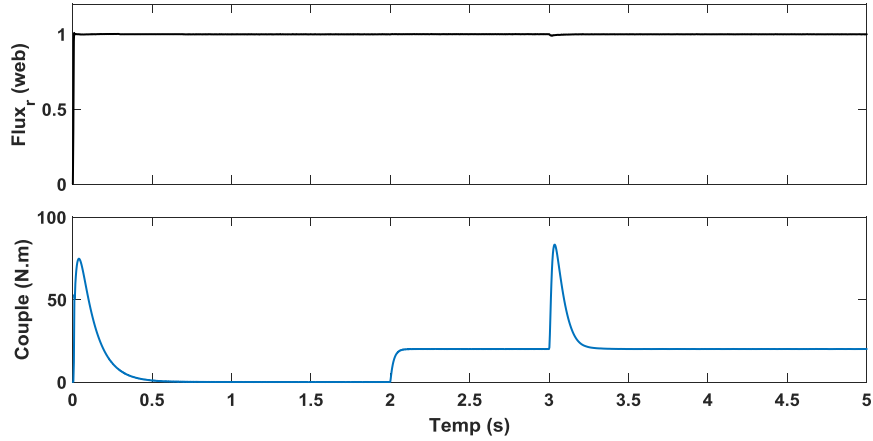


Fig. 3.7c1 Flux rotorique et couple du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un défaut de capteur zéro feedback

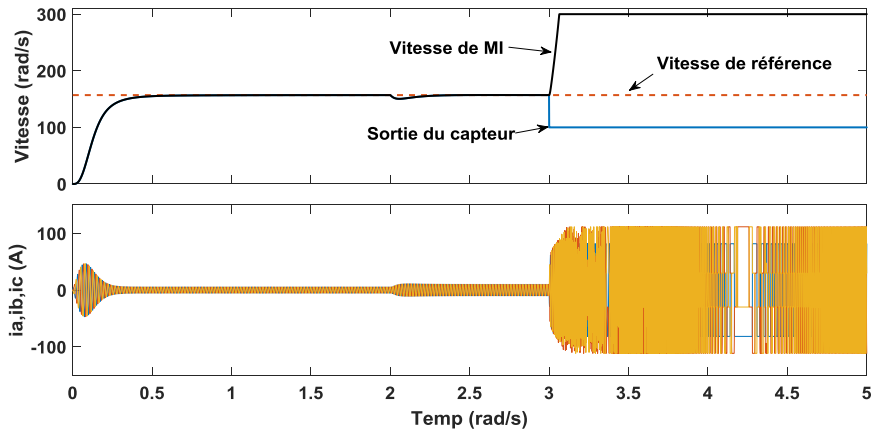


Fig. 3.8a Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un Biais de capteur

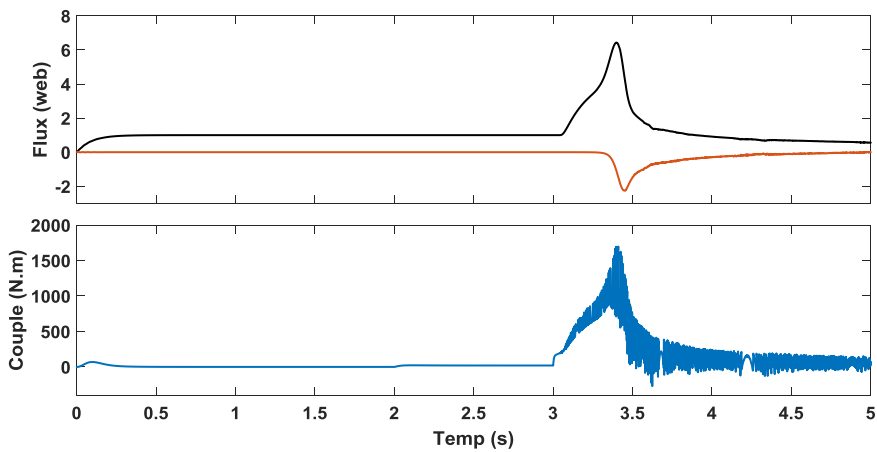


Fig. 3.8a1 Flux rotorique et Couple du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un Biais de capteur

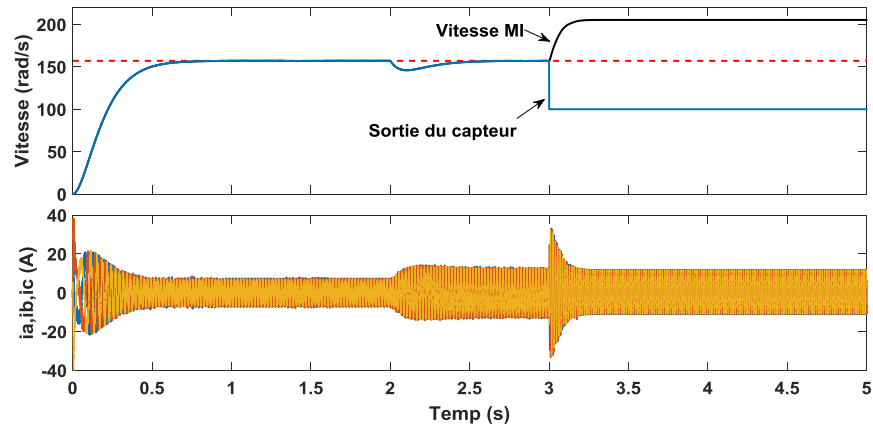


Fig. 3.8b Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un Biais de capteur

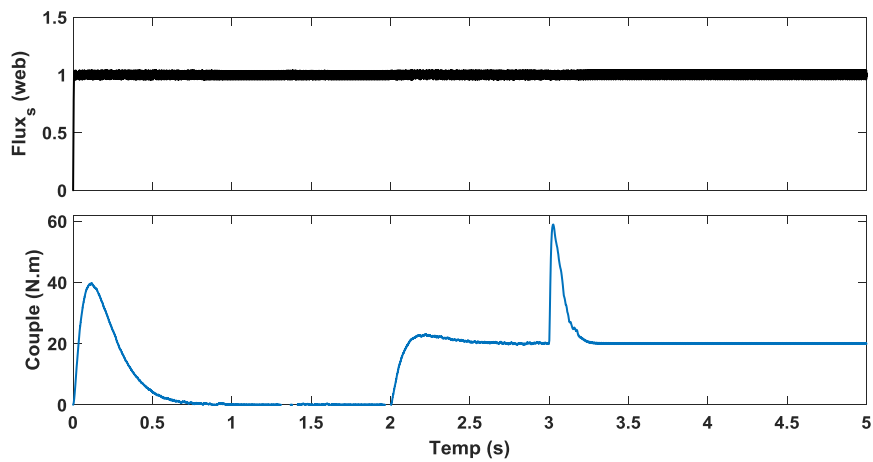


Fig. 3.8b1 Flux statorique et couple du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un Biais de capteur

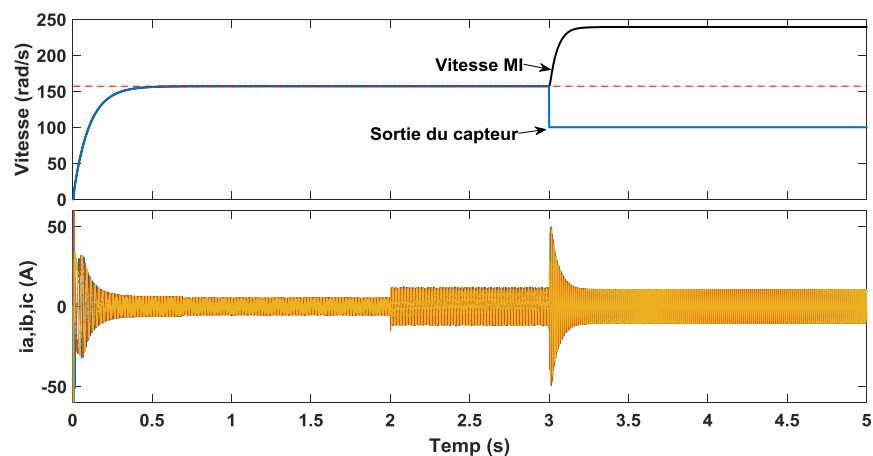
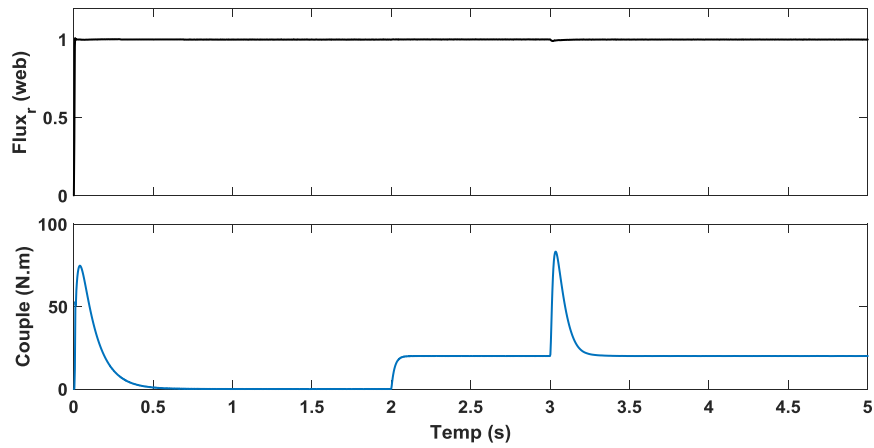
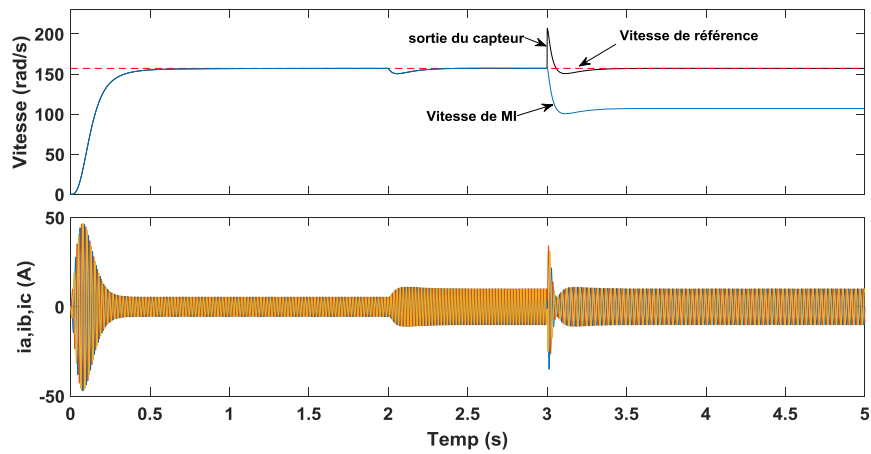


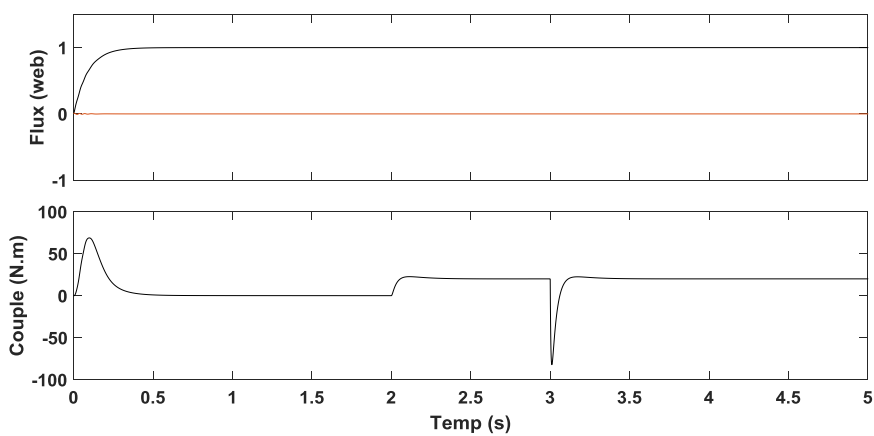
Fig. 3.8c Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant dustator du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un Biais de capteur



**Fig. 3.8c1 Flux rotorique et couple du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un Biais de capteur**



**Fig. 3.9a Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un d'offset**



**Fig. 3.9a1 Flux rotorique et couple du moteur à induction commandé par FOC en présence d'un d'offset**

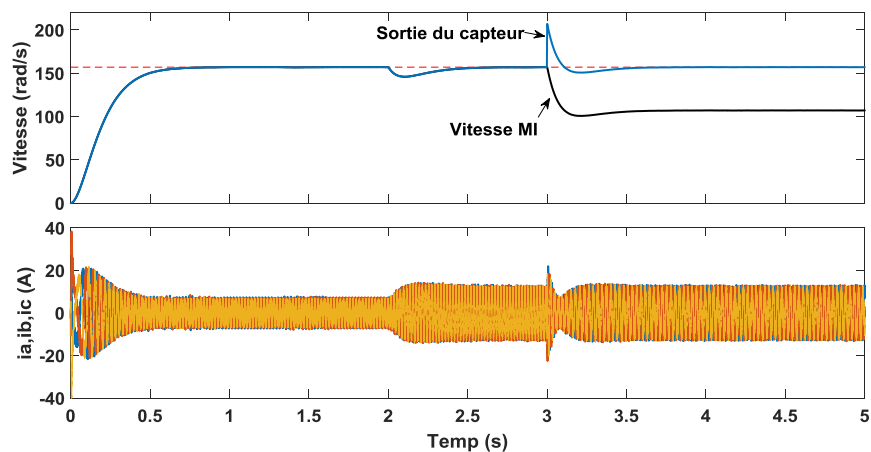


Fig. 3.9b Vitesse de MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un d'offset

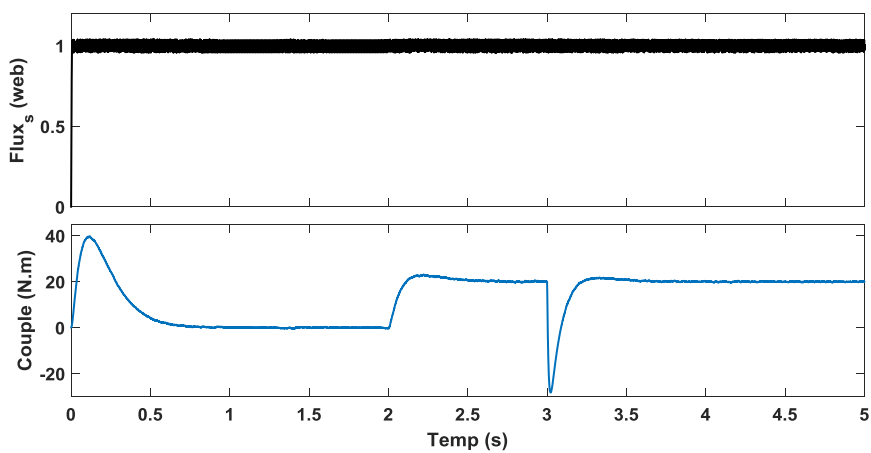


Fig. 3.9b1 Flux statorique et couple du moteur à induction commandé par DTC en présence d'un d'offset

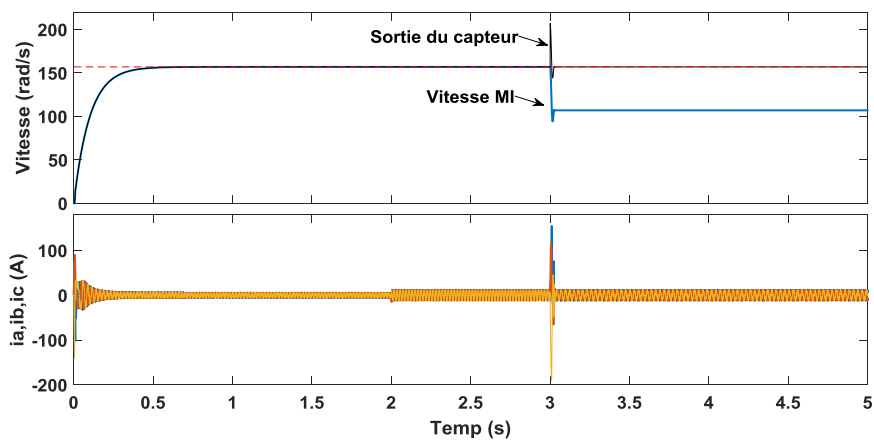
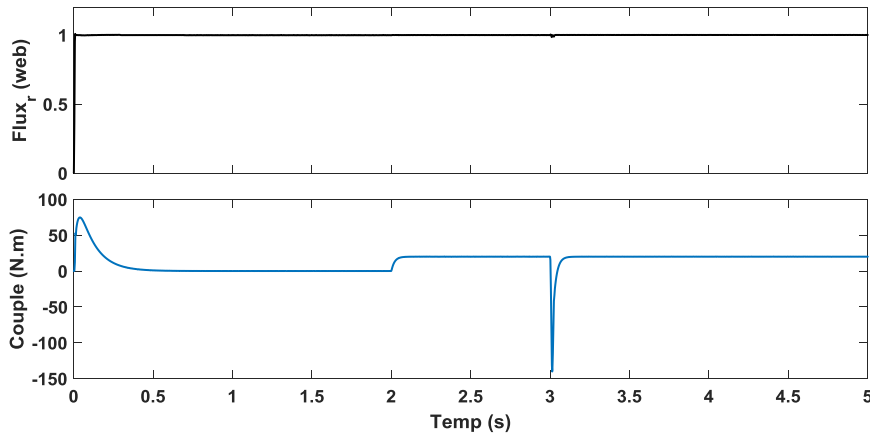


Fig. 3.9c Vitesse du MI, sortie du capteur de vitesse, courant du stator du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un d'offset



**Fig. 3.9c1 Flux rotorique et couple du moteur à induction commandé par Backstepping en présence d'un d'offset**

Après cette série de tests par simulation, on peut constater que l'effet du premier défaut (Fig. 3.7 (a, a<sub>1</sub>), (b, b<sub>1</sub>), (c, c<sub>1</sub>)), pour une défaillance totale du capteur(zéro feedback)est le plus dangereux, son effet est beaucoup plus influant sur la commande FOC, dans la mesure où la vitesse n'est plus contrôlée, conduisant ainsi à l'augmentation du courant de phase du stator. Pour le deuxième défaut (Fig. 3.8 (a, a<sub>1</sub>), (b,b<sub>1</sub>), (c, c<sub>1</sub>)) dont le capteur délivre toujours une valeur constante (biais constant :  $\Omega = 100 \text{ rad/s}$ ), son effet est également grave sur les trois commande surtout à l'instant de l'activation du défaut. Le défaut d'offset (Fig. 3.9 (a, a<sub>1</sub>), (b,b<sub>1</sub>), (c, c<sub>1</sub>))( $\Omega = \Omega + 50 \text{ rad/s}$ ) son effet est beaucoup plus influant sur la commande Backstepping, où l'on enregistre l'apparition des pics aux niveaux des réponses de la courant et du couple surtout à l'instant de l'activation du défaut. Quant aux commandes FOC et DTC, la vitesse n'est plus contrôlée et le courant augmente (effet d'un couple de charge).

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, le principe de trois stratégies de commandes d'un moteur à induction, à savoir la commande vectorielle (FOC), la commande directe du couple (DTC) et la commande Backstepping a été présenté. Ensuite, trois types de défauts de capteur de vitesse on été présenté et à partir de quoi des tests de validations on tété effectués. Les résultats obtenus ont montré l'influence que peuvent avoir les défauts de capteur considérés, sur les performances de la commande d'un moteur à induction.

En effet, le défaut du capteur de vitesse engendre des variations de vitesse brutales et rapides, conduisant à une augmentation des courants et des ondulations au niveau du couple développé par le moteur.

Une fois le moteur à induction à l'état sain et défaillant modélisé est commandé, ce qui facilite l'intégration de l'ensemble dans une structure de contrôle destinée à la propulsion d'un véhicule électrique, fera l'objet du prochain chapitre.

### Références 3

1. S. Khelfa, "*Commande Vectorielle d'une Machine à Induction: Impacts de la Saturation de la Machine et la Modélisation du Convertisseur*", Thèse de magister, dirigée par Prof. M.S. Naït-Saïd, Université de Batna, Juillet 2001.
2. A. Yousef, S.M. Abdelmaksoud, "*Review on field oriented control of induction motor*", International Journal Res. Emerg. Sci. Technol.(IJREST), Vol. 2, pp. 5-16, 2015.
3. L. Baghli, "*Modélisation & Commande de la Machine Asynchrone, Notes de cours*", IUFM de Lorraine-Université Henri Poincaré, Nancy 1, Paris, 2002-2003.
4. X. Lufei, N. Guangqun, "*Research on direct torque control of induction motor based on TMS320LF2407A*", Elsevier B.V. Selection and/or Peer-review under responsibility of Garry Lee, Physics Procedia, Vol. 25, pp. 513-519, 2012.
5. N. El Ouanjli, A. Derouich, A. El Ghzizal, S. Motahhir, A. Chebabhi, Y. El Mourabit, M. Taoussi, "*Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives - a review*", Protection and Control of Modern Power Systems, Vol. 4, May 2019.
6. F.J. Lin, R. J. Wai, W.D. Chou, S.P. Hsu, "*Adaptive Backstepping control using recurrent neural network for linear induction motor drive*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, N° 1, pp. 134-146, 2002.
7. A. El Kharki, Z. Boulghasoul, L. Et-Taaj, Z. Kandoussi, A. Elbacha, "*Real Time Implementation of Backstepping Control for High Performances Induction Motor Drive*", 4<sup>th</sup> World Conference on Complex Systems (WCCS), Ouarzazate, Morocco, 22-25 April 2019.
8. C. Chen, H. Yu, F. Gong, H. Wu, "*Induction Motor Adaptive Backstepping Control and Efficiency Optimization Based on Load Observer*", Energies, Vol. 13, N° 14, 3712, 2020.
9. I. Benlaloui, S. Drid, Member IEEE, L. Chrifi-Alaoui, and D. Benoudjit, "*Sensorless Speed Backstepping Control of Induction Motor Based on Sliding Mode Observer: Experimental Results*", 15th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering - STA'2014, Hammamet, Tunisia, December 21-23, 2014.
10. T. Roubache, S. Chaouch, M.S. Naït-Saïd, "*Backstepping design for fault detection and FTC of an induction motor drives-based EVs*", Automatika, Vol. 57, N° 3, pp.736-748, 2016.
11. M. Bouakoura, N. Nait-Said, M.S. Nait-Said, "*Speed sensor faults diagnosis in an induction motor vector controlled drive*", Acta Electrotechnica et Informatica Journal, Vol. 17, N° 1, pp. 49-57, 2017.
12. G. Heredia, A. Ollero, M. Bejar, R. Mahtani, "*Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters*", Mechatronics, Vol.18, N° 2, pp. 90-99, 2008.

13. C. Chakraborty, V. Verma, "*Speed and current sensor fault detection and isolation technique for induction motor drive using axes transformation*", IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 62, N° 19, pp. 43–54, 2015.
14. S. Yahia Cherif, D. Benoudjit, M.S. Nait-Said, N. Nait-Said, "*Comparative study between propulsion control system failures of an electrical vehicle piloted by FOC and by DTC using dual-induction-motors structure*", Diagnostyka Journal, Vol. 21, N° 3, pp. 41-47, 2020.

## Chapitre Quatre

### Structure de Commande d'un Système de Propulsion Bimoteur à Induction Sain et/ou Défaillant

#### 4. Introduction

Les questions associées à l'épuisement des combustibles fossiles, la conservation de l'énergie et aux problèmes environnementaux liés à la combustion, ont conduit à augmenter les efforts de recherche sur l'étude et le développement de systèmes de propulsion pour véhicule électrique. L'ensemble des développements en cours s'attachent à augmenter les prestations de ces catégories de véhicules à savoir, la simplification des structures de contrôle, l'amélioration du rendement et l'augmentation de l'autonomie pour les rendre aussi proches que possible de celles offertes par les véhicules thermiques avec lesquels ils sont en concurrence directe. Cette nouvelle vision sur la conception de véhicule électrique s'appuie sur le concept de transport durable et concerne la recherche, le développement, la fabrication et l'intégration de technologies innovatrices dans le domaine des transports qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des véhicules, de réduire les émissions polluantes et les gaz à effet de serre, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de vie. Il est bien connu pour tous les véhicules que la circulation urbaine, de par les changements de régime, les phases fréquentes de démarrage, d'accélération et de décélération, les arrêts qu'elle nécessite, peuvent éventuellement suffire à faire apparaître les pannes. En effet, au cours des opérations ci-dessus, les moteurs électriques sont continuellement exposés à des perturbations (couple de charge, rugosité de surface de la route et diverses conditions de circulation), conduisant parfois à des défauts électriques et mécaniques. Les effets survenus pourraient influencer la commande du moteur électrique et à partir de laquelle le contrôle du véhicule pourrait être perdu. L'objectif de ce chapitre est de présenter une structure de commande bimoteur à induction sain et/ou défaillant, destinée pour la propulsion d'un véhicule électrique, du point de vue commande et localisation de la gravité des défauts (électriques et défauts de capteur de vitesse), visant à limiter leurs effets tout en permettant d'assurer la continuité du service sans dégradation des performances.

#### 4.1 Structure de commande d'un système de propulsion

Les véhicules électriques présentent de nombreuses similitudes avec les véhicules conventionnels. Le véhicule électrique (VE) est une adaptation du véhicule conventionnel; avec une intégration des moteurs électriques. Différents travaux de recherche de configurations des VE et les possibilités d'association d'entraînement peuvent être trouvées dans la littérature, par exemple, un à quatre moteurs électriques, à courant continu ou moteurs à courant alternatif, avec ou sans embrayage et boîte de vitesses, etc. [1-8]. Le système de commande pour la propulsion électrique est la partie principale d'un véhicule électrique. Elle se compose de trois principaux blocs : moteurs électriques (un ou plusieurs moteurs électriques, selon la solution de transmission retenue), convertisseurs de puissance et le bloc commande ou contrôleur. Le bloc contrôleur est une partie essentielle d'un VE. Ainsi, le système de propulsion électrique ne peut être conçu sans ce bloc. En fait, c'est sans aucun doute indispensable pour contrôler ou optimiser les opérations pendant les différentes phases de propulsion : démarrage, accélération, décélération, croisière et arrêt. Pour le véhicule à moteur thermique lorsqu'il aborde un virage, la différence de vitesse des deux roues s'effectue par un différentiel mécanique (ensemble d'engrenages). Ce dispositif mécanique permet de décomposer la vitesse de telle sorte que la roue extérieure du véhicule tourne plus vite que la roue intérieure, afin de maintenir l'équilibre du véhicule. La solution électrique quant à elle est assurée par un différentiel commandé par le contrôle de la différence de vitesse des deux moteurs [8].

Pour une consigne de volant (action sur la direction), la tension une fois affichée, elle est transmise via les convertisseurs au système de transmission formé par les deux moteurs électriques, qui réagit au fur et à mesure de manière à vérifier ce qui suit [8] :

$$\Omega_1 = \Omega_0 + \Omega_{\text{diff}} \quad (4.1)$$

$$\Omega_2 = \Omega_0 - \Omega_{\text{diff}} \quad (4.2)$$

Avec :

$\Omega_1, \Omega_2$  : respectivement vitesses du moteur 1, moteur 2.

$\Omega_0, \Omega_{\text{diff}}$  : respectivement vitesses du véhicule, différence de vitesse.

d'où la vitesse du véhicule est donnée par [8]:

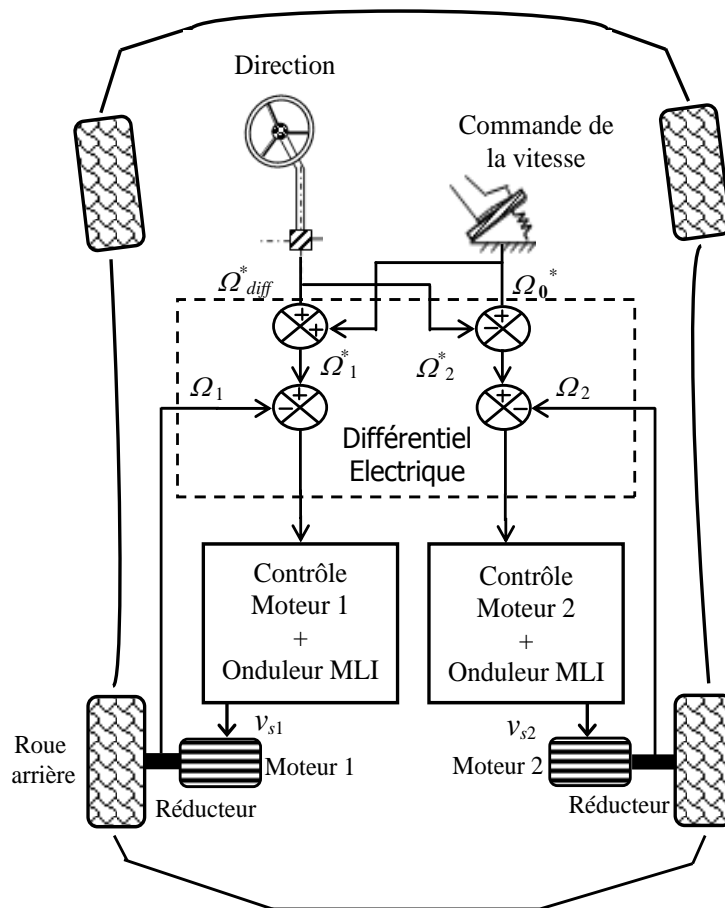
$$\Omega_0 = \frac{1}{2} (\Omega_1 + \Omega_2) \quad (4.3)$$

et la différence de vitesse par [8]:

$$\Omega_{diff} = \frac{1}{2} (\Omega_1 - \Omega_2) \quad (4.4)$$

L'une des solutions de transmission mécanique, relier la source d'énergie, le ou les moteurs électriques aux roues motrices du véhicule électrique dans une chaîne de propulsion tout électrique : consiste en l'intégration des moteurs électriques dans les roues via un réducteur de vitesse. Ce qui permet d'éliminer tous les dispositifs mécaniques de transmission, au profit d'une gestion électrique de leurs fonctions.

La figure 4.1 présente la structure de propulsion d'un véhicule électrique bimoteur à induction.



**Fig. 4.1 Structure de commande d'un système de propulsion bimoteur à induction**

Le système de propulsion se compose de deux moteurs électriques à induction couplés sur les deux roues arrière du véhicule via un réducteur de rapport fixe. Ici le contrôle de la vitesse est effectué par un correcteur pour chaque moteur séparément et sans boucle du différentiel des deux moteurs  $\Omega_{diff}$ .

Le régulateur utilisé du type PI, prend en entrée la vitesse de référence  $\Omega_0^*$  (dans la pratique elle est exprimée par le conducteur par l'intermédiaire d'une pédale d'accélération) et la vitesse mesurée  $\Omega_0$ .

Au cours des opérations du véhicule précédemment citées (démarrage, accélération, décélération arrêts), les moteurs électriques sont continuellement exposés à des perturbations. Les effets survenus pourraient influencer la commande du moteur électrique et à partir de laquelle le contrôle du véhicule pourrait être perdu. En utilisant trois différentes stratégies de commande d'un moteur à induction à savoir : la commande vectorielle à flux orienté, le contrôle direct du couple "DTC" et la commande par Backstepping, on s'intéresse dans ce qui suit, à la présentation des résultats de simulation illustrant les performances de la structure de commande du système de propulsion bimoteur à induction, suite à un défaut électrique d'un court-circuit naissant au niveau de la première phase statorique dans l'un des deux moteurs de la structure. Ensuite, on présentera les résultats de l'influence des défauts de capteur de vitesse sur les performances de la commande et la continuité du service de véhicule électrique.

## 4.2 Résultats de simulation

### 4.2.1 Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par FOC

Les figures 4.2 (a,b) détaillent séparément l'évolution des grandeurs principales (vitesse, couple, courants statoriques et flux rotorique) issue de la structure de propulsion commandée par une commande vectorielle à flux rotorique orienté (FOC). Le test de simulation a été réalisé pour un profil de vitesse de référence associé à un cycle de conduite européen ECE15 urbain, représentatif des comportements de conduite réellement observés sur route. En plus, un couple de charge égal 20N.m est appliqué à l'instant  $t = 20$  s, ensuite à l'instant  $t = 65$  s, le véhicule reçoit une consigne de volant  $\Omega_{diff}^*$  pour lui permettre de tourner à gauche (virage à gauche). Cela se traduit par l'augmentation d'une vitesse d'un moteur par rapport à l'autre. À partir de l'instant  $t = 80$  s, le véhicule parvient à se maintenir tout droit, et continue son cycle avec des accélérations et des décélérations jusqu'à l'arrêt total à l'instant  $t = 200$  s.

On remarque que la vitesse suit bien sa consigne de référence avec une légère diminution à l'instant de l'application de la charge. Cette perturbation est d'ailleurs vite rejetée, cela montre que le contrôle ainsi proposé réagit bien face aux variations de la charge.

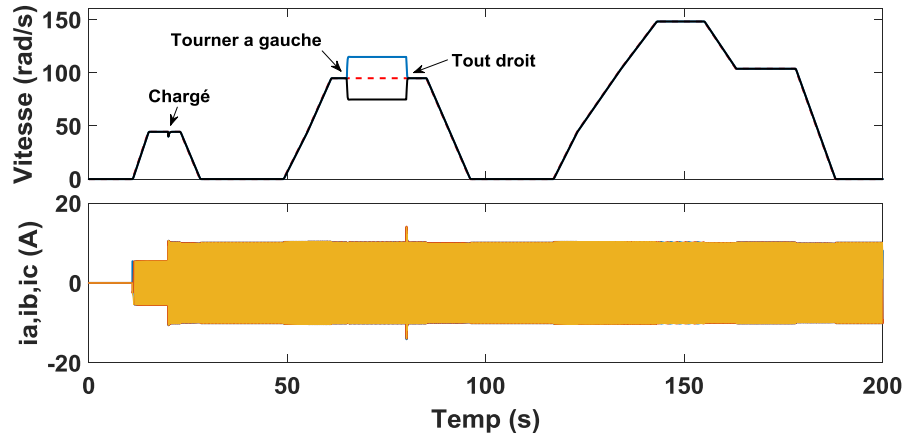


Fig. 4.2a Vitesse, courants de lignes statoriques du moteur 1 pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par FOC

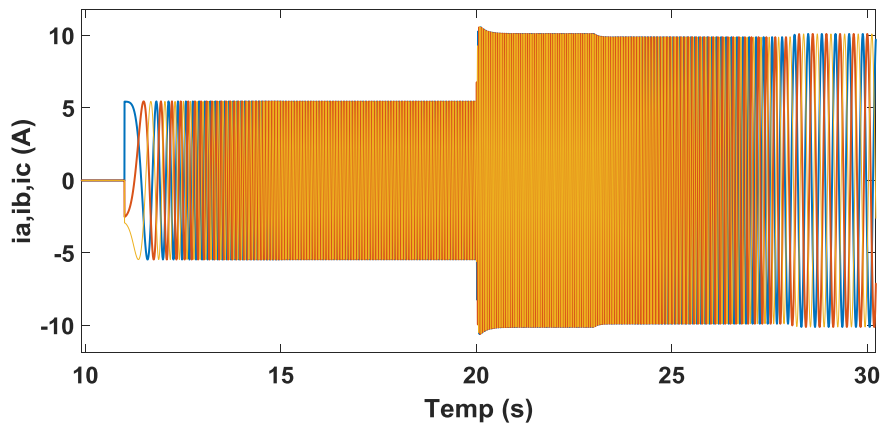


Fig. 4.2a1 Zoom courants de lignes statoriques du moteur 1 pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par FOC

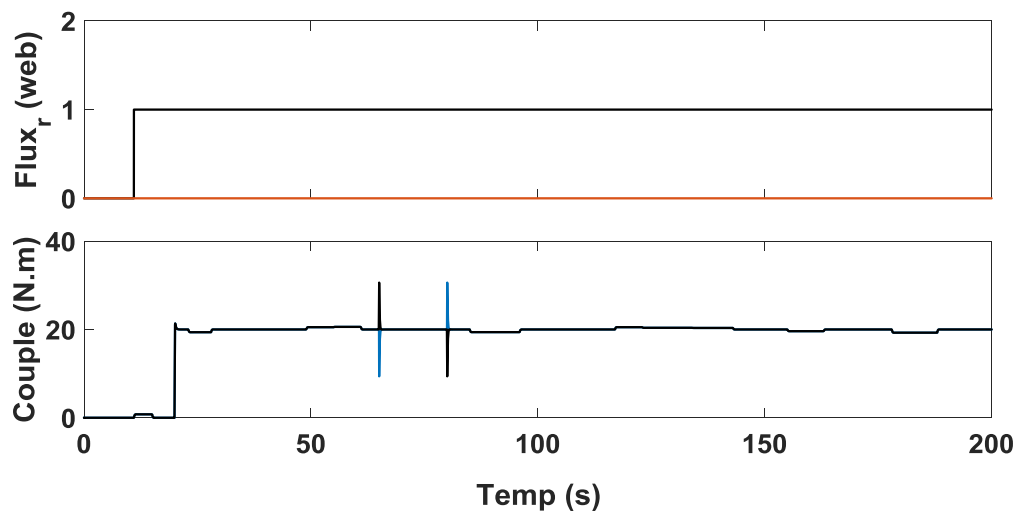


Fig. 4.2b Flux rotorique et Couple du moteur 1 et 2 pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par FOC

#### 4.2.2 Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par DTC

Le deuxième test toujours avec le même profil de la vitesse de référence issue du cycle de conduite européen ECE15, illustre comme le montre les figures 4.3a,b, les mêmes réponses de la vitesse, couple, les courants de lignes et les flux statorique, pour une structure de propulsion bimoteur à l'état sain contrôlée par une commande directe du couple (DTC).

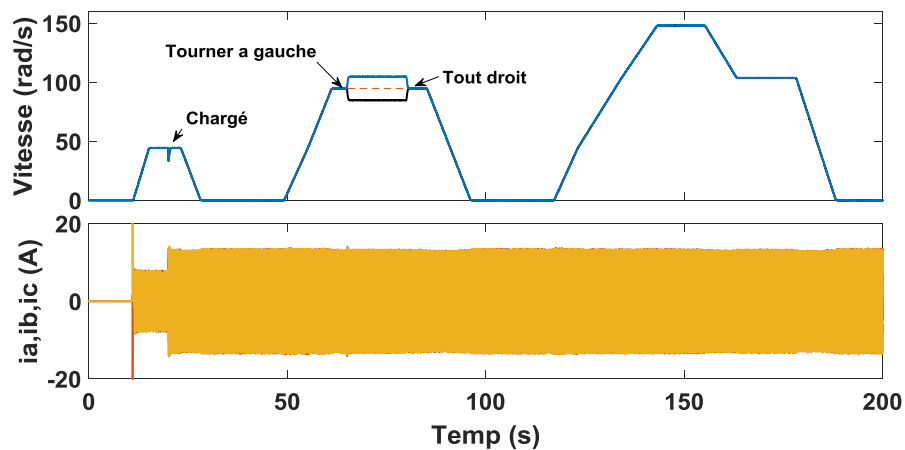


Fig. 4.3a Vitesse et courants de lignes statoriques du moteur 1 pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par DTC

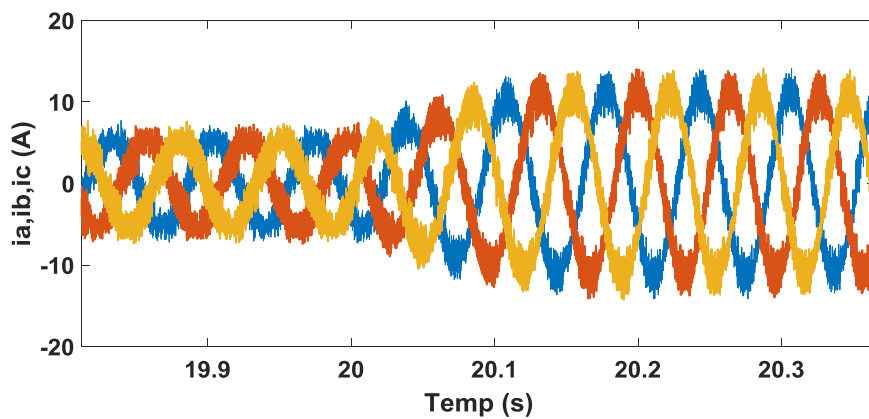
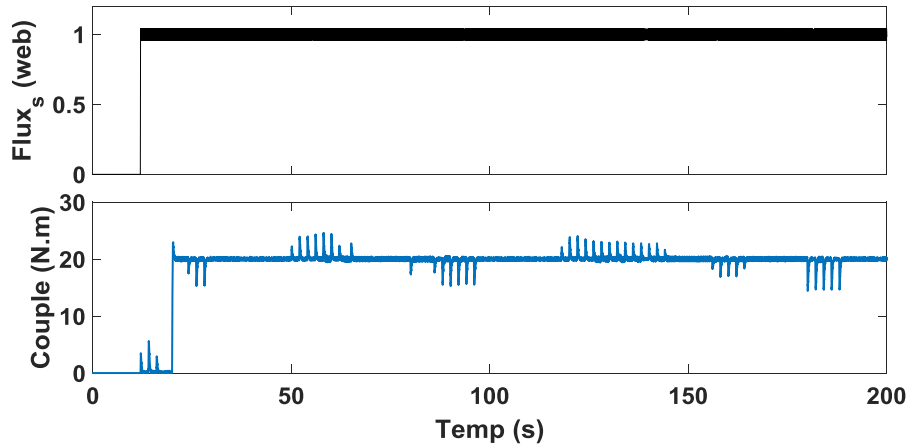


Fig. 4.3a1 Zoom courants statoriques pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par DTC

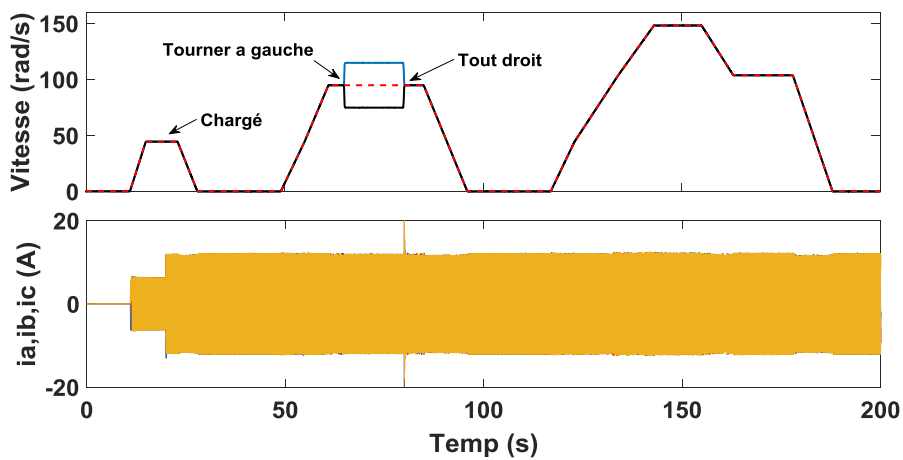


**Fig. 4.3b Flux statorique et Couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par DTC**

On constate que la vitesse suit parfaitement sa référence, toutefois, des ondulations sont apparues au niveau de la réponse du couple électromagnétique.

#### 4.2.3 Structure de propulsion bimoteur à induction sain commandé par Backstepping

Les figures 4.4(a,b) présente le même profil de la vitesse de référence pour les réponses de la vitesse, du couple électromagnétique, les courants statorique et flux rotorique, issues de la structure de commande du véhicule électrique bimoteur à induction à l'état sain commandé par Backstepping. On constate d'emblé les bonnes performances des différentes réponses, à l'exception de l'apparition despics de courant à l'instant de l'application du couple de charge.



**Fig. 4.4a Vitesse et courants de lignes statoriques du moteur 1 pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par Backstepping**

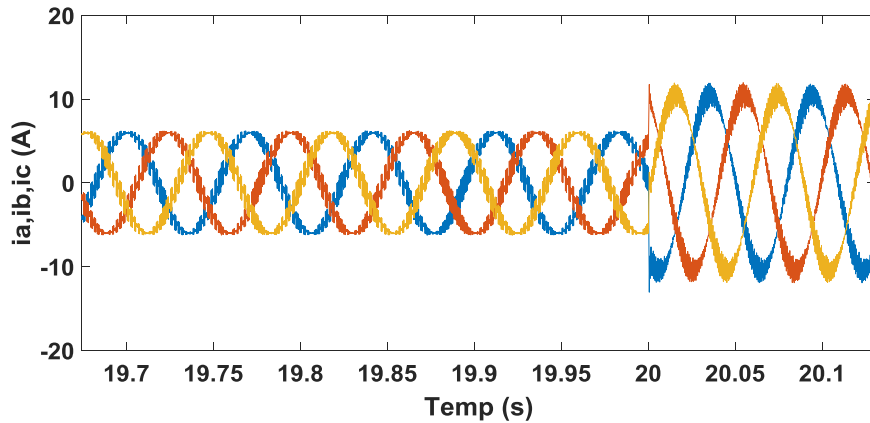


Fig. 4.4a1 Zoom courants de lignes statoriques pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par Backstepping

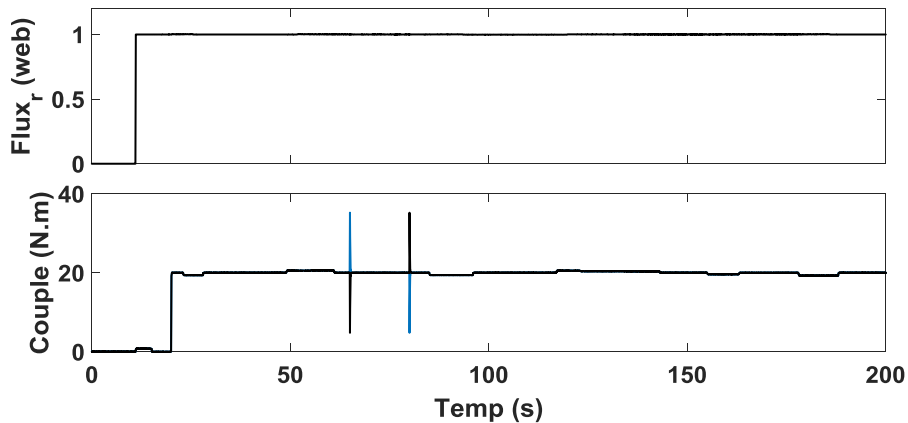


Fig. 4.4b Couple et Flux rotorique pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain commandé par Backstepping

### 4.3 Structure de propulsion bimoteur à induction défaillant

Afin d'évaluer les performances de la structure du système de propulsion bimoteur à induction pour un véhicule électrique commandé par trois stratégies de commandes (FOC, DTC et Backstepping), en termes de commande et sévérité des défauts, en premier lieu électrique pour un court-circuit inter-spires de la première phase du stator dans l'un des deux moteurs de la structure (moteur 1) couplé aux roues arrière du véhicule, alors que le deuxième moteur (moteur 2) est toujours à l'état sain. En second, pour des défauts de capteur de vitesse, des tests par simulation ont été effectués.

### 4.3.1 Effet du défaut de court-circuit

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 illustrent et comparent les principales caractéristiques (vitesse, couple électromagnétique et les courants statoriques de moteur 1) d'une structure de propulsion bimoteur à induction, l'un défaillant (moteur 1) et le deuxième (moteur 2) à l'état sain pour un véhicule électrique, entraîné par les trois stratégies de commande (FOC, DTC et Backstepping) respectivement, en présence d'un défaut électrique résultant d'un enroulement en court-circuit naissant dans la première phase du stator au niveau du moteur 1, avec un rapport de court-circuit:  $\delta_f = x_{sc} = 0,2$ . Les différents tests de simulation ont été réalisés en considérant un profil de vitesse de référence (courbe en pointillés). A partir de zéro, le véhicule démarre avec une accélération constante jusqu'à atteindre la vitesse de 100 rad/s. En effet, dans cette structure de propulsion chacun des deux moteurs est associé à un réducteur de vitesse de rapport fixe, permettant de réduire la vitesse du moteur à la vitesse de la roue et à un couple substantiel élevé. A l'instant  $t = 3s$ , un couple résistant égal 10 N.m est appliqué sur chaque moteur. Ce dernier cas peut se reproduire par exemple lorsque les roues d'un véhicule électrique sont arrêtées par un obstacle. Ensuite, à  $t = 4s$  le véhicule accomplit ses manœuvres de virage, entournant à gauche. En effet, l'action du différentielle électrique permet à la roue intérieure de tourner plus lentement que la roue extérieure, cela se traduit donc par l'augmentation de la vitesse d'un moteur par rapport à l'autre. De plus, pour tester sévèrement les performances de la structure de propulsion, à  $t = 5s$  le défaut électrique résultant d'un court-circuit naissant de l'enroulement dans la première phase du stator a été activé au niveau du moteur 1, lorsque le véhicule accomplit ses manœuvres de virage à gauche. Enfin, le véhicule maintient une vitesse de croisière constante, ce qui se traduit par l'égalité des vitesses des deux moteurs.

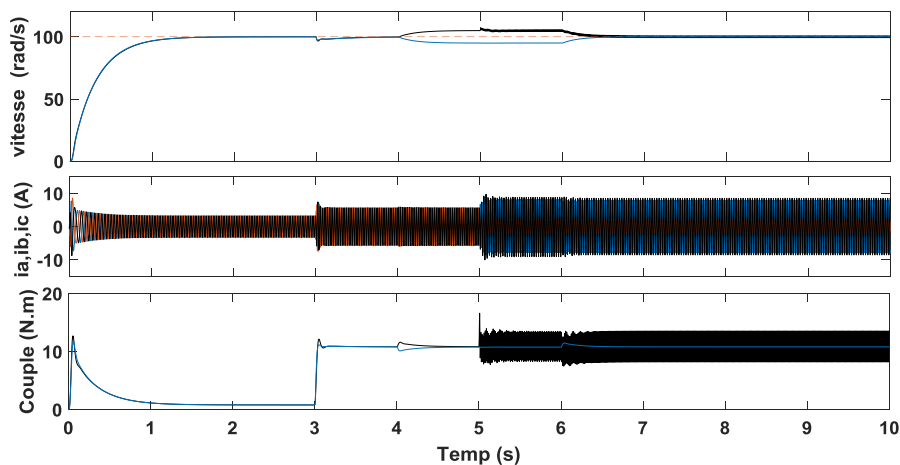


Fig. 4.9 Vitesse, courants de lignes statoriques du moteur 1 et couple, pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état défaillant commandé par FOC

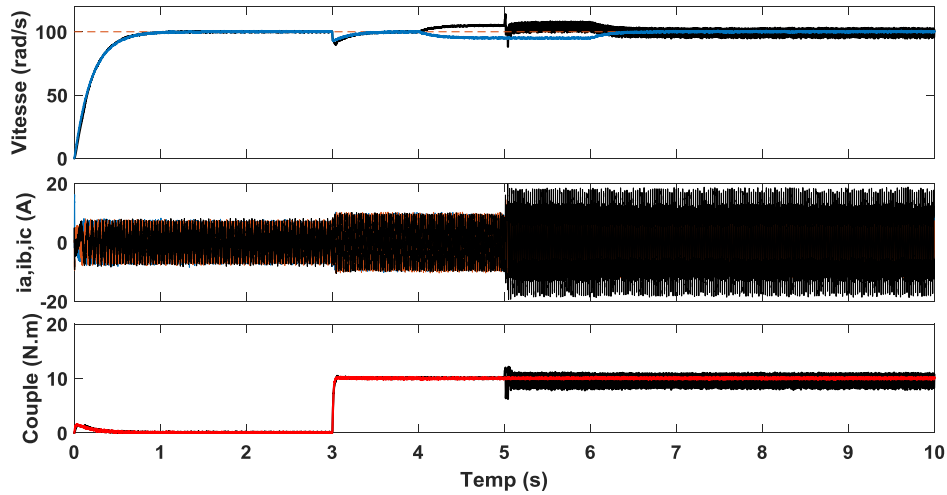


Fig. 4.10 Vitesse, courants de lignes statoriques du moteur 1 et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état défaillant commandé par DTC

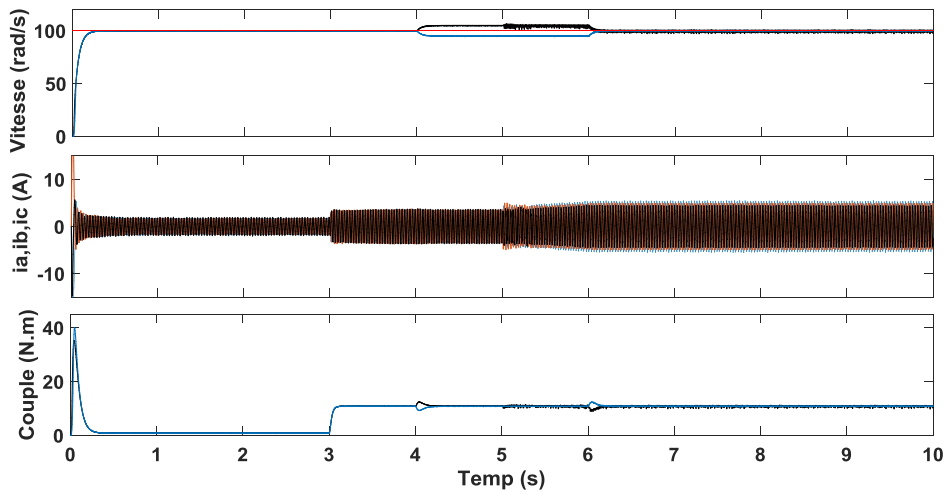
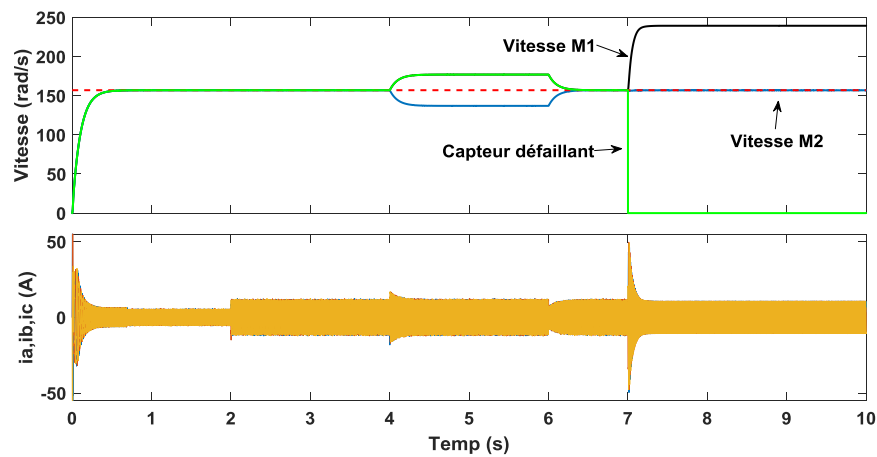


Fig. 4.11 Vitesse, courants de lignes statoriques du moteur 1 et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction à l'état défaillant commandé par Backstepping

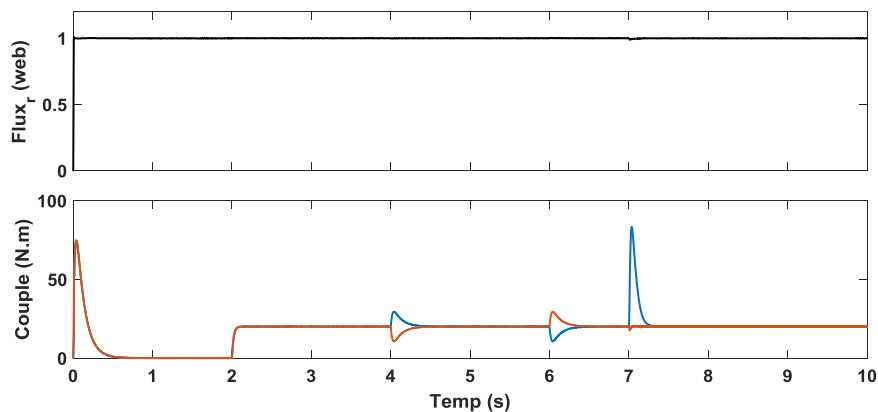
A travers les résultats de la simulation, pour les différentes stratégies de commande, pour un nombre total de spires court-circuitées  $\delta_f = x_{sc} = 0,2$  on remarque d'emblé l'effet du court-circuit naissant sur les performances des différentes caractéristiques des deux moteurs. Cela se traduit par une claire augmentation d'amplitude du courant de la première phase, alors que le couple et la vitesse, leur taux d'ondulation est accru à cause du déséquilibre des courants. On peut noter, que l'effet de défaut de court-circuit dans le cas de la commande Backstepping n'est pas perceptible sur les réponses de la vitesse et du couple électromagnétique (Fig. 4.11), sauf pour les amplitudes des courants du stator, qui augmentent légèrement après l'activation du défaut.

### 4.3.2 Effets des défauts du capteur de vitesse

Dans le deuxième test nous avons simulé trois types de défauts du capteur de vitesse (zéro feedback, Offset +50rad/s, Biais constante = 100rad/s), appliqués à la structure de propulsion bimoteur à induction à l'état sain, commandé par les trois stratégies Backstepping, DTC, FOC successivement. Selon un profil de vitesse de référence, à l'instant  $t=3s$  un couple de charge  $C_r=20N$  est appliqué pour les deux moteurs. Ensuite, à  $t=4s$  le véhicule effectue un virage à droite et revient au chemin droit à l'instant  $t=6s$ . Pour tester sévèrement les performances de la structure de commande à  $t=7s$ , un défaut de capteur de vitesse s'est produit. Les figures 4.12((a,a1),(b,b1),(c,c1)), 4.13((a,a1),(b,b1),(c,c1)) et 4.14((a,a1),(b,b1),(c,c1)) illustrent les réponses de la vitesse, sortie du capteur défaillant, les courants de lignes, le couple électromagnétique et Flux.



**Fig. 4.12a** Vitesse, sortie du capteur de vitesse et courants de lignes statoriques pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par Backstepping en présence du défaut de capteur zéro feedback



**Fig. 4.12a1** Flux rotorique et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par Backstepping en présence du défaut de capteur zéro feedback

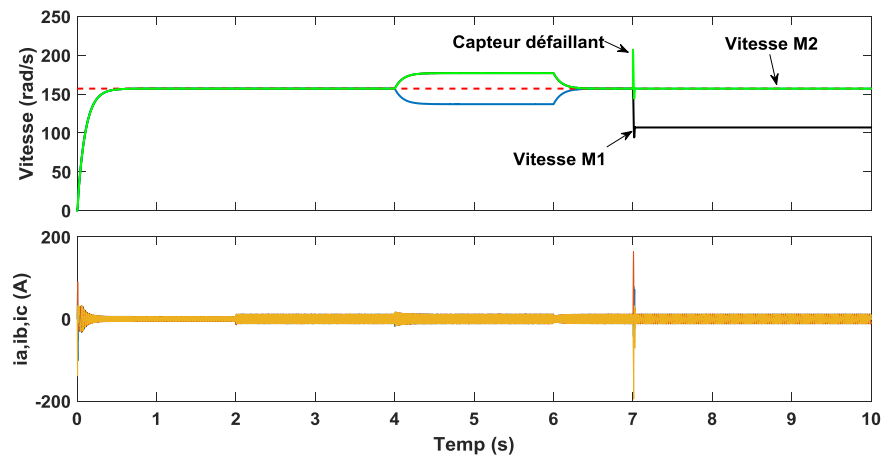


Fig. 4.12b Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par Backstepping en présence du défaut de capteur positive offset

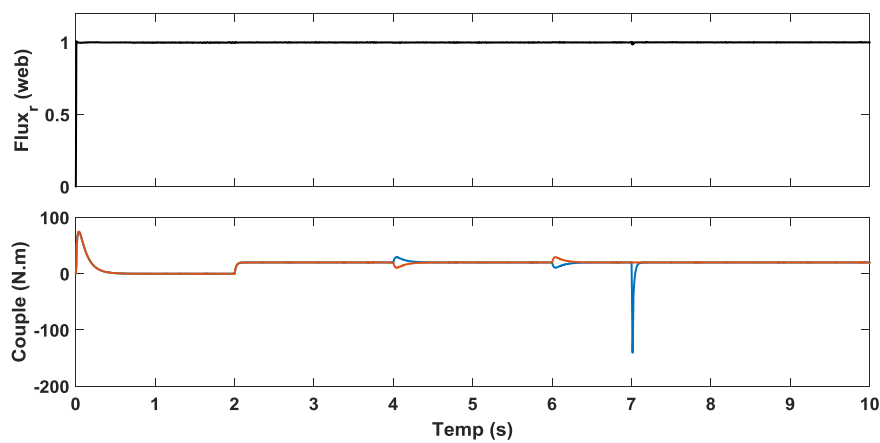


Fig. 4.12b1 Flux rotorique et Couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandé par Backstepping en présence du défaut de capteur positive offset

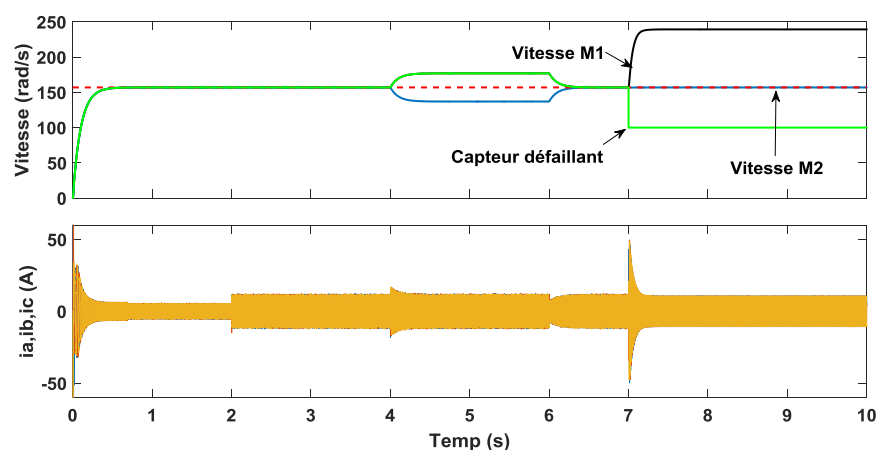


Fig. 4.12c Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par Backstepping en présence du défaut de capteur Biais constante

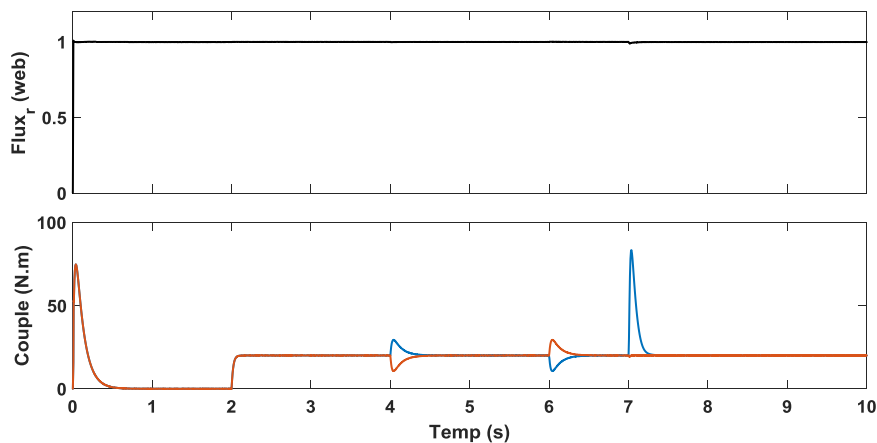


Fig. 4.12c1 Flux rotorique et Couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par Backstepping en présence du défaut de capteur Biais constant

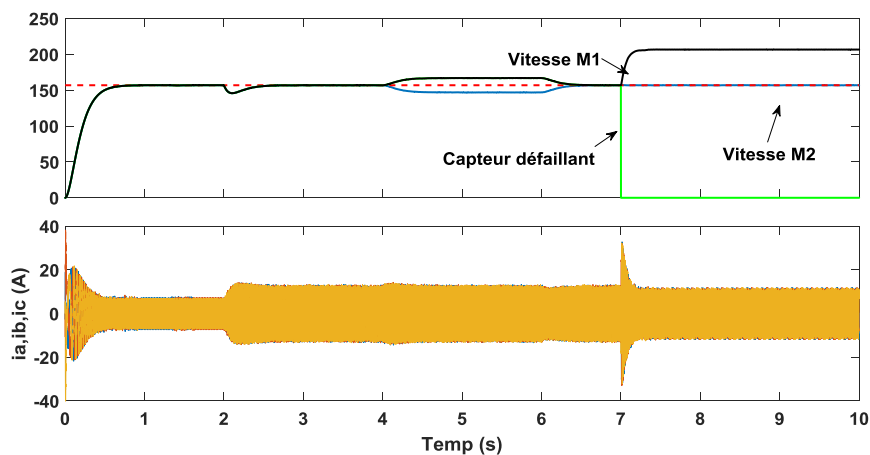


Fig. 4.13a Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par DTC en présence du défaut de capteur zéro feedback

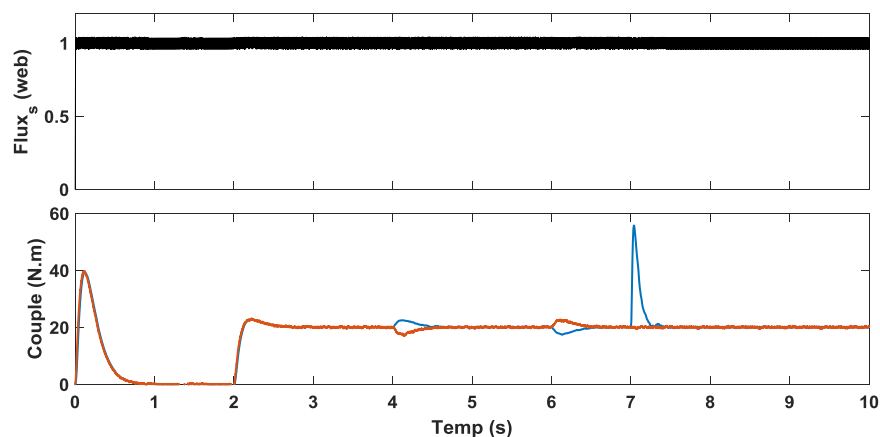


Fig. 4.13a1 Flux statorique et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandé par DTC en présence du défaut de capteur zéro feedback

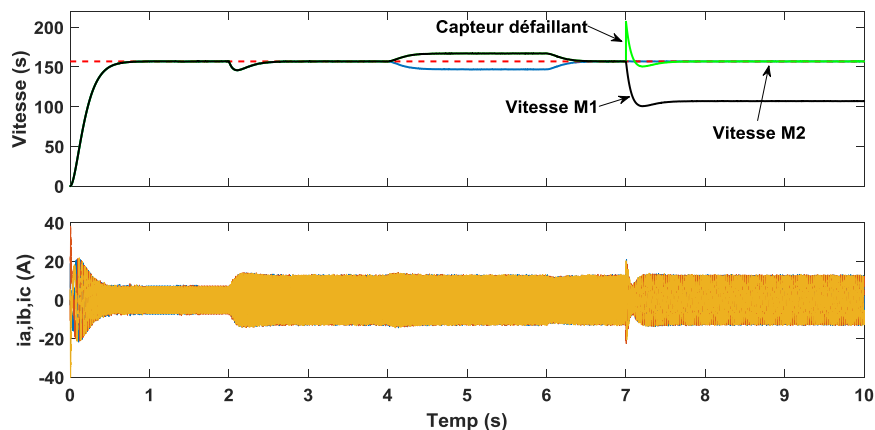


Fig. 4.13b Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandé par DTC en présence du défaut de capteur positive offset

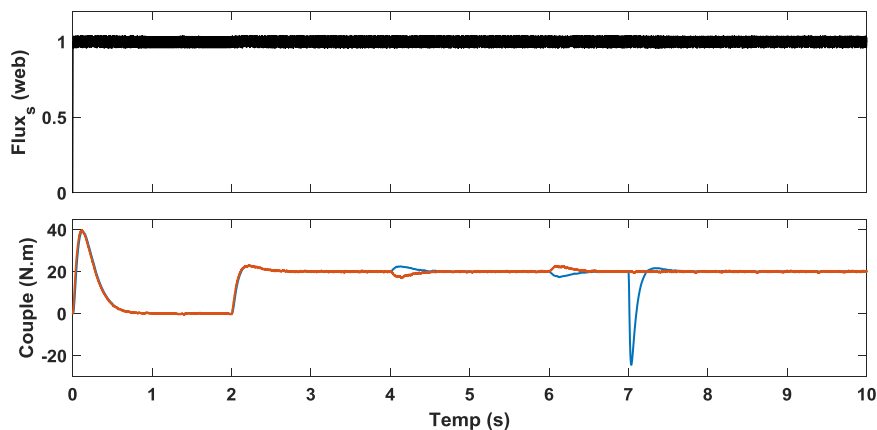


Fig. 4.13b1 Flux statorique et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par DTC en présence du défaut de capteur positive offset

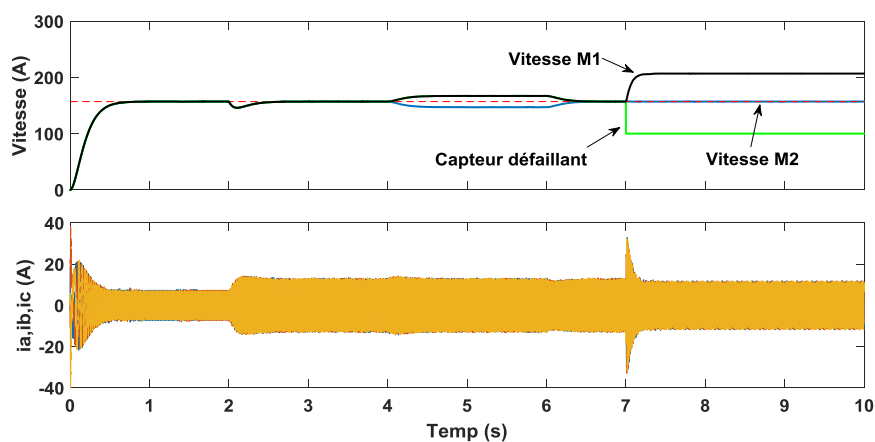


Fig. 4.13c Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par DTC en présence du défaut de capteur  
Biais constante

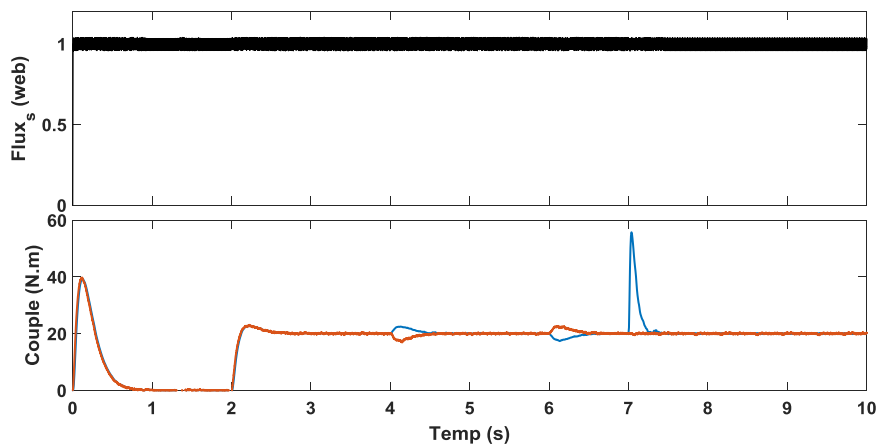


Fig. 4.13c1 Flux statorique et couple pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par DTC en présence du défaut de capteur Biais constante

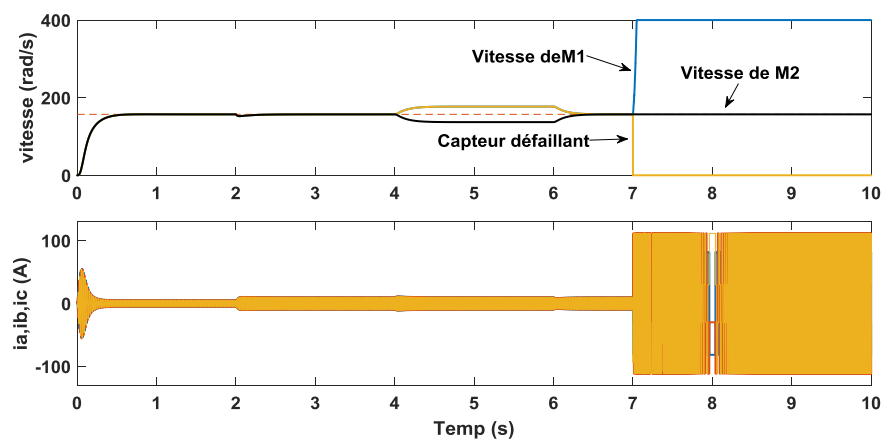


Fig. 4.14a Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur zéro feedback

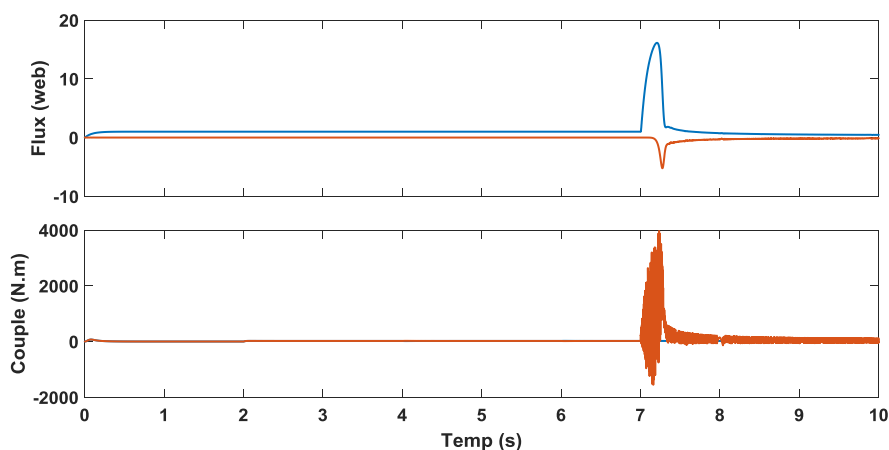


Fig. 4.14a1 Flux rotorique, couple, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur zéro feedback

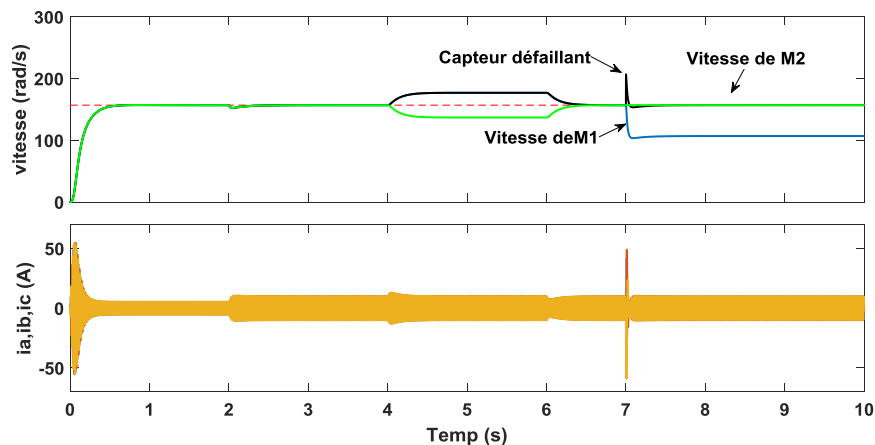


Fig. 4.14b Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur positive offset

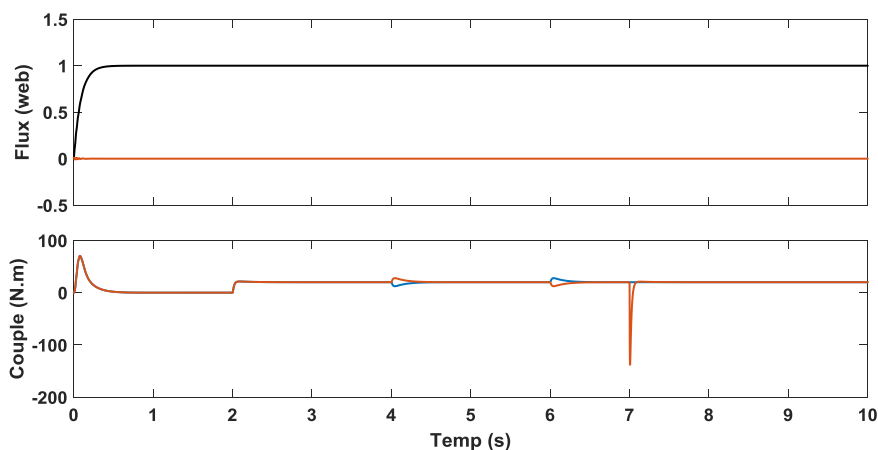


Fig. 4.14b1 Flux rotorique, couple, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur positive offset

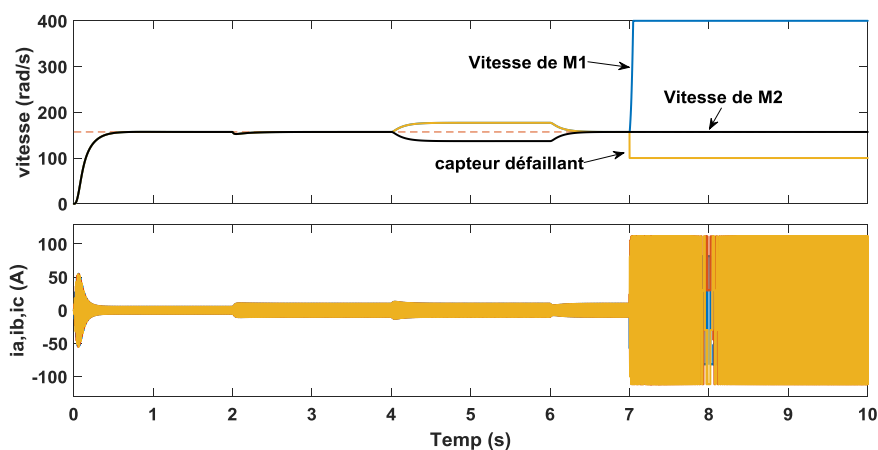
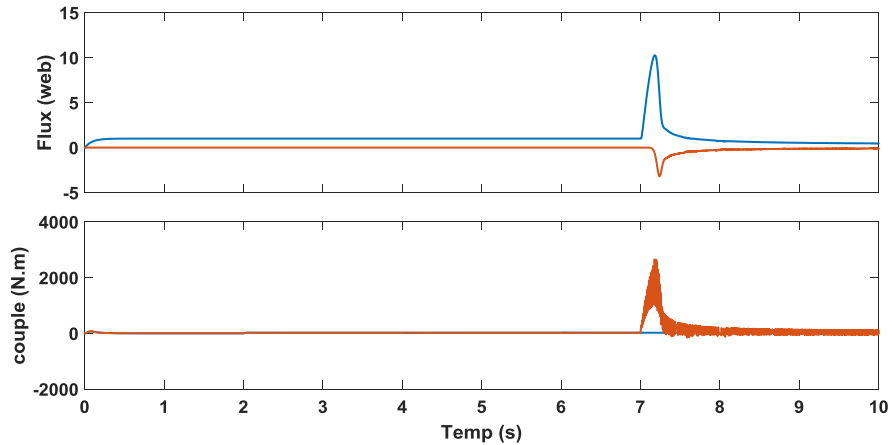


Fig. 4.14c Vitesse, sortie du capteur de vitesse, courants de lignes statoriques, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur Biais constante



**Fig. 4.14c Flux rotorique, couple, pour une structure de propulsion bimoteur à induction commandée par FOC en présence du défaut de capteur Biais constante**

Les figures 4.12(a,a1), 4.13(a,a1) et 4.14(a,a1) montrent les résultats de simulation de la structure de propulsion du véhicule commandé par Backstepping, DTC et FOC respectivement avec le premier défaut de capteur de vitesse de type zéro feedback. On remarque, après l'activation du défaut, une perte totale du contrôle du véhicule pour les trois commandes et une forte augmentation de l'intensité du courant dans le cas d'une commande FOC.

Les figures 4.12 (b,b1), 4.13(b,b1) et 4.14(b,b1) présentent les résultats de simulation avec le deuxième défaut du capteur de vitesse de type offset positive.

On remarque à travers les résultats de simulation une diminution de la vitesse pour les trois commandes, des pics de couple à l'instant de l'application du défaut et une augmentation des courants dans le cas de la commande FOC.

Le troisième défaut de biais constante, où l'on observe à travers les figures 4.12(c,c1), 4.13(c,c1) et 4.14(c,c1) une perte de contrôle de la vitesse dans les trois commandes, une augmentation des courants avec un grand pic du couple et Flux dans la commande FOC.

#### 4.4 Conclusion

A travers ce chapitre, une structure de contrôle proposée pour la propulsion bimoteur à induction à l'état sain et/ou défaillant pour un véhicule électrique a été présentée, dont le but est de satisfaire les conditions optimales du contrôle.

Autrement dit, le système doit assurer un bon fonctionnement du processus et assurer la continuité du service, même en présence de perturbations.

Comme il a été bien illustré par les différentes figures, l'étude par simulation nous a permis de bien valider la structure de contrôle, en premier lieu, lorsque les deux moteurs à induction sont à l'état sain, commandé par trois différentes stratégies de commande FOC, DTC et Backstepping en utilisant un profil de vitesse de référence associé à un cycle de conduite urbaine ECE15. Les résultats obtenus montrent bien l'apport du contrôle, étant donné que les réponses en vitesse sont obtenus sans dépassement avec un bon rejet des perturbations du couple de charge. En second lieu, nous avons testés les performances de la structure de propulsion en présence d'un défaut électrique de court-circuit naissant sur la première phase de l'enroulement du stator au niveau du premier moteur de la roue arrière du véhicule, ensuite de la présence d'un défaut de capteur de vitesse.

Grâce aux résultats de simulation de la structure de contrôle du véhicule en présence du défaut de court-circuit, on a pu noter, que ledit défaut provoque une nette augmentation de l'amplitude du courant dans la phase en défaut, ainsi que son effet sur l'évolution des autres phases, conduisant à l'apparition d'ondulations de la vitesse et du couple développé par le moteur, notamment avec la commande DTC, mais l'impact du défaut, est moindre avec les deux autres types de contrôle (FOC et Backstepping), ce qui permet d'assurer plus au moins la continuité du service au détriment de l'augmentation des courants.

En ce qui concerne le défaut du capteur de vitesse, les résultats obtenus ont montré l'influence que peut avoir les trois types de défauts sur les performances de la commande de la structure de propulsion.

## Références 4

1. L. Shao, A.E. Hartavi Karci, D. Tavernini, A. Sorniotti M. Cheng, "Design Approaches and Control Strategies for Energy-efficient Electric Machines for Electric Vehicles-A review", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 116900-116913, 2020.
2. A. Anto, M.V. Sreethumol, "Review of Electric Vehicles", *International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies, IEEE*, pp. 392-398, 2018.
3. E. Mehrdad, V.S. Krishna, O.B. Hari, T.M. Ramin, "State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 109, N° 6, pp. 967-984, 2021.
4. C.C. Chan, A. Bouscayrol, K. Chen, "Electric, Hybrid, and Fuel-cell Vehicles: Architectures and Modeling", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 589-598, 2020.
5. F. C. Correa, J. J. Eckert, L. C. Silva, F. M. Santiciolli, E. S. Costa, F. G. Dedini, "Study of different electric vehicle propulsion system configurations", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-6, 2015.

6. B. Tabbache, A. Kheloui, M. E. H. Benbouzid, "An adaptive electric differential for electric vehicles motion stabilization", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, Issue n°1, pp. 104-110. 2010.
7. A. Haddoun, M. E. H Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, K. Srairi, "Modeling, analysis, and neural network control of an EV electrical differential", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 55, N° 6, pp. 2286-2294., 2008.
8. D. Benoudjit, "Contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique", Thèse de Doctorat en Sciences dirigée par Prof. M.S. NAIT-SAID & Prof. N. NAIT-SAID, Université El Hadj Lakhdar, Batna, 2010.

## Chapitre Cinq

# Emulation du Couple de Charge de la Roue D'une Structure de Propulsion

### 5. Introduction

Le véhicule électrique est une adaptation du véhicule conventionnel avec une intégration des moteurs électriques. Il est bien connu que, durant les différentes phases de propulsion d'un véhicule : démarrage, accélération, décélération, croisière et phases d'arrêts, les moteurs électriques sont continuellement exposés à des perturbations de charge. Ce qui pourrait influencer la commande du moteur électrique et à partir de laquelle le contrôle du véhicule pourrait être perdu. Par conséquent, afin de maintenir les performances, même en présence de toutes perturbations, en particulier les changements du couple de charge mécanique du moteur, l'identification et l'analyse de la variation des charges mécaniques du moteur sont souvent problématiques. Ainsi, plusieurs études de recherches dans la littérature ont porté sur les systèmes d'émulation pour véhicule électrique, proposant différentes approches [1-19]. En effet, l'émulation de la charge mécanique du moteur permet d'analyser les performances du moteur dans des conditions de fonctionnement réelles. Cependant, dans la plupart des cas étudiés, les principaux éléments pour l'émulation de la charge du moteur, sont un dynamomètre électrique et son système de commande (contrôle). A ce sujet, les principales stratégies utilisées directement liés au système de contrôle, comprennent la commande à flux orienté (F.O.C.), le contrôle direct du couple (D.T.C.) et le contrôle de la position [4-7]. D'autres travaux de recherche ont été proposés dans la littérature [8-19], en utilisant différents tests expérimentaux, à travers des plates-formes et bancs d'essais avec différentes approches d'émulation.

Dans ce contexte, ce chapitre met en lumière, la possibilité de représenter l'émulation du couple de charge de la roue d'une structure de propulsion électrique destinée à un véhicule électrique bimoteur à induction, qui entraîne séparément les roues arrière du véhicule contrôlée par une commande vectorielle. Il s'agit entre autre, de vérifier les performances de la structure de propulsion basée sur un émulateur du couple de charge de la roue, pour des profils de charge imprévisibles, agissant sur l'un des deux moteurs électriques, rencontrés pendant la conduite du véhicule avec des manœuvres spécifiques.

A cet effet, un schéma de contrôle a été développé pour un générateur à courant continu couplé à un moteur à induction, en considérant l'effet de l'inertie de rotation.

### 5.1 Modèle du générateur à courant continu

Comme mentionné précédemment, dans le but d'émuler le couple de charge d'une roue agissant sur l'un des deux moteurs électriques pour une structure du véhicule électrique, un schéma de contrôle constitué d'un moteur à induction contrôlé par commande vectorielle à flux rotorique orienté, couplé à un générateur à courant continu a été présenté.

Commençant tout d'abord par présenter le modèle mathématique d'un générateur à courant continu, donné par les équations suivantes.

La tension d'induit peut s'écrire [17] :

$$U_a = -(R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}) + e_a \quad (5.1)$$

Avec :

$R_a$  : La résistance d'induit,  $L_a$  : L'inductance d'induit,  $i_a$  : Le courant d'induit.

La tension générée est proportionnelle à la vitesse de rotation [17] :

$$e_a = K_\phi \Omega \quad (5.2)$$

$K_\phi$  : Une constante basée sur le flux et les paramètres de construction de la machine.

$\Omega$  : La vitesse de rotation.

Le couple de charge est lié au courant d'induit par la constante  $K_\phi$  [17] :

$$T_L = -K_\phi i_a \quad (5.3)$$

Sachant que le moteur à induction est couplé à un générateur à courant continu, l'équation mécanique peut s'écrire :

$$T_e = J_{tot} \frac{d\Omega}{dt} + f_{tot} \Omega + T_L \quad (5.4)$$

Où :

$T_e$  : Le couple électromagnétique.  $T_L$  : Le couple de charge,  $\Omega$  : La vitesse de rotation,

$J_{tot}$ ,  $f_{tot}$  : L'inertie totale, le frottement visqueux total du système couplé (Moteur à induction "MI" et générateur à courant continu "GCC"), respectivement, exprimé par :

$$J_{tot} = J_{MI} + J_{GCC} \quad (5.5)$$

$$f_{tot} = f_{MI} + f_{GCC} \quad (5.6)$$

Sur la base du schéma fonctionnel du système illustré par la figure 5.1, l'émulation du couple de charge de la roue est réalisée avec une commande du générateur à courant continu à l'aide d'un régulateur PI.

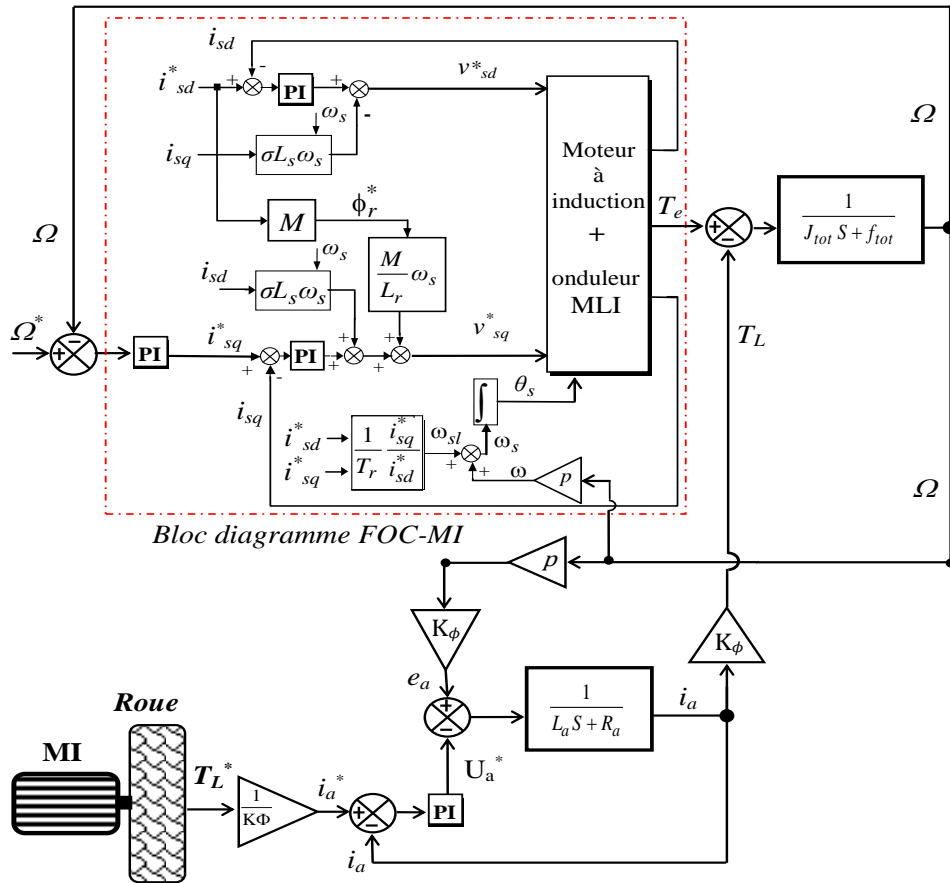


Fig. 5.1. Schéma fonctionnel de l'émulateur

## 5.2 Résultats de simulation

Afin de vérifier les performances du schéma de contrôle, en particulier lorsque le véhicule effectue des manœuvres spécifiques, à travers un profil de vitesse donné pour le véhicule électrique, défini comme illustré sur les figures 5.2, 5.4, 5.6 et l'évolution du courant de ligne du stator sous l'effet des perturbations de charge basées sur trois profils de références (références 1, 2 et 3) présentés dans les figures 5.3, 5.5 et 5.7, respectivement.

A partir d'un point de départ, le véhicule démarre avec une accélération constante jusqu'à atteindre la vitesse de 118 rad/s où elle sera maintenue constante. Après, à l'instant  $t = 40$  s, le véhicule tourne à gauche, le différentiel électrique permet à la roue extérieure (moteur droit) pour tourner plus vite que la roue intérieure (moteur gauche) :  $\Omega_{\text{Right}} > \Omega_{\text{Left}}$ . Ensuite, à  $t = 60$  s, le véhicule continue directement sa trajectoire par une vitesse de croisière constante, il en résulte une inégalité de la vitesse des deux moteurs :  $\Omega_{\text{Right}} = \Omega_{\text{Left}}$ .

Les figures 5.2 et 5.4 montrent que la réponse en vitesse suit précisément sa référence. Les mêmes remarques pour l'évolution temporelle du courant de la première phase du stator, où son amplitude change selon le couple de charge développé.

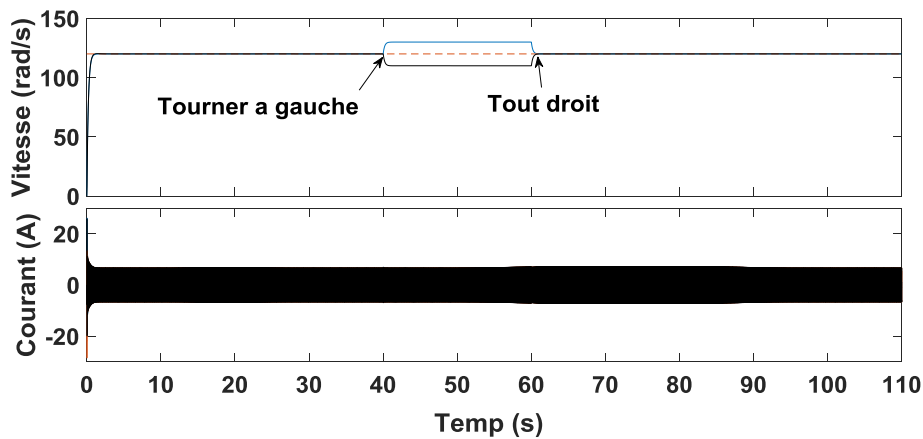


Fig. 5.2 Evolution de la vitesse et du courant de ligne en fonction du temps

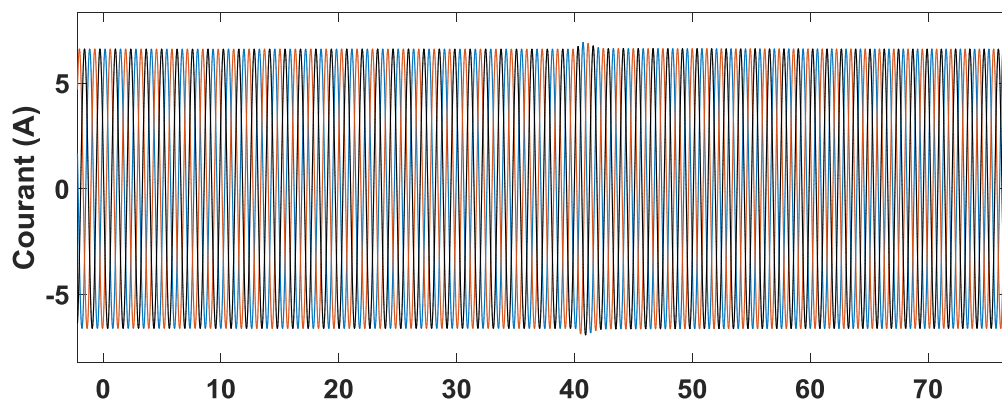


Fig. 5.2a Zoom de l'évolution du courant de ligne en fonction du temps

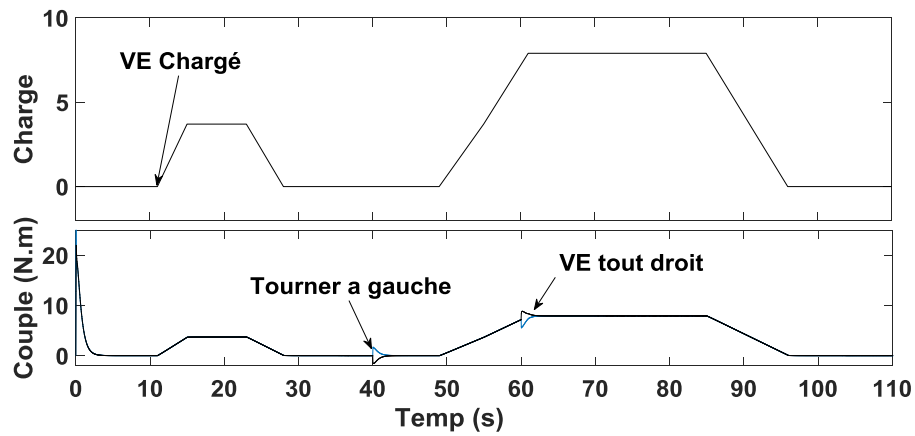


Fig. 5.3 Réponse du couple en fonction du temps pour la référence de charge 1

Les figures 5.3, 5.5 illustrent les réponses du couple de charge selon les références de charge 1 et 2, respectivement. Malgré la variation de la charge, les réponses obtenues sont très proches pour les couples de références avec une erreur relativement très faible.

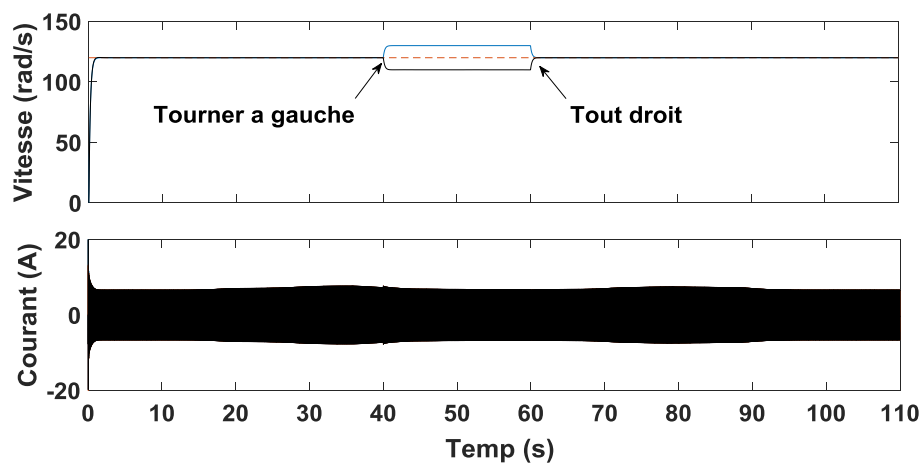


Fig. 5.4 Evolution de la vitesse et du courant de ligne en fonction du temps

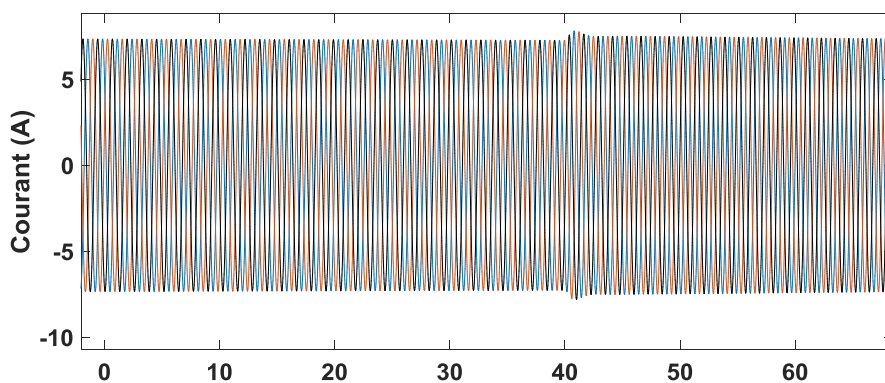


Fig. 5.4a Zoom de l'évolution du courant de ligne en fonction du temps

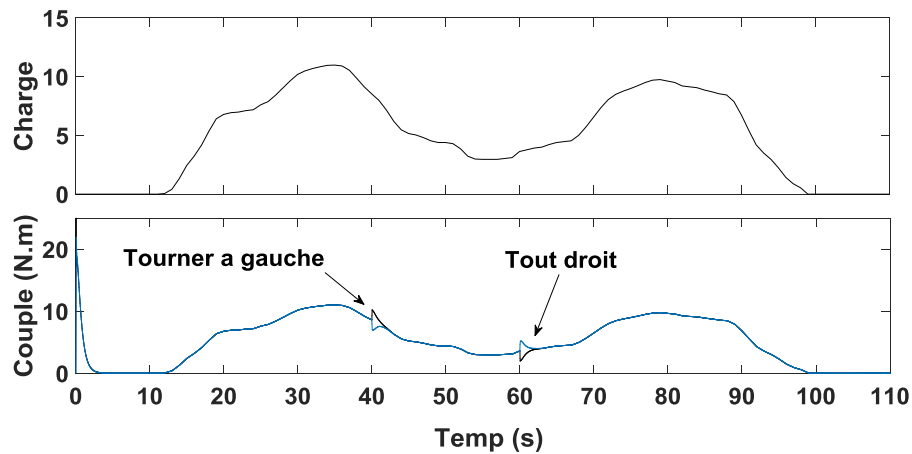


Fig. 5.5 Réponse du couple en fonction du temps pour la référence de charge 2

Comme le montrent les résultats de simulation, pour tous les scénarios, la méthode d'émulation du couple de charge est efficace, et a une bonne adaptabilité aux profils imprévisibles de charge associés à des manœuvres spécifiques du véhicule.

En outre, pour tester sévèrement les performances de l'approche d'émulation, un autre test comme le montre les figures 5.6, 5.7. et son zoom sur la figure 5.8 pour le profil de perturbation de charge (référence 3), associée à l'effet de bruit de mesure.

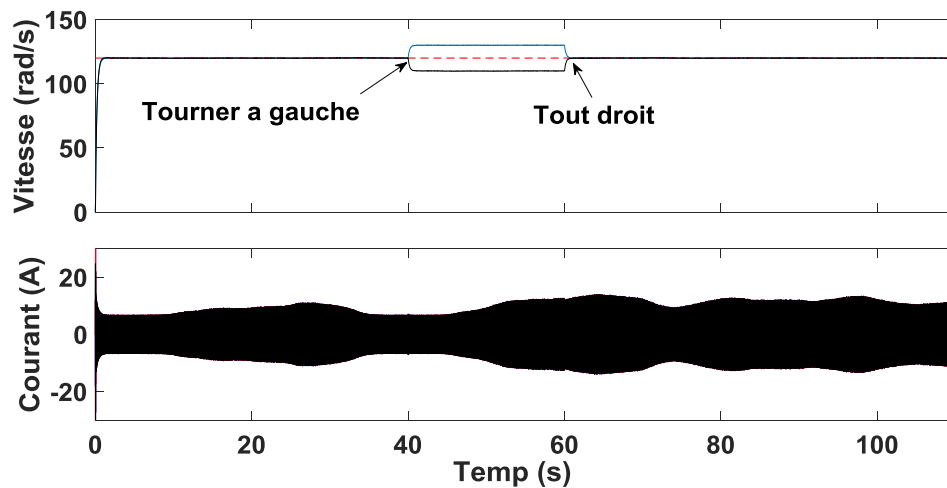


Fig. 5.6 Evolution de la vitesse et du courant de ligne en fonction du temps

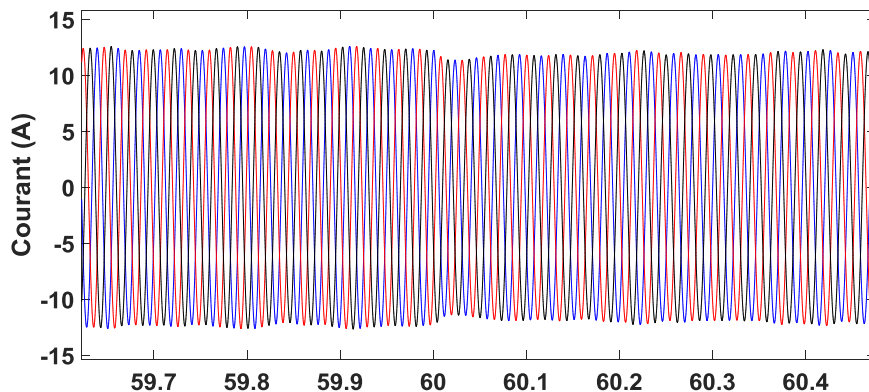


Fig. 5.6 Zoom de l'évolution du courant de ligne en fonction du temps

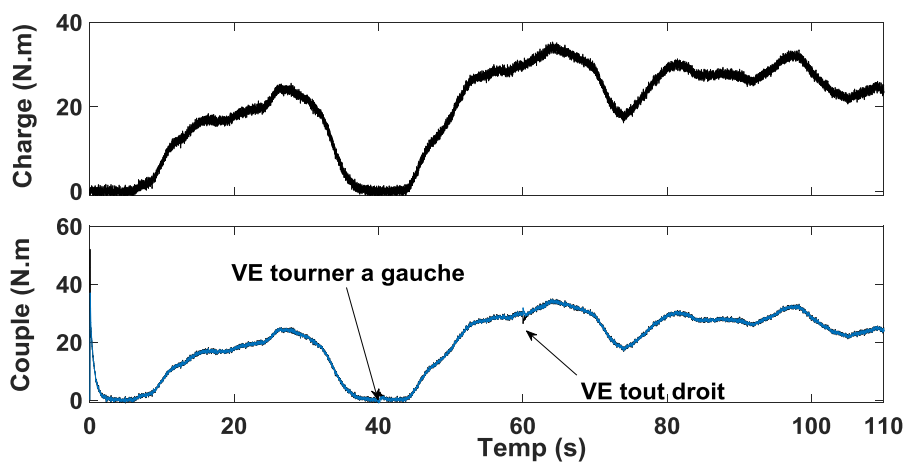


Fig. 5.7 Réponse du couple en fonction du temps pour la référence de charge 1

Dans ce cas, pour la charge de référence et la charge émulée, la réponse montre une correspondance étroite, mais associée à des oscillations du couple.

### 5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur l'émulation d'un couple de charge d'une roue appliqué à une structure de propulsion électrique bimoteur à induction entraînée par une commande vectorielle à flux rotorique orienté. A cet effet, un schéma de contrôle utilisant un générateur à courant continu couplé à un moteur à induction a été adopté pour effectuer l'émulation lors des manœuvres spécifiques du véhicule pour différents profils imprévisibles (trois références (scénarios)) de couple charges. Ce cas de figure, peut se

produire, par exemple, lorsqu'une roue du véhicule est freinée par un obstacle durant le cycle de conduite, alors que le moteur à induction est appelé à développer un couple important à vitesse nulle.

Les résultats de la simulation confirment largement la faisabilité et l'efficacité du système d'émulation proposé. En effet, les réponses en vitesse ont un bon suivi dynamique de la vitesse de référence, tandis que les réponses du couple correspondent étroitement au couple de charge souhaité avec une erreur d'émulation relativement très faible pour différents scénarios, mais présentent uniquement des oscillations de couple pour le profil de charge avec effet de bruit de mesure.

## Références 5

1. Z. Zhang, L. Wang, J. Zhang, R. Ma, "Study on Requirements for Load Emulation of the Vehicle with an Electric Braking System", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 66, No. 11, pp. 9638-9653, 2017, doi:10.1109/TVT.2017.2739425.
2. P. Fajri, L. Sangin, V. A.K. Prahala, M. Ferdowsi, "Emulating on-road Operating Conditions for Electric-drive Propulsion Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 31, No. 1, 2016, pp. 1-11, doi:10.1109/TEC.2015.2481180.
3. V. Chandrasekaran, B. Sykora, S. Mishra, N. Mohan, "A Novel Model Based Development of a Motor Emulator for Rapid Testing of Electric Drives", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Unii 11-15 Oct., Detroit, MI, USA, 2010, doi:10.1109/ECCE44975.2020.9235639.
4. B. Lei, N. Xiong, S. Li, K. Ren, "An emulation system of dynamic mechanical loads based on DTC induction 110kW motor", International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 26-29 Oct., Korea (South), 2013, doi:10.1109/ICEMS.2013.6713117.
5. H. Zha, Z. Zong, N. Jiang, Z. Liu, "Implementation of Space Vector Modulated Direct Torque Control for Electric Vehicle Dynamic Emulation", International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, 24-26 Aug., Changchun, China, 2010, doi : 10.1109/CMCE.2010.5610084.
6. C. M. R. De Oliveira, M. L. De Aguiar, P. R. U. Guazzelli, A. G. De Castro, S. T. C. A. D Santos, J. R. B. A. Monteiro, "Analysis of the dynamic emulation problem for validation of position control algorithms in machine drives", 13<sup>th</sup> IEEE International Conference on Industry Applications, (INDUSCON), 12-14 Nov 2018, pp. 1266-1273, Sao Paulo, Brazil, doi:10.1109/INDUSCON.2018.8627077
7. M. Rodič, K. Jezernik, M. Trlep, "Dynamic emulation of mechanical loads - position control approach", Proceedings of 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC, 6-8 Sept., 2010, Ohrid, Macedonia, doi:10.1109/EPEPEMC.2010.5606527
8. G. Aiello, G. Scelba, G. Scarcella, M. Cacciato, L.D. Tornello, A. Palmieri, E. Vanelli, C. Pernaci, R. Dio, "Real-Time Emulation of Induction Machines for Hardware in the Loop Applications", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 20-22 June, 2018, Amalfi, Italy, doi:10.1109/SPEEDAM.2018.8445326.
9. J. Taleires Filho, W. Bezerra Correia, V.P. Brandão Aguiar, R.S. Thé Pontes, "Motor test bench control for load profile emulation", 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 14-17 Oct., 2019, Lisbon, Portugal, doi:10.1109/IECON.2019.8927677.
10. L. O. Campos de Medeiros, J.C. Grilo Rodrigues, A.J. Junqueira Rezek, N. Oliveira Junior, R.DL. Corrêa, A. Viana Braga, C.E. Ghislain Ogoulola, V. Zimmermann Silva, M.L. Ramos, "Implementation of a Didactic Platform for a Generic Load Torque Emulator Using Induction Machines and PWM Inverters", IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 1-4 Dec. 2021, Santos, Brazil, doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065439.

11. R. Ahmadi, P. Fajri, M. Ferdowsi, "Dynamic modeling and stability analysis of an experimental test bench for electric-drive vehicle emulation", IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 22-23 Feb. 2013, Urbana, IL, USA, doi:10.1109/PECI.2013.6506040.
12. M. Rodic, K. Jezernik, M. Trlep, "Use of dynamic emulation of mechanical loads in the testing of electrical vehicle driveline control algorithms", European Conference on Power Electronics and Applications, 2-5 Sep. 2007, Aalborg, Denmark, doi:10.1109/EPE.2007.4417707.
13. F. Marignetti, D. D'Aguzzo, G. Volpe, "Design and experiments of a test equipment for hybrid and electric vehicle drive trains", Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 11-13 April, 2017, Monte-Carlo, Monaco, doi:10.1109/EVER.2017.7935902.
14. Q. Xie, C.H. L. Filho, G. Feng, W. Clandfield, N. C. Kar, "Advanced vehicle dynamic model for EV emulation considering environment conditions", 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 30 April-3 May, 2017, Windsor, Canada, doi:10.1109/CCECE.2017.7946794.
15. P. Fajri, S. Lee, V.A.K. Prabhala, M. Ferdowsi, "Modeling and Integration of Electric Vehicle Regenerative and Friction Braking for Motor/Dynamometer Test Bench Emulation", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 65, N°. 6, 2016, pp. 4264 – 4273, doi:10.1109/TVT.2015.2504363.
16. R. Sehab, T. Shanan, "Control Laws for the Emulation of an Electric Vehicle Drive train by Two Electric Machines", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 15-18 Oct., 2013, Beijing, China, doi:10.1109/VPPC.2013.6671670.
17. D. Antal, T. Kiss, P.T. Szemes, G. Husi, "Labview based dc motor dynamic load for testing rapid prototyping servo drives", International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems, 21-24 June, 2016, Narvik, Norway, doi:10.1109/SIMS.2016.7802908.
18. A. Unni, A.S. Kumar, R. Manoj, S. Sunil, V.C. Jishnu Sankar, "Design and Simulation of Test-bed for of Emulation Electric Vehicle Dynamics", Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 5-7 May 2021, Monte-Carlo, Monaco, doi:10.1109/EVER52347.2021.9456618.
19. R. Ma, J. Zhang, "Novel PI control algorithm for dynamic emulation of mechanical loads during transmission shift of electric vehicles", 2<sup>nd</sup> International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, Shenyang, China, 2019, pp. 234-240, doi:10.1109/AUTEEE48671.2019.9033284.

# Conclusion Générale

## 1. Travail accompli

Le cadre de cette thèse nous a offert la possibilité d'étudier par simulation numérique, les performances d'une structure de commande bimoteur à induction défaillant, destinée pour la propulsion d'un véhicule électrique. Pour parvenir à cet objectif, nous avons commencé dans le premier chapitre, par effectuer un bref rappel sur les principes de la propulsion électrique ainsi qu'une description sommaire des diverses technologies y intervenant en général, ce qui permet de replacer le sujet dans son contexte. Ensuite, nous avons présenté les dysfonctionnements qui affectent le moteur électrique, en se focalisant sur les défauts électriques et mécaniques. Enfin, nous avons présenté les méthodes les plus importantes utilisées dans le diagnostic des défauts.

Le deuxième chapitre a été consacré, à la modélisation du moteur à induction à l'état sain et à l'état défaillant avec un défaut électrique de court-circuit naissant entre spires de la première phase de l'enroulement du stator. Comme il a été souligné, ce défaut a été introduit dans deux modèles pour un moteur à induction, par une transformation du schéma équivalent, sans tenir en compte l'effet intrinsèque de la variation de la température, mais tout en reflétant l'effet du défaut sur le fonctionnement du moteur.

Les résultats obtenus par simulation ont montré l'influence que pouvaient avoir le défaut d'un court-circuit naissant sur les caractéristiques du moteur, surtout pour un nombre de spires court-circuitées relativement élevé.

A travers le troisième chapitre, le principe de trois stratégies de commandes d'un moteur à induction (la commande vectorielle (FOC), la commande directe du couple (DTC) et la commande Backstepping) a été présenté. Ensuite, nous avons également présenté et discuté trois types de défauts de capteur de vitesse intégrés dans les schémas des techniques de commande sus indiquées. Les résultats obtenus par simulation, ont montré l'influence que pouvaient avoir les défauts de capteur considérés, sur les performances de la commande d'un moteur à induction.

Dans le quatrième chapitre, une structure de commande d'un système de propulsion bimoteur à induction sain et/ou défaillant a été présentée et analysée.

Cette structure de propulsion ayant été contrôlée par les trois types de commandes avec l'activation d'un défaut électrique de court-circuit entre spires de la première phase dans l'un des deux moteurs de propulsion. En plus, de considérer des défauts de capteur de vitesse.

La simulation de cette structure, nous a permis de valider les résultats obtenus, en mettant en relief l'efficacité du contrôle ainsi proposé et l'influence que pouvaient avoir les différents défauts sur les performances de la commande de la structure de propulsion.

Enfin, à travers le chapitre cinq, on s'est intéressé à l'émulation d'un couple de charge d'une roue pour une structure de propulsion électrique bimoteur à induction entraînée par une commande vectorielle à flux rotorique orienté. A ce sujet, un schéma de contrôle utilisant un générateur de courant continu couplé à un moteur à induction a été adopté pour effectuer des tests de contrôle lors de manœuvres spécifiques du véhicule pour différents profils imprévisibles (scénarios) de couple de charges. Les résultats de simulation confirment largement la faisabilité et l'efficacité du schéma d'émulation appliqué au véhicule électrique pour les différents scénarios.

## **2. Suggestions & Perspectives**

Pour la continuité de ce travail, on propose ce qui suit :

- Etant donné que l'impact des défauts du capteur de vitesse était important, il sera donc très important d'envisager l'utilisation des méthodes qui permettent le diagnostic des défauts de capteur de vitesse dans un entraînement pour la structure de propulsion bimoteur à induction.
- Simuler le fonctionnement de la structure de propulsion du véhicule électrique par l'utilisation des méthodes de diagnostic et de détection rapide du défaut de court-circuit entre les spires d'une phase du stator et également sur les trois phases du moteur.
- Validation expérimentale du schéma de l'émulateur à courant continu, ce qui permettra par des essais pratiques de valider davantage nos résultats.

## ANNEXE

Table 1 : Paramètres du moteur utilisés dans les chapitres 2, 3 et 4

| Paramètre | Valeur                    |
|-----------|---------------------------|
| Puissance | 4 [Kw]                    |
| Voltage   | 220/380 V                 |
| Fréquence | 50 Hz                     |
| Rs        | 1.2 [ $\Omega$ ]          |
| Rr        | 1.8 [ $\Omega$ ]          |
| Ls=Lr     | 0.1564 [H]                |
| M         | 0.15 [H]                  |
| J         | 0.07 [Kg.m <sup>2</sup> ] |
| P         | 2                         |

Table 2 : Paramètres des régulateurs PI

|                          |   |
|--------------------------|---|
| Régulateur de vitesse PI | Intégrateur :2 ; Proportionnel : 5      |
| Régulateur de courants   | Intégrateur : 100 ; Proportionnel : 100 |
| $\Phi_{ref}$             | 1 [Wb]                                  |

Table 3 : Paramètres du moteur utilisés dans le chapitre 5.

| Paramètre | Valeur                      |
|-----------|-----------------------------|
| Puissance | 1.1 [Kw]                    |
| Voltage   | 230/380 [V]                 |
| Fréquence | 50 [Hz]                     |
| Rs        | 9.203 [ $\Omega$ ]          |
| Rr        | 3.7293 [ $\Omega$ ]         |
| Ls=Lr     | 0.135 [H]                   |
| M         | 0.1244 [H]                  |
| J         | 0.0035 [Kg.m <sup>2</sup> ] |
| P         | 2                           |

Table 4 : Paramètres du Générateur à courant continu.

| Paramètre        | Valeur                         |
|------------------|--------------------------------|
| Puissance        | 1.5 [Kw]                       |
| Vitesse          | 1400 [tr.min <sup>-1</sup> ]   |
| Ra               | 1 [ $\Omega$ ]                 |
| La               | 0.005 [H]                      |
| $K\phi$          | 1 [V.s]                        |
| J <sub>GCC</sub> | 0.0015 [Kg.m <sup>2</sup> ]    |
| f <sub>GCC</sub> | 0.0001 [N.m.rd <sup>-1</sup> ] |