

UNIVERSITÉ PARIS-SUD

ÉCOLE DOCTORALE 422 :
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
ET DES SYSTÈMES

Laboratoire de Génie Electrique de Paris

THÈSE DE DOCTORAT

PHYSIQUE

par

EL Hadji Sidath DIAO

Synthèse de Commande Tolérante aux Défauts pour des
systèmes critiques, à moteur triphasé, utilisés dans
l'automobile

Date de soutenance : 13/11/2014

Composition du jury :

Directeur de thèse :	Demba DIALLO	Professeur des Universités à l'Université Paris Sud
Encadrant :	Zaatar MAKNI	Docteur-Ingénieur (VALEO EEM)
Président du jury :	Gérard CHAMPENOIS	Professeur des Universités à l'Université de Poitiers
Rapporteurs :	Maria DAVID	Professeur des Universités à l'ENSEEIH de Toulouse
	Xavier KESTELYN	Professeur des Universités aux Arts et Métiers de Lille
Examineurs :	Claude Marchand	Professeur des Universités à l'Université Paris Sud
	Jean-François BISSON	Ingénieur-Chef d'équipe (VALEO EEM)

Introduction générale

Les entraînements électriques utilisant des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont adaptés pour une large gamme d'applications dans les voitures. Ces applications comprennent non seulement la propulsion mais aussi la suspension active, les compresseurs électriques et autres sous-systèmes électriques. Naturellement, une bonne tenue de certaines fonctions est de la plus haute importance et leur défaillance ne peut pas être tolérée car cela pourrait compromettre la sûreté. En outre, la dépendance vis à vis d'une alimentation continue est aussi source de problèmes car l'énergie électrique doit être transportée à bord, ce qui est généralement lourd et coûteux (batterie de stockage, piles à combustible,...). Cela nécessite une gestion d'énergie optimale afin d'éviter que certains défauts augmentent fortement la consommation d'énergie (par exemple, un défaut de capteur qui induit une surintensité).

Précisément, l'objectif de cette thèse est de détecter et isoler les défauts capteurs à leur stade initial et de procéder à une reconfiguration dans la mesure du possible. A cet effet, le travail va d'une étude théorique vers les validations expérimentales en passant par la simulation. Le contour de la thèse se résume comme suit:

- Dans le chapitre 1, les défis liés à l'utilisation des entraînements électriques dans l'automobile et les principes de commande tolérante aux défauts sont rappelés. Les conséquences des défauts dans le fonctionnement de l'entraînement électrique et les solutions existantes pour remédier aux conséquences de ces défauts sont examinées.

- Le chapitre 2 décrit le banc d'essai. Le système est conçu pour assurer les fonctions de traction et de charge de la batterie pour un véhicule électrique. Après la modélisation et la simulation de la MSAP et de son onduleur, la structure de commande est mise en œuvre en temps réel en utilisant Matlab / Dspace. Des essais expérimentaux sur le contrôle du couple de MSAP sont réalisés. Ensuite, le diagnostic en mode de traction en mettant l'accent sur les capteurs les plus critiques (position mécanique, des courants de phase et la tension de bus continue) peut maintenant être envisagé dans les prochains chapitres.

- La Commande Tolérante aux Défauts (CTD) du capteur de position / vitesse est traitée dans le chapitre 3. Les principales méthodes d'estimation de la position du rotor et la vitesse sont revisitées et leurs avantages / inconvénients critiqués. Par la suite, un nouvel estimateur basé sur une approche algébrique différentielle est conçu et les résultats expérimentaux sont fournis pour valider cette approche. Une comparaison par rapport aux méthodes existantes (Filtre de Kalman, observateur basé sur la fem) à l'aide de critères pertinents tels que la

précision et la facilité de mise en œuvre est également effectuée afin de mieux situer la nouvelle méthode. Enfin, la commande tolérante complète est réalisée et sa robustesse testée par des injections de défauts sur le capteur de position.

- Le chapitre 4 est consacré au diagnostic des capteurs de courant et du bus de tension continue. Dans ce chapitre, seule une détection et localisation de défauts est effectuée. Deux méthodes de diagnostic ont été développées pour les courants: une approche algébrique différentielle et une approche basée sur un traitement du signal. Parce que dans le système considéré trois capteurs de courant sont utilisés, l'étape d'isolation revêt une importance majeure. Après un rappel sur les méthodes couramment utilisées et une validation expérimentale des solutions mentionnées ci-dessus, une étude comparative est effectuée avec des injections de défaut sur le capteur de courant. Pour le capteur du bus de tension, un observateur à partir des courants de phase et des rapports cycliques est conçu pour surveiller le comportement du capteur. Les résultats expérimentaux sont également fournis pour soutenir l'approche proposée.

Chapitre I: Etat de l'art du diagnostic des entraînements électriques

1.1 Les entraînements électriques dans l'automobile

Un entraînement électrique peut être défini en termes de capacité à convertir efficacement l'énergie depuis une source électrique vers une charge mécanique [DeD2011]. Il est adaptable à la plupart des conditions de fonctionnement et peut être conçu pour fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

Aujourd'hui, l'énergie électrique est vue de plus en plus comme une solution à la pollution causée par les voitures, notamment celle liée aux émissions de CO₂ [Ber2010]. Dans les nouveaux véhicules, le nombre d'actionneurs électriques ne cesse de croître. Ils sont utilisés par exemple:

- pour compresser le gaz de refroidissement et fournir l'air conditionné.
- pour actionner les essuie-glaces,
- pour assister la direction;

Pour la propulsion, les machines électriques doivent fonctionner dans une large plage de vitesse avec des caractéristiques spécifiques définies par les constructeurs automobiles comme indiqué par exemple pour la figure 1.1 pour la Fluence Z.E de Renault. Par ailleurs, la machine électrique doit être également conçue sous diverses contraintes :

- Volume limité,
- Faible coût,
- Facilité d'entretien,
- Robustesse.
- Bruit

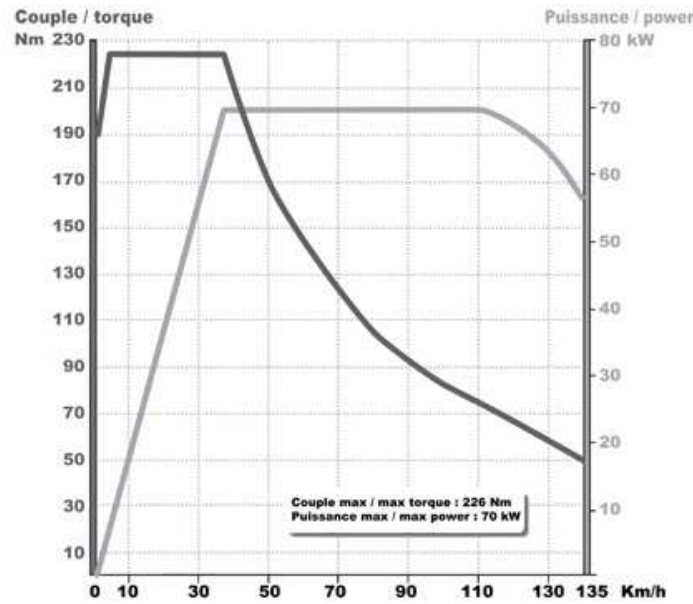


Figure 1.1 Courbes de couple et de puissance pour la Fluence Z.E.

Par conséquent, il y'a une grande concurrence entre les différentes technologies de machines. Malgré les difficultés liées au coût de terres rares utilisées dans les aimants permanents, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est un excellent candidat pour les entraînements électriques dans de nombreuses applications.

L'analyse des risques effectuée pour les véhicules électriques conduit à la nécessité de contrôler l'entraînement électrique pour détecter et diagnostiquer les défauts dans les meilleurs délais afin d'éviter toute défaillance.

1.2 Gestion des défauts

La sûreté de fonctionnement consiste à savoir, évaluer, prévoir et détecter les défaillances de contrôle des systèmes technologiques et les défaillances humaines pour éviter les conséquences sur la sécurité des personnes, la perte de productivité et les dommages à l'environnement.

Les principales activités liées à la surveillance d'un système sont regroupés dans la commande tolérante aux défauts qui se divise en trois étapes: la détection, l'isolation et la reconfiguration. La détection consiste à identifier en ligne les modifications sur le comportement d'une variable. L'isolation consiste alors à discriminer quelle organe a généré le symptôme détecté à partir des alarmes activées. Ensuite, la reconfiguration permet de fournir une action corrective de sorte à ramener le système dans son fonctionnement normal (ou dans un mode de fonctionnement dégradé, c'est-à-dire, toléré par le système).

Les efforts existants en matière de CTD peuvent être classés en deux grandes approches: passive et active. Dans une approche passive, les défauts et / ou des défaillances potentiels du système sont supposés connus a priori, et le système de contrôle prend en compte tous ces défauts et / ou des modes de défaillance au stade de la conception [Yan2000]. Une fois que le système de commande est conçu, il restera bloqué pendant le fonctionnement du système entier. En d'autres termes, dans un CTD passive, il faut s'assurer que le système de contrôle fonctionne dans tous les scénarios possibles de fonctionnement du système qui ont été examinées lors de la phase de conception. Cependant, le comportement du système reste inconnu et pourrait se révéler inacceptable voire dangereux en présence de défaillances inattendues.

En revanche, une CTD active réagit aux défauts en reconfigurant correctement ses actions de contrôle de sorte que la stabilité / performance de l'ensemble du système soit acceptable. La méthode active utilise une démarche explicite pour adapter la loi de commande à l'état du système.

Dans la figure 1.2, les données utilisées pour le diagnostic sont une combinaison des sorties de l'onduleur et des capteurs. Le choix d'utiliser des caractéristiques saines et leur disponibilité dépend du type de défaut.

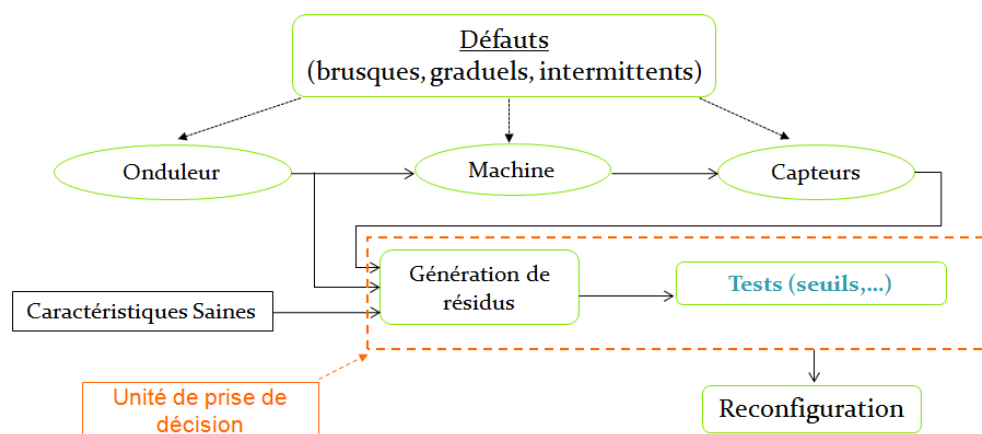


Figure 1.2 Commande Tolérante aux Défauts

Dans l'industrie automobile, il est très apprécié que l'entraînement électrique soumis un défaut puisse continuer à fonctionner, bien sûr à l'exception des cas de dommages majeurs irréversibles sur le moteur ou sur l'alimentation. La façon la plus commune est de faire une redondance matérielle complète, mais elle génère un coût supplémentaire qui ne peut être ignoré et l'objectif est de réduire ce coût tout en ayant un système sûr.

Chapitre II: Description et modélisation de la plateforme SOFRACI

2.1 La structure SOFRACI : un système conçu pour la tolérance aux pannes

L'objectif du projet SOFRACI (Structure onduleur fort rendement à fonction de charge intégrée) était de développer une architecture innovante pour réaliser les fonctions de traction, de régénération et de charge [Sil2009]. Pour ce faire, une unique chaîne de puissance est utilisée pour la charge et la traction du véhicule, permettant de:

- Réduire le nombre global de composants
- Intégrer la fonction de charge sans composant électronique supplémentaire
- Fournir un mode de fonctionnement dégradé à l'utilisateur en cas de défauts critiques

La chaîne de conversion d'énergie est composée d'une machine électrique (MSAP), d'une alimentation électrique, d'un convertisseur de puissance et des capteurs pour les mesures requises par la boucle de commande. La MSAP dispose de 4 paires de pôles au rotor avec une puissance nominale de 15 kW et une vitesse maximale de 13 000 tours par minute. Le convertisseur de puissance est constitué de six bras d'IGBT. Il permet de contrôler les trois courants de façon indépendante par 3 ponts en H. Le découplage du bus DC est réalisé par une série de condensateurs en polypropylène d'une valeur totale de 2,3 mF.

La mise en oeuvre des régulateurs nécessite des mesures de la position du rotor, des courants de phase et de la tension du bus continu. Un codeur incrémental donne la position mécanique du rotor. Les mesures de courant sont réalisées par trois capteurs à effet Hall LEM (LEM LA 55-P). Ils peuvent mesurer des courants AC et DC jusqu'à 50 A (largeur de bande passante de 200 kHz, précision de $\pm 0,65\%$). La tension du bus DC est mesurée par un varistor V661BA60.

En termes de diagnostic, la topologie SOFRACI offre de nombreux avantages. En effet, les phases de la machine étant physiquement et électriquement isolées; elle est conçue pour assurer une continuité de fonctionnement après des défauts sévères (par exemple la perte d'un bras d'onduleur) [Kol2013]. Pour les défauts de capteurs (position, courants de phase et bus de tension continue), les mêmes capacités de diagnostic sont maintenues par rapport à la structure classique à trois phases. En effet, la capacité à diagnostiquer une mesure défectueuse

est indépendante de la topologie de la machine. Elle est beaucoup plus liée à la conception du système et aux informations disponibles (disponibilité d'autres capteurs).

2.2 Commande de l'entraînement électrique en mode traction

En général, pour l'autopilotage des machines tournantes, une commande vectorielle est généralement utilisée avec deux boucles imbriquées: un régulateur de vitesse et un régulateur de courant [Col2012].

2.2.1 Régulateur de courants

Dans le contrôleur représenté à la figure 2.1, deux régulateurs PI sont conçus et réglés pour assurer un bon suivi des références i_{d_ref} et i_{q_ref} dans le référentiel de Park. Le régulateur de vitesse (également un PI) fournit la référence de courant. Les tensions de référence v_{abc} sont calculées par le régulateur de courant et le bloc MLI génère les signaux de commande pour piloter l'onduleur.

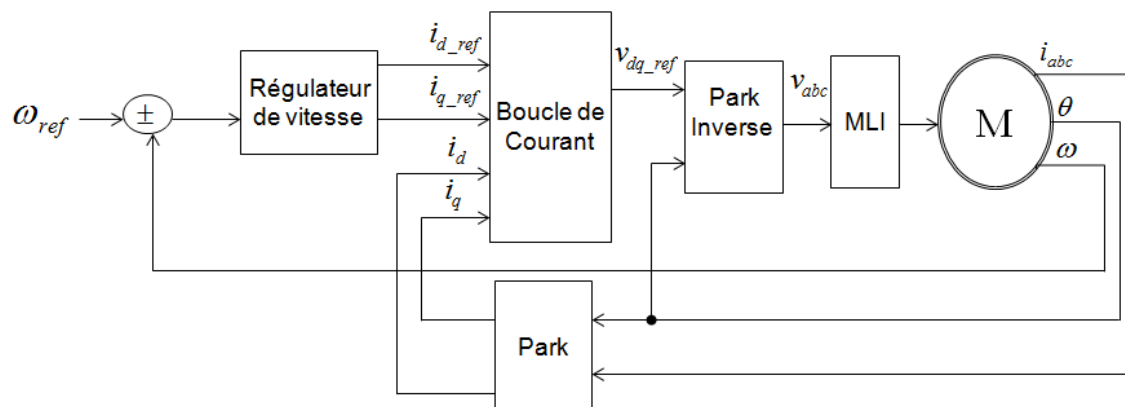


Figure 2.1: Régulateur de courant

Un correcteur de courant PI est écrit comme suit: $C(s) = k_p \left(1 + \frac{k_i}{s}\right)$ où k_p est le gain proportionnel, k_i le gain intégral. L'action proportionnelle permet d'améliorer la rapidité du système et permet d'ajuster la qualité de la réponse transitoire. L'action intégrale assure une erreur statique nulle en régime permanent. Il est évident que la performance de régulation dépend du réglage des gains du PI, une tâche compliquée par les variations naturelles des paramètres électriques. En effet, la résistance, les inductances du stator et la constante de flux varie avec la vitesse, le niveau de saturation et la température. De plus, il n'y a pas de modèles analytiques fiables et robustes qui peuvent être utilisés pour la mise à jour en ligne de ces paramètres. Ainsi, pour un contrôle efficace, les gains du PI doivent être réglés par rapport au

cahier des charges. Ce dernier peut être décliné en termes de marge de phase et de gain, ou lorsqu' on a identifié le système en boucle fermée à un système du second ordre, les spécifications peuvent être définies en termes de temps de réponse, de dépassements, etc.

2.2.2 Régulateur de vitesse

Un contrôleur est nécessaire afin de transformer correctement la référence mécanique de vitesse en référence électrique de courant (Figure 2.2).

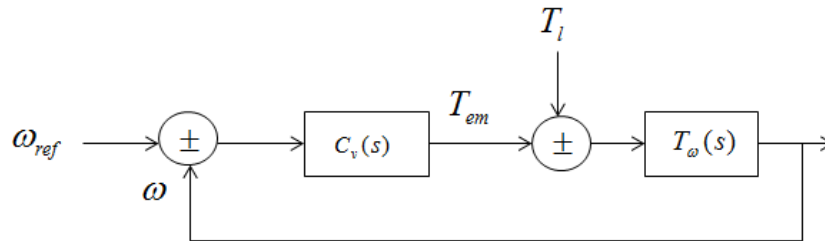


Figure 2.2 Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse est écrite comme suit: $C_v(s) = k_{pv} \left(1 + \frac{1}{T_{iv}s}\right)$

2.2.3 Commande de l'onduleur à ponts H

Pour notre entraînement électrique, le modèle utilise un calcul scalaire pour déterminer les commandes à appliquer aux trois ponts en H de l'onduleur. Les entrées de ce modèle sont les trois tensions de référence et la tension du bus continu. Une modulation intersective est effectuée pour déterminer les 6 rapports cycliques.

Pour chaque phase, le rapport cyclique α est donné par le rapport entre la tension de référence et la tension du bus continu. Ensuite, le signal MLI, qui définit la tension de commande de l'IGBT, est obtenu par l'intersection d'une porteuse (triangulaire à haute fréquence) et le rapport cyclique.

2.4 Conclusion

Dans cette deuxième section, nous avons tout d'abord présenté le projet SOFRACI qui est une structure innovante qui permet de combiner les fonctions de recharge de la batterie et de traction [Des2010]. Une de ses principales caractéristiques est l'utilisation des enroulements de la machine pour le filtrage inductif lorsque le véhicule fonctionne en mode chargeur. Ceci est obtenu avec une machine triphasée avec trois bobines de stator distinctes ayant un point milieu accessible. Le convertisseur électronique de puissance est composé de trois ponts H.

En second lieu, nous avons présenté la commande de l'entraînement électrique pour le mode de traction. Ensuite, la synthèse de la régulation de la vitesse et de courant a été présentée. Dans le chapitre suivant, la commande tolérante aux défauts du capteur de position mécanique sera étudiée.

Chapitre III: Commande Tolérante aux Défaits du capteur de position

3.1 Impact d'un défaut de capteur de position sur l'autopilotage

Les systèmes de contrôle de la MSAP sont généralement équipés d'un capteur de position. En fait, la commande vectorielle utilisée nécessite que la position soit déterminée avec précision pour que la production de couple soit efficace. En effet, la position du rotor est nécessaire pour transformer les courants de phase en deux composantes découplées. De ce fait, le contrôle se trouve en défaut lors d'une erreur sur la mesure de la position du rotor.

Il est très difficile de définir un seuil de tolérance à une erreur du capteur de position. Chaque application, conformément à ses spécifications et à son niveau de sûreté, requiert un niveau d'erreur correspondant à l'ondulation globale de couple souhaitée et à la consommation de courant. Pour effectuer la CTD du capteur de position, nous mettrons en place une redondance logicielle à base d'estimateurs.

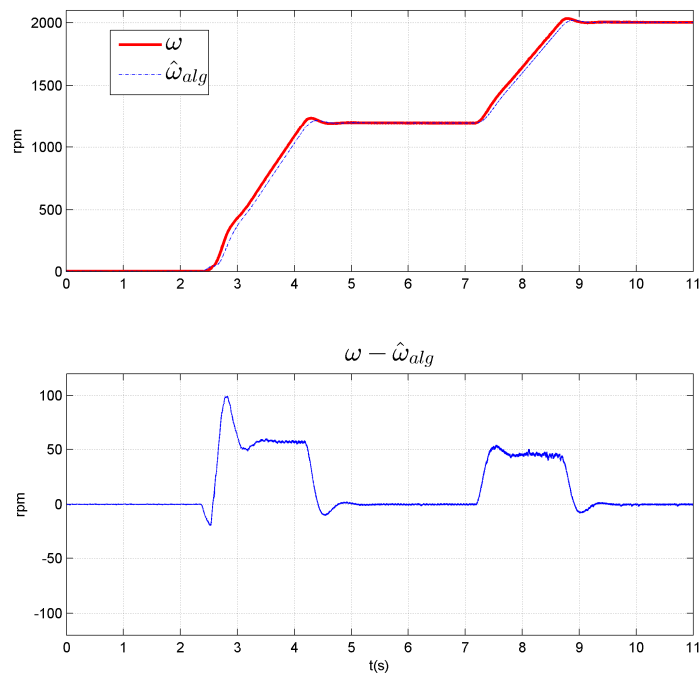
La surveillance du capteur de position par des estimateurs est bien adaptée pour les applications critiques dans lesquelles les règles de sécurité exigent un capteur mécanique pour le fonctionnement, mais autorisent une solution logicielle pour le diagnostic plutôt que de mettre en place une redondance matérielle. Pour certaines applications de sécurité un peu moins critique, aucun capteur mécanique n'est monté sur l'arbre de la machine et la position est obtenue à l'aide d'estimateurs. Afin de détecter et de diagnostiquer une panne de capteur, les règles de sécurité recommande d'avoir au moins trois mesures de la même information, dont deux avec des sources décorréélées [Ise2006].

L'estimation de la position du rotor pour les MSAP est encore une question ouverte, car à basse vitesse, la force électromotrice est trop petite et l'observabilité peut être perdue dans certains cas. De ce fait, les méthodes basées sur la force électromotrice sont destinées à être exploitées dans la plage de la moyenne à la haute vitesse. Le filtre de Kalman étendu (EKF) est un autre candidat. Il a de fortes propriétés de robustesse mais sa conception n'est pas facile. De plus, l'initialisation de l'algorithme est non-déterministe en raison des valeurs initiales inconnues. En outre, le filtre de Kalman étendu assure seulement une convergence locale, ce qui peut être gênant pour le démarrage de la MSAP. Enfin, la méthode d'injection de signal à haute fréquence utilise un traitement de signal pour donner des informations précises sur la position à très faible et à vitesse nulle, mais elle n'est applicable qu'aux machines avec saillance magnétique. En outre, il dispose d'une plage de vitesse limitée et sa mise en œuvre

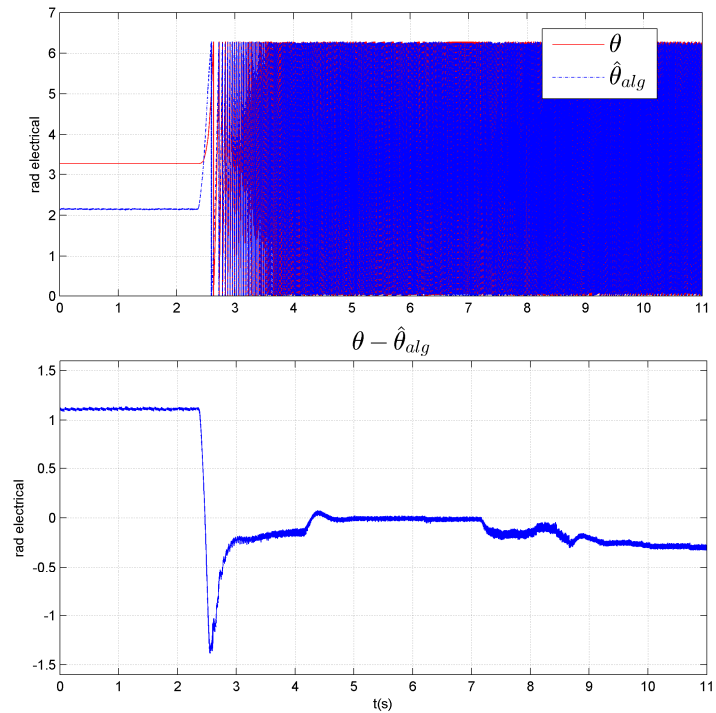
est fastidieuse et nécessite une grande précision de calcul.

3.2 Estimateur algébrique

Pour remédier aux difficultés énumérées ci-haut, nous avons développé au cours de cette thèse une méthode d'estimation de la position du rotor basée sur une approche algébrique. Ses principaux avantages sont sa simplicité (un modèle à une seule dimension) et le fait que l'observabilité de la position n'est pas dépendante de la vitesse. En outre, l'observabilité à basse vitesse est obtenue à condition que les courants et les tensions soient disponibles. Des tests expérimentaux ont été effectués et ont montré l'efficacité de la technique. Les erreurs dans les estimations de position et de vitesse en régime permanent sont très faibles. Ainsi, le profil suivant pour une vitesse mécanique de 0 à 2000 rpm est considéré en mode sans capteur (Figure 3.1).



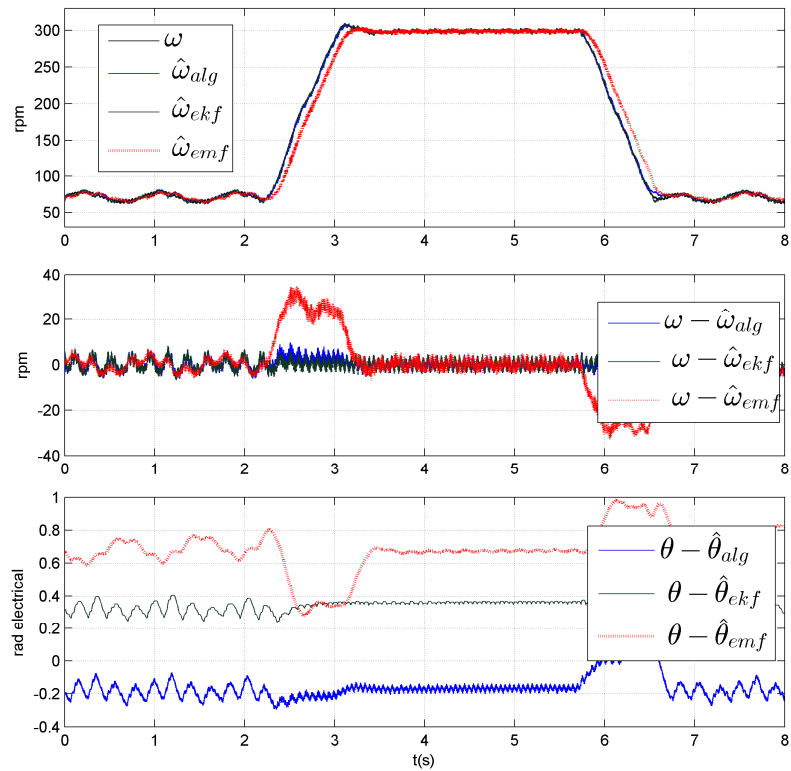
a) Estimation de vitesse



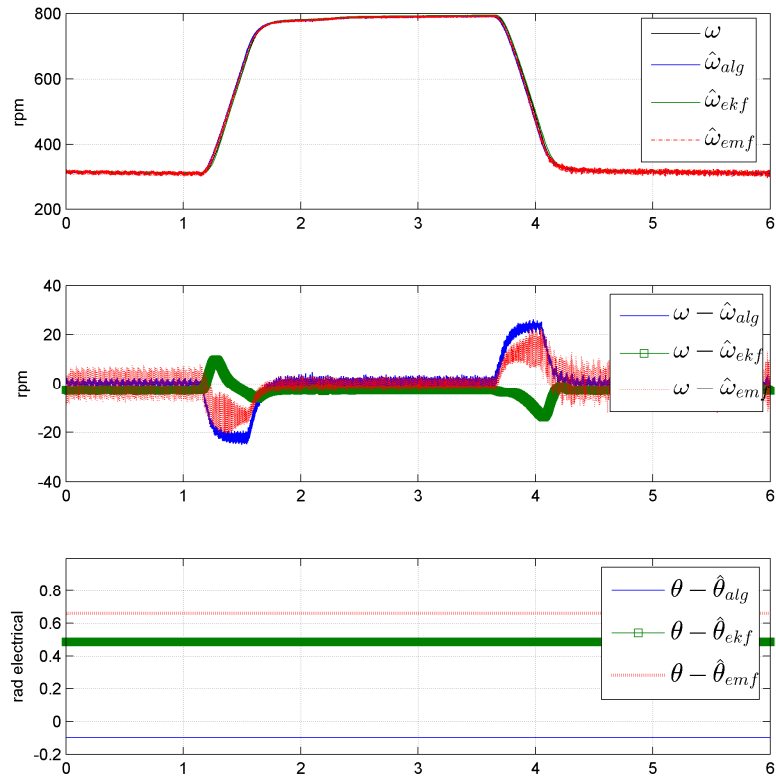
b) Estimation de position

Figure 3.1 Estimateur algébrique en commande sans capteur de 0 à 2000 rpm

Les erreurs en régime permanent sont respectivement -0.05 rad (à 1400 rpm) et de -0,3 rad (à 2000 rpm).



a) Fonctionnement à très basse vitesse



b) Fonctionnement à basse vitesse

Figure 3.2 Comparaison des estimateurs

Une rapide comparaison avec les autres estimateurs (filtre de Kalman et estimateur basé sur la fem) en basse vitesse montre la meilleure tenue de l'estimateur algébrique sur cette plage de fonctionnement (Figure 3.2). Pour la détection et l'isolation, la stratégie est basée sur la combinaison de deux capteurs virtuels (estimateur algébrique et le filtre de Kalman) avec le capteur mécanique. Lors de la reconfiguration de la commande, la sélection de la position et de la vitesse se fait par un algorithme de vote (Figure 3.3).

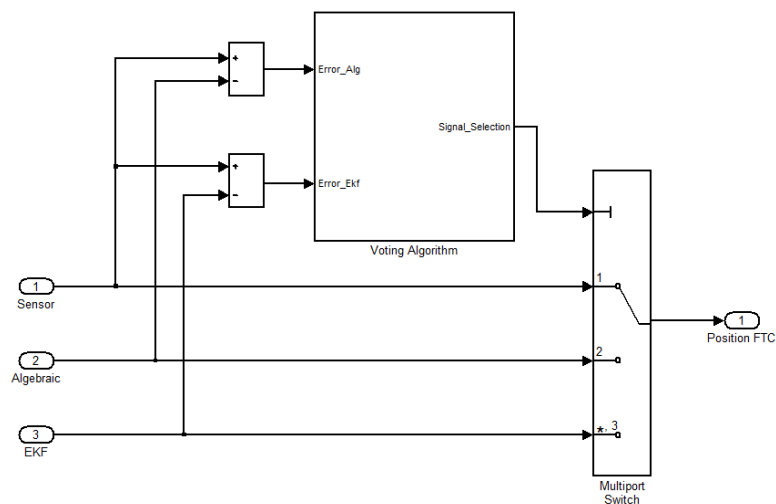


Figure 3.21 CTD pour le capteur de position

Plusieurs algorithmes de vote ont été utilisés pour la détection [Ven2003]. Dans notre cas, l'algorithme de vote basé sur la majorité a été choisi. Le schéma est présenté à la figure 3.4.

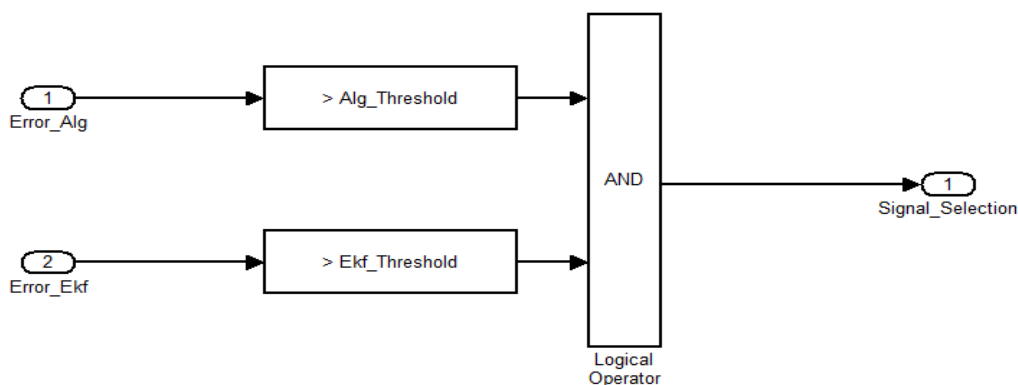
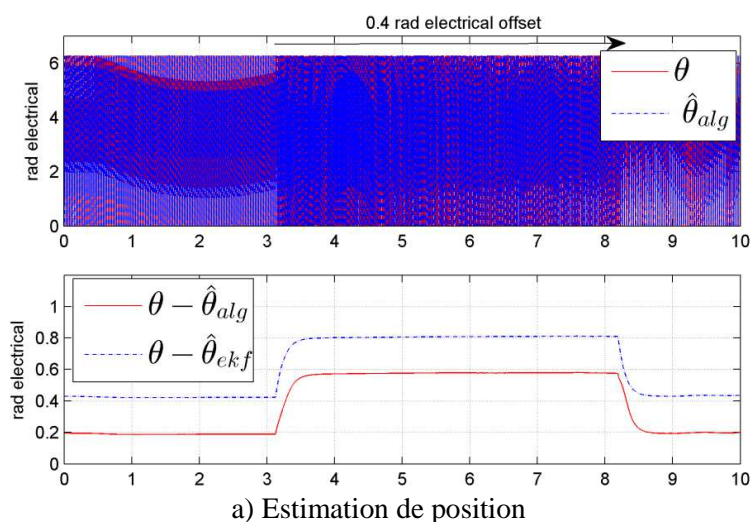


Figure 3.4 Algorithme de vote

Alg_Threshold et Ekf_Threshold représentent les seuils de détection.

3.3 Commande Tolérante aux défauts du capteur de position

Après de nombreux essais expérimentaux, il a été constaté que, pour des erreurs de position électrique inférieure à 0,4 radian, les contrôleurs PI sont suffisamment robustes pour faire face à la défaillance. Au-delà de cette valeur, des effets indésirables surviennent et la détection de défaut devient plus que nécessaire. L'unité de détection de défaut et d'isolation est d'abord testée avec un défaut de capteur brusque (décalage de 0,4 rad électrique entre $t = 3.13s$ et $t = 8.13s$) comme le montre la figure 3.24.



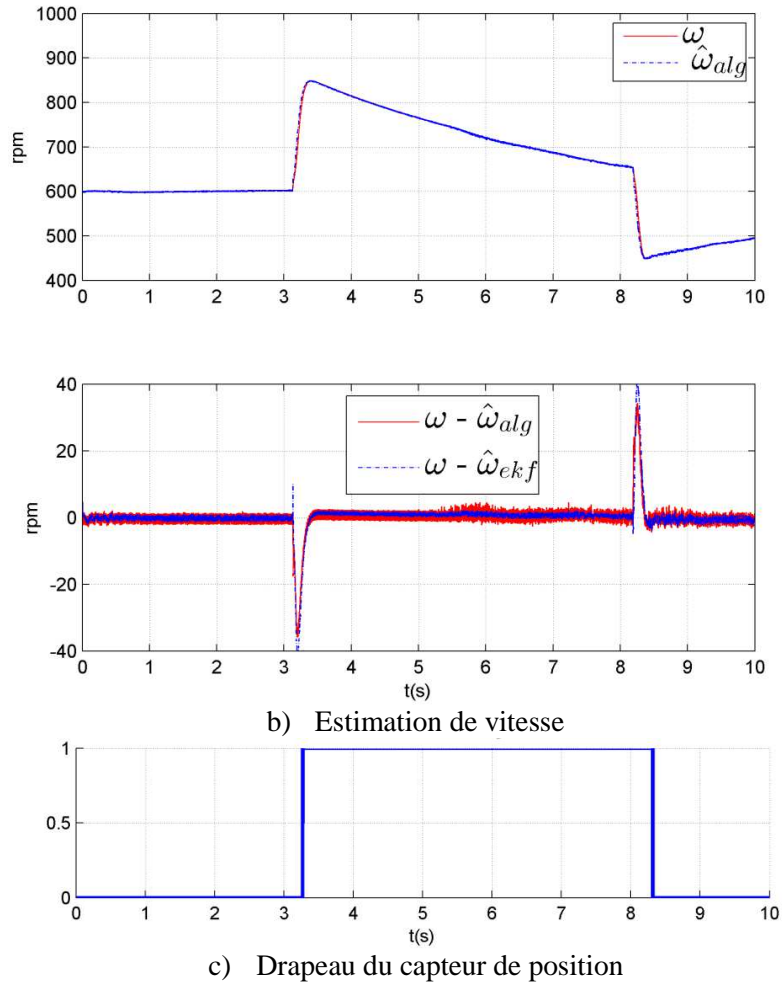
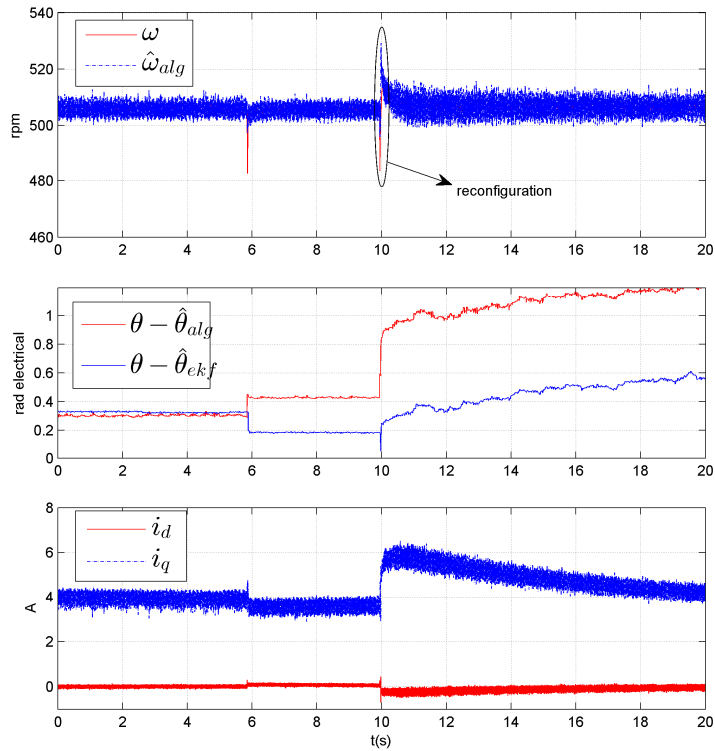
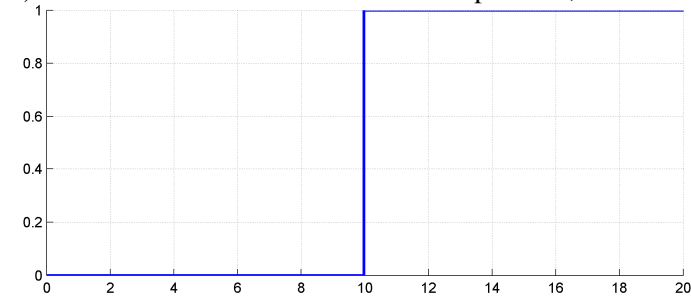


Figure 3.5 Détection d'un défaut brusque

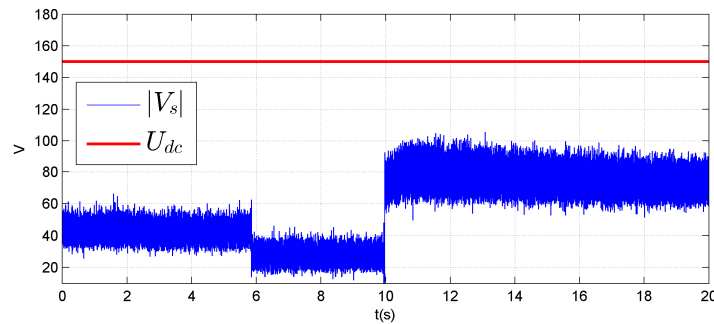
Le seuil est établi à 0,25 pour l'estimateur algébrique et 0,45 pour l'EKF en fonction de l'évolution des erreurs d'estimation de position. Le défaut est détecté après 0,08s (Figure 3.5c) et comme aucune action n'est prise, la conséquence est la perte du contrôle de la vitesse pendant le défaut (figure 3.5b). Ainsi, il est essentiel de mettre en place une stratégie de reconfiguration. Le cas d'une reconfiguration après un défaut graduel lent est maintenant étudié. Les résultats sont présentés dans la figure 3.6a.



a) Erreurs d'estimation de vitesse et de position, courants



b) Drapeau du capteur de position



c) Tensions de référence et bus DC

Figure 3.6 Commande Tolérante aux defaults avec des biais additifs sur le capteur de position

A $t = 5.8\text{s}$, un premier petit décalage est inséré, mais son ampleur n'est pas assez élevée pour être détecté. Le décalage est augmenté à $t = 10\text{s}$. L'accumulation des deux biais conduit à la détection avec le drapeau affiché dans la figure 3.6b. En outre, la variation des tensions de référence est acceptable. Le module de tension de commande est inférieure à la tension du bus

continu tel qu'il apparaît sur la figure 3.6c avec $|V_s| = \sqrt{\frac{2}{3}(V_d^2 + V_q^2)}$. Ainsi, lors de la reconfiguration, la saturation a pu être évitée.

3.5 Conclusion

Un capteur virtuel basé sur une approche algébrique différentielle a été développé pour estimer la position et la vitesse. Sa bonne tenue à basse vitesse a été illustrée et sa comparaison avec l'EKF et l'algorithme basé sur la f.e.m a montré ses avantages en basse vitesse. Les résultats expérimentaux ont montré l'efficacité de la technique et de son association avec l'EKF pour la CTD a donné de bons résultats. L'efficacité de la stratégie de diagnostic a été évaluée et la nécessité d'utiliser deux estimateurs pour le diagnostic illustrée.

Chapitre IV: Diagnostic des capteurs de courant et du bus de tension continue

4.1 Besoins en diagnostic pour les capteurs de courants de phase et de bus de tension continue

Les capteurs de courant sont généralement utilisés pour le contrôle, la supervision et/ou la surveillance des entraînements électriques.

Évidemment, dans les deux cas, les défauts ou défaillances du capteur ne sont pas acceptables et l'approche la plus commune consiste à mettre en œuvre une redondance matérielle. Cependant, la nouvelle tendance est de réduire le nombre de composants et de mettre en œuvre des capteurs virtuels dans le circuit de commande numérique déjà conçu. Les avantages sont la réduction du coût global à long terme, la diminution du taux d'erreur et une conception plus souple. Dans le projet SOFRACI, trois capteurs de courant à effet Hall sont utilisés (un par phase). Cela est dû au fait que les phases sont découplées magnétiquement et physiquement. Par conséquent, utiliser le fait que les courants sont équilibrés pour déduire le troisième courant de phase de deux mesures n'est plus acceptable puisqu'un courant homopolaire circule. Les différents types d'erreurs de mesure pour un capteur à effet Hall pouvant provenir des propriétés des matériaux ou de la variation de température sont un décalage, une erreur de gain ou de sensibilité et une erreur de linéarité.

Deux méthodes de diagnostic de capteur de courant ont été développées et validées expérimentalement. La première est une estimation basée sur un modèle de la dynamique du courant dans le référentiel fixe par une approche algébrique différentielle. Le second est une analyse des formes d'ondes de courant dans le référentiel tournant, référentiel dans lequel le contrôle vectoriel a lieu. En outre, un estimateur de la tension du bus continu est développé et testé à l'aide des courants de phase et des rapports cycliques.

Dans le contrôle des entraînements électriques, la tension continue du bus est mesurée aux bornes du condensateur électrolytique, qui agit comme un dispositif de stockage d'énergie. C'est la connexion électrique entre la première source d'énergie (batterie par exemple) et le convertisseur d'énergie DC / AC. En conséquence, la tension mesurée est une information essentielle pour le calcul des rapports cycliques et le niveau de saturation des tensions de commande. Tout comme pour le capteur de position, un observateur peut être une solution

efficace en cas de panne pour assurer la continuité de l'opération avec des performances acceptables ([Ohn2004]).

4.2 Détection et Isolation de défauts pour les capteurs de courant de phase

4.2.1 Diagnostic avec une approche algébrique dans le référentiel stationnaire

La première méthode utilise une approche algébrique du diagnostic [Ibr2003] où le défaut du capteur est modélisé dans un premier temps. Ensuite, la variable qui représente le défaut est reconstruite à travers des estimateurs représentés par des équations différentielles algébriques. La figure 4.1 illustre son implémentation avec les indices α et β qui représentent les composantes dans le référentiel stationnaire.

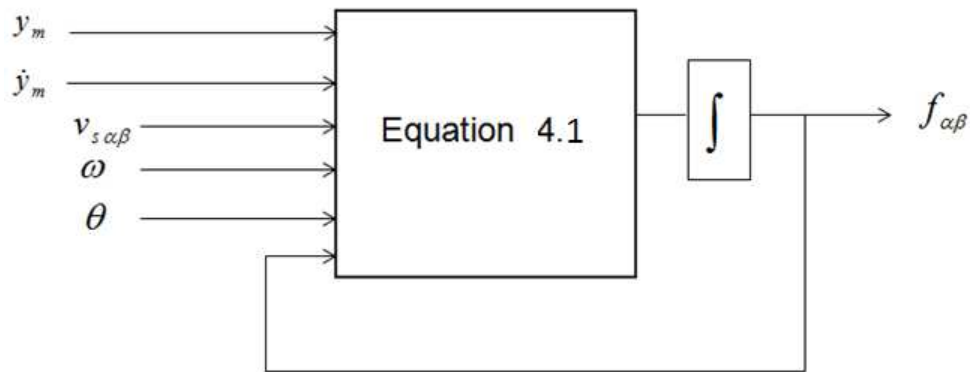


Figure 4.1 Implémentation de l'estimateur algébrique pour le diagnostic des capteurs de courants

$$\begin{cases} \dot{f}_\alpha = -\frac{R_s}{L} f_\alpha + \frac{R_s}{L} y_{1m} - \frac{\phi\omega \sin \theta}{L} - \frac{u_1}{L} + \dot{y}_{1m} \\ \dot{f}_\beta = -\frac{R_s}{L} f_\beta + \frac{R_s}{L} y_{2m} + \frac{\phi\omega \cos \theta}{L} - \frac{u_2}{L} + \dot{y}_{2m} \end{cases} \quad (4.1)$$

A partir des sorties f_α et f_β , une structure d'isolation est mise en place et définie comme suit :

- $|f_\alpha| > thr$ et $|f_\beta| < thr \Rightarrow$ Capteur de la phase A est en défaut
- $f_\alpha > thr$ et $f_\beta > thr$ et $f_\beta * f_\alpha < 0 \Rightarrow$ Capteur de la phase B est en défaut
- $f_\alpha > thr$ et $f_\beta > thr$ et $f_\beta * f_\alpha > 0 \Rightarrow$ Capteur de la phase C est en défaut

où thr est le seuil.

Cette structure d'isolation fournit trois sorties logiques permettant d'activer le diagnostic des capteurs de courant. Le test expérimental suivant est effectué pour évaluer la méthode.

Un biais de -1A est inséré expérimentalement en temps réel sur le capteur de courant de la phase C à $t = 1,1826$ s. Ce défaut représente **16%** de l'amplitude du courant de phase en régime permanent. La figure 4.2 montre les résultats expérimentaux de l'estimateur d'erreur avec l'approche algébrique différentielle pour un seuil fixé à **0,3**. Malgré les ondulations et les bruits, les erreurs d'estimation sont acceptables.

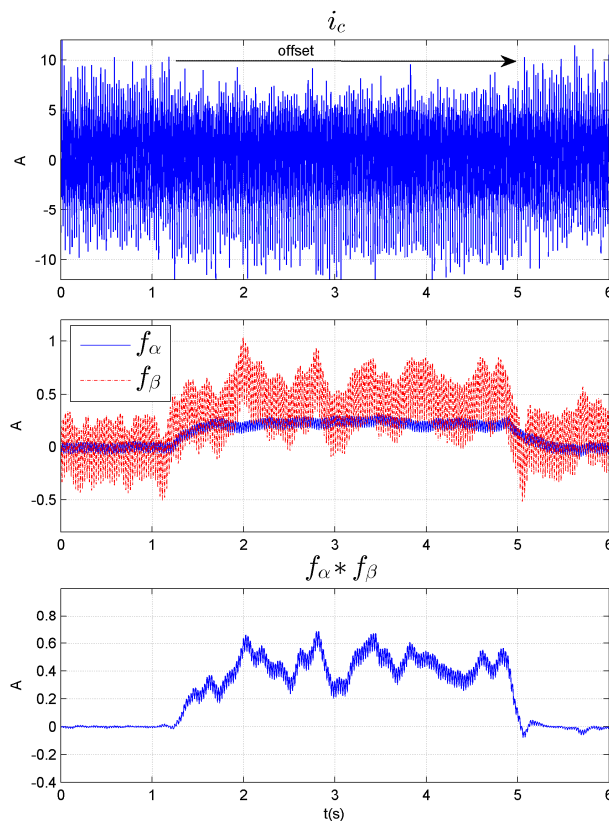


Figure 4.2 Estimation des résidus dans le référentiel fixe (α,β)

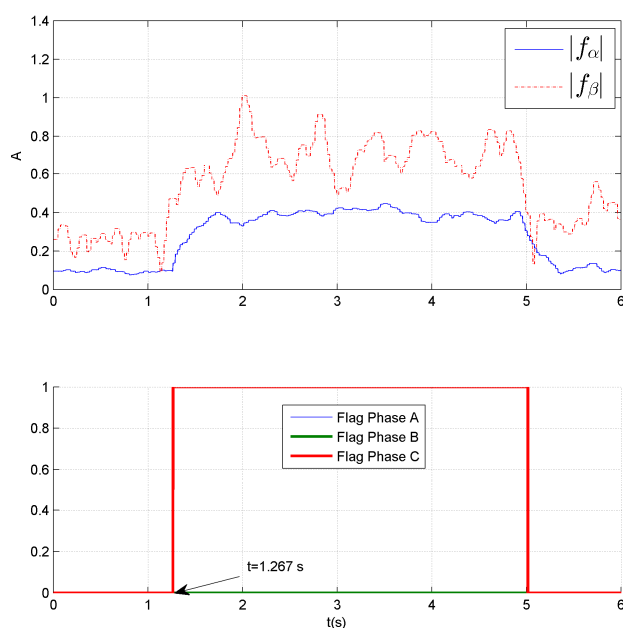


Figure 4.3a drapeaux pour les 3 capteurs

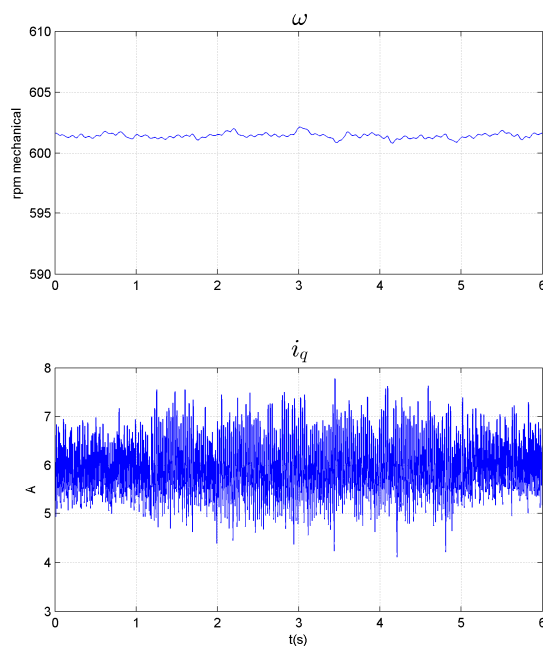


Figure 4.3b Vitesse mécanique et courant d'axe q

A l'apparition du défaut ($t = 1.1826s$), f_α et f_β augmentent et deviennent supérieurs à **0.3**. De plus, f_α et f_β ont le même signe. D'après le processus d'isolation que nous avons établi, un défaut sur la phase C est diagnostiqué avec une durée de détection $\Delta t=0.085s$ (Figure 4.3a). Comme prévu, nous remarquons une accentuation des ondulations de couple sur le courant d'axe q durant le défaut, toutefois cela n'a pas d'impact sur la vitesse du moteur (Figure 4.3b).

4.2.2 Diagnostic par une analyse des formes d'onde du courant dans le référentiel tournant

L'idée principale de cette méthode est d'étudier les courants mesurés dans le référentiel tournant. Nous rappelons que c'est dans ce même référentiel que la commande vectorielle a lieu. Les courants dans ce référentiel sont des grandeurs quasi-continues et à l'apparition d'un défaut sur l'un des capteurs, une composante sinusoïdale vient se superposer à la grandeur continue. Cette composante sinusoïdale qui est la résultante du défaut de capteur de courant (biais, gain) dans le référentiel tournant est le point de départ de la stratégie de diagnostic qui est illustrée par la figure 4.4.

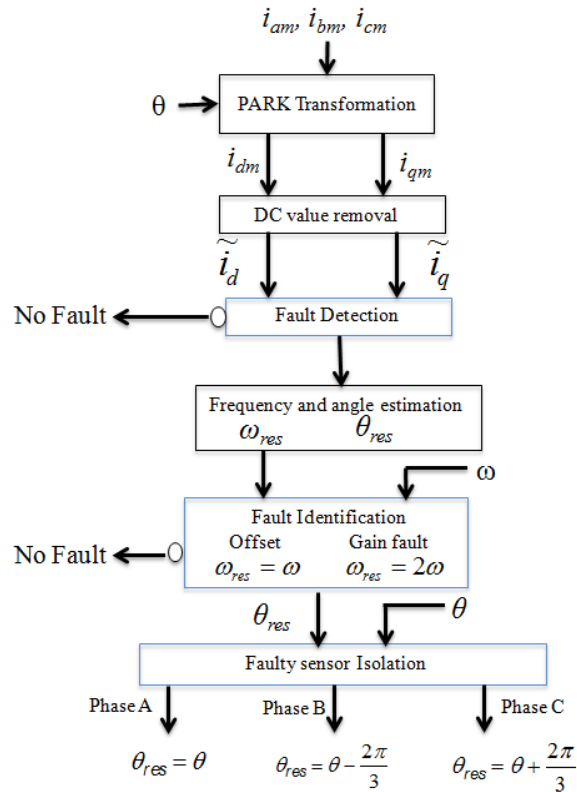


Figure 4.4 Analyse des courants dans le référentiel tournant pour le diagnostic des capteurs

La première tâche consiste à retrancher aux courants d, q leurs valeurs moyennes et permet de dire si une composante sinusoïdale est apparue. Ensuite, la deuxième étape consiste à calculer la fréquence sinusoïdale à laquelle cette perturbation correspond et débouche sur une identification du type de défaut (biais ou gain). Elle est effectuée en comparant la fréquence calculée précédemment à la fréquence électrique. Enfin, l'isolation est basée sur une estimation de l'angle du résidu avec $\theta_{res} = \arctan\left(-\frac{\tilde{i}_q}{\tilde{i}_d}\right)$ et sa comparaison avec la position électrique indique le capteur défaillant.

Les résultats expérimentaux pour cette méthode sont tracés dans la figure 4.5 avec un biais $\Delta i=1A$ injecté à $t=2.83s$ dans la phase B. Ce défaut injecté représente une erreur environ de 16% en régime permanent (l'amplitude du courant est de 5A).

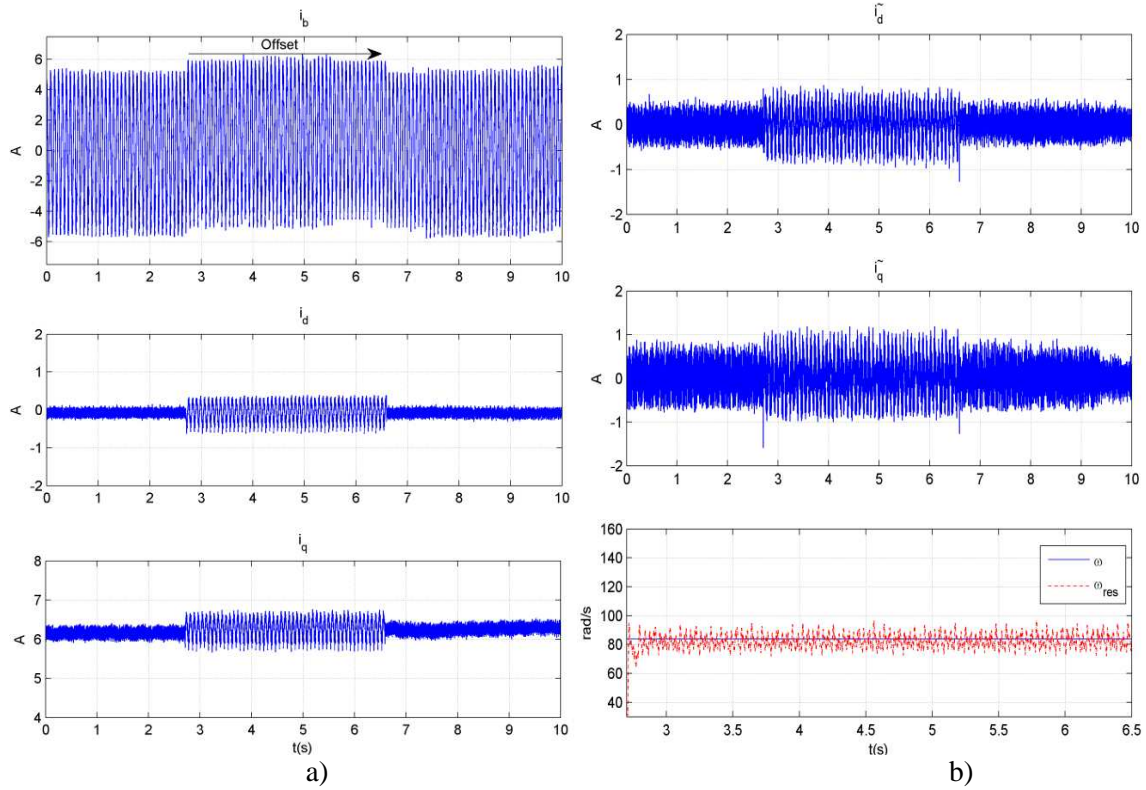


Figure 4.5 Détection et Isolation d'un défaut sur la phase B

La fréquence à laquelle la composante sinusoïdale est apparue est égale à la fréquence électrique durant le défaut de la phase B (80 rad/s électrique, Figure 4.5b). La détection de défaut est confirmée dans la Figure 4.6 avec le drapeau qui passe à 1 à $t=2.93$ s. Le temps nécessaire à la détection a été de $\Delta t = 0.01$ s.

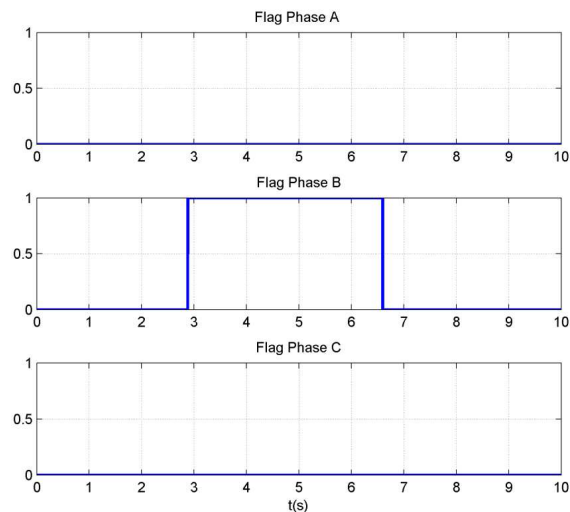


Figure 4.6 Flags of B Sensor Fault Detection (offset)

Cependant, en absence de défauts, \tilde{i}_{dq} est non nul et des seuils doivent être réglés avec deux cas possibles. Si le seuil choisi est trop grand, on pourra potentiellement avoir une absence de détection pour certains défauts de faible amplitude. Sinon, si le seuil choisi est très bas, dans le diagramme de la Figure 4.4, on pourrait valider l'étape du test sur la composante continue mais le processus s'arrêterait à l'étape du test sur la fréquence.

4.2.3 Conclusion

L'approche algébrique de diagnostic a été utilisée pour détecter et isoler un défaut de capteur de courant dans une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). L'approche est basée sur une estimation algébrique différentielle de la dynamique des défauts dans le référentiel fixe. Aussi, une détection de défaut du capteur de courant sur la base d'une analyse de forme d'onde a aussi été mise en œuvre dans le référentiel tournant. Cette méthode présente également une bonne capacité d'identification et de localisation de défauts grâce à la fréquence électrique estimée. Enfin, elle est robuste grâce à l'utilisation d'une approche non paramétrique indépendante du modèle de la machine électrique. Une rapide comparaison des deux méthodes montre que la méthode basée sur l'analyse des courants dans le référentiel tournant présente un meilleur temps de détection.

4.3 Observateur pour le bus de tension continue

En fait, lors d'une défaillance sur le capteur de tension DC, la sortie de la boucle de contrôle est modifiée et les signaux MLI varient afin de maintenir le couple ou la vitesse demandée. Cela peut affecter la gestion de l'énergie et de réduire également les capacités d'accélération. Pour éviter ces conséquences indésirables sur les performances ou éventuellement sur la sûreté de fonctionnement, une redondance virtuelle doit être mise en place pour surveiller le capteur. Nous sommes donc intéressés par l'estimation de la tension du bus continu en utilisant les courants de phase et les rapports cycliques.

L'observateur développé est ensuite évalué lors d'un défaut du capteur. Un brusque décalage de 20 V, soit 10% de la valeur réelle est introduit à $t = 2,83$ s. Comme le montre la figure 4.7, l'erreur d'estimation augmente de manière significative permettant la détection de défaut.

En même temps, l'amplitude des courants de phase mesurés (dernière courbe de la figure 4.7) diminue significativement. Cela est dû au fait que lors du défaut de la mesure de la tension continue, les boucles de commande de courant génèrent des rapports cycliques plus élevés pour suivre la trajectoire de la vitesse de référence.

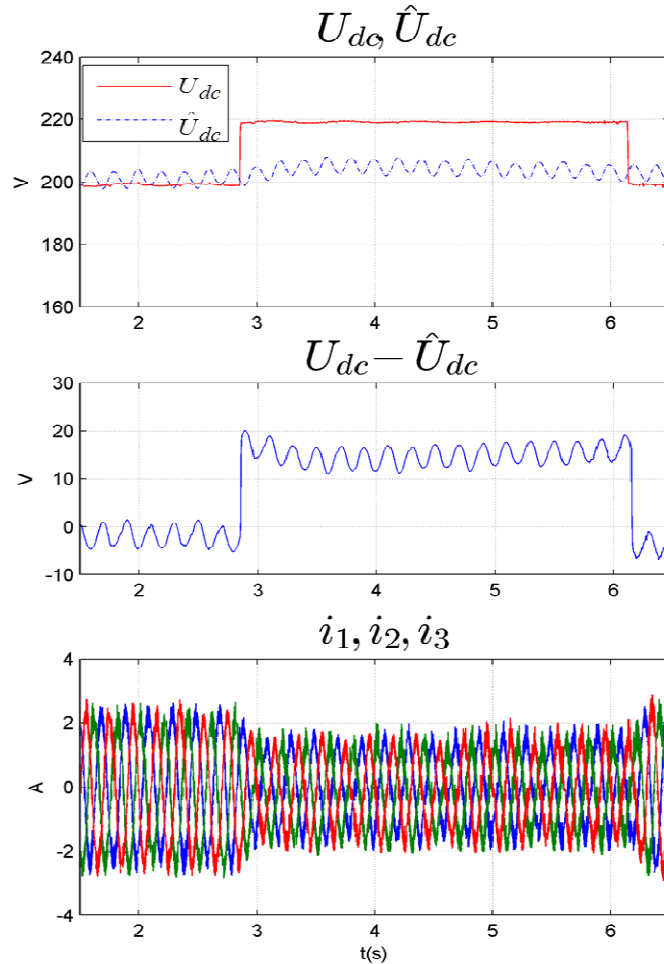


Figure 4.7 Estimation de la valeur du bus de tension continue lors d'un défaut

Par conséquent, en fixant un seuil à 10 V , ce qui signifie qu'une erreur de 5% de la tension nominale est tolérée, un défaut du capteur du bus de tension continue est détecté dans la figure 4.8 avec une durée de détection de temps $\Delta t = 0.058\text{s}$.

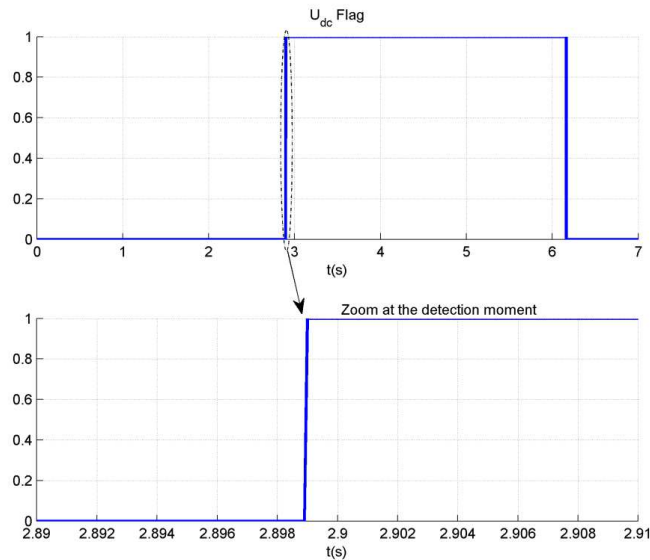


Figure 4.8 Drapeau du capteur de bus de tension continue

Ces premiers résultats sont encourageants car la valeur estimée peut être utilisée à des fins de surveillance et, finalement, comme un capteur redondant pour des fins de tolérance aux défauts.

Conclusions et Perspectives

L'objectif principal de cette thèse a porté sur le développement d'un contrôleur tolérant aux défauts des capteurs des entraînements électriques utilisés dans l'automobile. Avec la préoccupation des constructeurs automobiles d'augmenter la fiabilité à moindre coût, il est nécessaire d'élaborer des stratégies en temps réel pour la détection de défaut, leur localisation et une reconfiguration afin d'assurer une continuité de fonctionnement.

Le Chapitre 3 a été consacré à la mise en œuvre d'une Commande Tolérante aux Défauts pour le capteur de position. Un nouvel estimateur basé sur une approche algébrique différentielle a été conçu et validé expérimentalement. Puis, sur des critères de précision et de facilité de mise en œuvre, cet estimateur a été comparé aux méthodes existantes. Le principal avantage de ce nouvel estimateur est son faible coût de calcul et sa bonne précision à basse vitesse, plage de vitesse dans laquelle les méthodes traditionnelles (filtre de Kalman et observateur basé sur EMF) sont généralement peu efficaces. Enfin, une reconfiguration en utilisant l'estimateur algébrique est faite et sa validité est testée par des injections de défaut en temps réel. En outre, la nécessité d'utiliser deux estimateurs pour la détection et l'isolation est démontrée expérimentalement au moyen d'un essai dans des conditions de fonctionnement défavorables.

Dans le chapitre 4, deux méthodes ont été développées pour la détection de défaut et le diagnostic des capteurs de courant: un estimateur algébrique et une analyse des courants (d, q) dans le référentiel tournant. L'étape d'isolation est d'une grande importance en raison de l'utilisation de trois capteurs de courant de phase. Dans ce chapitre, nous avons seulement procédé à la détection et localisation de défauts, la reconfiguration n'ayant pas été abordée. Pour le capteur du bus de tension continue, un observateur construit à partir des signaux de commande de l'onduleur et des courants de phase a permis la surveillance de la tension continue.

Références

- [Ber2010] **Automotive Electricity: Electric Drive**; J. Beretta, *Wiley*, 2010
- [Col2012] **A modified synchronous current regulator for field oriented control of permanent magnet synchronous motors**, S.W. Colton, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp 7 – 12, 2012
- [DeD2011] **Advanced Electrical Drives: analysis, modeling, control**, R. De Donker, W.J. Pulle, A. Veltman, *Springer, Power Systems*, 2011
- [Des 2010] **Procédé et dispositif électrique combiné d'alimentation et de charge à moyens de compensation**, L. De Sousa, B. Bouchez, Brevet International WO 2010/057893 A1, Mai 2010.
- [Ibr2003] **Online exact differentiation and notion of asymptotic algebraic observers**, S. Ibrir, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.48, no. 11, pp. 2055 – 2060, 2003
- [Ise2006] **Fault tolerant sensors for vehicle dynamics control**, Unger, I; Isermann, Rolf, American Control Conference, June 2006
- [Kol2013] **Analyse d'une architecture de puissance dédiée aux modes traction-recharge dans un véhicule électrique. Optimisation de la commande et fonctionnement en mode dégradé**, A. Kolli, PhD, Université Paris- Sud, Dec 2013.
- [Ohn2004] **DC voltage sensorless single-phase PFC converter**, Ohnishi T., Hojo M., *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 404–410, 2004
- [Sil2009] **Projet SOFRACI (Structure Onduleur Fort Rendement A fonction de Charge Intégrée)**, B. Silvestre, Document interne Valeo, mars 2009.
- [Ven2003] **A review of Process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods**, V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S.N. Kavuri and al., *Computers and Chemical Engineers*, 27 (3), pp. 327-346, 2003
- [Yan2000] **Reliable LQG control with sensor failures**; G.H. Yang, J. L. Wang, and Y. C. Soh, *IEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 147(4), 433– 439, 2000