



Amélioration du Fonctionnement de la Machine Asynchrone Triphasée sans Capteur de Vitesse en Mode Dégradé : Disponibilité-Fiabilité

1.	Introduction	101
2.	Conception d'un observateur mode glissant d'ordre 2 Observateur Super-Twisting	103
2.1.	Modélisation de la machine asynchrone	103
2.2.	Algorithme du Super-Twisting	105
2.1.	Estimation du flux rotorique.....	106
2.3.	Estimation de la vitesse rotorique.....	107
2.4.	Analyse de la stabilité.....	107
3.	Résultats expérimentaux et discussion	110
3.1.	Fonctionnement en mode sain	111
3.2.	Fonctionnement en présence de défaut.....	113
4.	Compensation du défaut.....	117
4.1.	Application de la FTC à un système contrôlé sans capteur	119
4.2.	Validation expérimentale et discussion	121
5.	Conclusion.....	123

1. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons proposé une technique basée sur une mixture entre l'approche modèle et l'approche signal dans le but de commander sans capteur de vitesse une chaîne de conversion électromécanique à base d'une machine asynchrone triphasée et de détecter les défauts d'ouvertures d'IGBTs dans l'onduleur :

- Pour le contrôle sensorless, un observateur par mode glissant image du modèle classique du moteur asynchrone est utilisé pour estimer le vecteur d'état de la machine.
- Pour le diagnostic des défauts, un algorithme basé sur l'étude mathématique de similarité entre les grandeurs estimées fournies par l'observateur et celles mesurées est utilisé pour détecter et identifier les composants endommagés.

Bien que l'observateur nous ait servi avec excellence pour réaliser les deux objectifs susmentionnés, une dégradation considérable au niveau des performances de la boucle d'observation a été enregistrée suite à l'apparition du défaut. Cette dégradation se manifeste par l'apparition des erreurs d'estimation importantes qui affectent ensuite les performances de la commande sensorless de la machine puisque l'observateur fonctionne en boucle fermée avec le bloc de contrôle. Prenant le cas des défauts onduleur, notre étude bibliographique nous a amené à constater que, pour le diagnostic des défauts d'ouverture d'IGBTs, les observateurs utilisés pour le diagnostic sont généralement utilisés en boucle ouverte par rapport au bloc de commande de la machine [Jlas-2017], [Jung-2013]. Le diagnostic des défauts est ainsi réalisé en utilisant l'erreur d'estimation entre les grandeurs mesurées et celles estimées par l'observateur. Cette erreur est mise à l'échelle pour former un résidu qui devrait être « nul » en cas de fonctionnement normal mais devrait devenir « grand » et agir comme une alarme en présence du défaut. On a remarqué dans [Maam-2016], [Saleh-2015], [Jlas-2016], [Jung-2013], [Shao-2013] que juste après l'apparition d'un défaut d'ouverture d'un IGBT, le signal estimé correspondant à l'élément endommagé présente une erreur considérable par rapport au signal mesuré. Cette erreur a permis de donner des informations pour la détection du défaut mais elle n'a aucune influence sur le système de contrôle tant que l'observateur n'est pas utilisé pour la commande. Au contraire, pour le cas d'une commande sensorless et comme le montre les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre précédent, l'impact du défaut IGBT est important sur les performances d'observation (vecteur d'état estimé) et sur le système entier (les grandeurs mesurées). De ce fait on peut distinguer deux volets :

Concernant le volet diagnostic : l'algorithme de diagnostic proposé à base de l'observateur SMO a réussi à présenter ces qualités de robustesse contre les fausses alarmes et les variations paramétriques de la machine aussi que son aptitude à détecter et localiser les composants endommagés dans l'onduleur. En effet, on s'est basé sur le même principe de divergence (utilisé dans le cas d'une commande avec capteur) entre les signaux estimés et mesurés pour fournir des informations sur les défauts.

Concernant le volet contrôle : la présence de défaut et les erreurs d'estimation enregistrées par la suite ont tous participé à la dégradation des performances de la commande sensorless de la machine asynchrone, une forte ondulation au niveau de la vitesse rotorique est ainsi produite. En conséquence, le système risque de perdre sa stabilité et diverge complètement juste au moment de l'occurrence de défaut sans laisser le temps nécessaire pour la phase de diagnostic et l'application de la reconfiguration appropriée par la suite.

Suite à cette étude, on peut constater que l'observateur basé sur le modèle mathématique de la machine asynchrone décrit dans [Viei-2012], [Viei-2014], [Trao-2007], [Mont-2007] et donné par l'équation (4.1) présente bien l'image du moteur dans la plage de fonctionnement en mode sain. Au contraire, en présence de défaut, ce modèle dont les équations mathématiques du vecteur d'état sont fortement couplées entre elles et qui est constitué pour un fonctionnement en mode normal conduit à l'apparition d'une erreur considérable entre les courants estimés et ceux mesurés. L'observateur SMO utilisé dans l'approche de diagnostic proposé dans le chapitre précédent est basé sur ce même modèle. Il a joué un rôle essentiel en fournissant des informations sur les défauts d'une part et permettant de contrôler la machine sans capteur de vitesse d'autre part. Néanmoins il s'est avéré qu'il est aussi important de chercher une autre alternative d'estimation qui permet de garantir la stabilité et le bon fonctionnement du système au moment d'apparition de défauts et assurer par la suite sa disponibilité jusqu'à l'accomplissement de deux procédures de diagnostic et d'application de la commande tolérante aux défauts dans les meilleures délais et conditions de fonctionnement.

Dans le but minimiser l'impact de défaut sur les grandeurs électriques estimées et sur la dynamique de la vitesse estimée en mode dégradé, une technique d'observation basée sur la minimisation du degré de couplage (liaison) entre les variables du vecteur d'état de la machine est proposée dans ce chapitre. L'algorithme du super-twisting appliqué à la machine asynchrone présente une bonne alternative pour pallier aux contraintes susmentionnées en offrant des meilleures performances au moment transitoire d'apparition des défauts d'ouverture des IGBT jusqu'à leur compensation.

Une étude comparative entre les dynamiques de sortie des deux techniques d'observation basées sur l'observateur par mode glissant d'ordre 1 (SMO1) et l'observateur super-twisting (STO) est effectuée à la fin de ce chapitre. Le but de cette étude est de présenter l'importance de la bonne estimation des variables d'état de la machine pour améliorer les performances du système commandé en mode sensorless en présence d'un défaut et aussi lors de l'application de la commande tolérante aux pannes.

2. Conception d'un observateur mode glissant d'ordre 2 :

Observateur Super-Twisting

2.1. Modélisation de la machine asynchrone

Le modèle utilisé pour la conception de la plupart des observateurs à base du modèle mathématique de la machine asynchrone est le même que celui utilisé dans la conception de l'observateur par mode glissant décrit dans le deuxième chapitre. Ce modèle est exprimé dans le repère lié au stator (α, β) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} \\ \dot{\phi}_{\alpha r} \\ \dot{\phi}_{\beta r} \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda i_{\alpha s} + \frac{K}{\tau_r} \phi_{\alpha r} + \omega_r K \phi_{\beta r} \\ -\lambda i_{\beta s} + \frac{K}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r K \phi_{\alpha r} \\ \frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\beta r} \\ \frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} + \omega_r \phi_{\alpha r} \\ m(i_{\beta s} \phi_{\alpha r} - i_{\alpha s} \phi_{\beta r}) - \frac{f}{J} \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n_p}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ C_r \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Le modèle d'observation représente généralement une copie du modèle de la machine (4.1) plus un terme de correction qui assure la convergence des grandeurs estimées vers celles mesurées. L'observateur par mode glissant décrit dans le deuxième chapitre est donné par la représentation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{\alpha s} \\ \dot{\hat{i}}_{\beta s} \\ \dot{\hat{\phi}}_{\alpha r} \\ \dot{\hat{\phi}}_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda i_{\alpha s} + \frac{K}{\tau_r} \hat{\phi}_{\alpha r} + \hat{\omega}_r K \hat{\phi}_{\beta r} \\ -\lambda i_{\beta s} + \frac{K}{\tau_r} \hat{\phi}_{\beta r} - \hat{\omega}_r K \hat{\phi}_{\alpha r} \\ \frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} - \frac{1}{\tau_r} \hat{\phi}_{\alpha r} - \hat{\omega}_r \hat{\phi}_{\beta r} \\ \frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} - \frac{1}{\tau_r} \hat{\phi}_{\beta r} + \hat{\omega}_r \hat{\phi}_{\alpha r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \\ A_{31} & A_{32} \\ A_{41} & A_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\text{avec } A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \\ A_{31} & A_{32} \\ A_{41} & A_{42} \end{bmatrix}$$

A : Représente la matrice des gains d'observation de courants et de flux.

Dans les deux modèles de la machine et d'observation (4.1) et 4.2), les quatre premières équations sont liées d'une façon directe entre elles et dépendent toutes de la vitesse estimée de la machine asynchrone. En conséquence, en présence d'un défaut d'ouverture d'IGBT, une perturbation au niveau d'une seule variable de la machine affecte directement la dynamique des autres variables, ce qui entraîne des erreurs d'estimation dans la boucle d'observation. Ces erreurs contribuent à leur tour à la dégradation rapide de la commande sensorless et à la divergence ou l'arrêt total de la machine.

Dans le but de diminuer ce fort couplage entre les variables du vecteur d'état lors de la conception de la technique d'observation, le modèle de la machine est réécrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha s} = -R_s b i_{\alpha s} - \left(\frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\beta r} \right) a + b v_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} = -R_s b i_{\beta s} - \left(\frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} + \omega_r \phi_{\alpha r} \right) a + b v_{\beta s} \\ \dot{\phi}_{\alpha r} = \frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\beta r} \\ \dot{\phi}_{\beta r} = \frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} + \omega_r \phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\text{avec : } a = \frac{M}{\sigma L_s L_r}, \quad b = \frac{M}{\sigma L_s}$$

En substituant leurs termes correspondants aux dérivées du flux dans l'équation (4.3) par $\dot{\phi}_{\alpha r}, \dot{\phi}_{\beta r}$. Les deux premières équations des courants statoriques peuvent être réécrites indépendamment de la vitesse rotorique de la machine. Le modèle dédié pour l'observation devient donc :

$$\begin{cases} \dot{i}_{\alpha s} = -R_s b i_{\alpha s} - a \dot{\phi}_{\alpha r} + b v_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} = -R_s b i_{\beta s} - a \dot{\phi}_{\beta r} + b v_{\beta s} \\ \dot{\phi}_{\alpha r} = \frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\beta r} \\ \dot{\phi}_{\beta r} = \frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} - \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} + \omega_r \phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (4.4)$$

2.2. Algorithme du Super-Twisting

Parmi les différentes techniques d'observation existantes dans la littérature, les méthodes basées sur la théorie des modes glissants sont caractérisées par leur robustesse aux perturbations ainsi que leur insensibilité aux variations des paramètres de la machine quand le mode glissant s'établit [Solv-2010]. Cependant, le problème de "Chattering" est considéré comme un inconvénient majeur caractérisé par des fortes oscillations autour de la surface de glissement. Ces oscillations provoquent des dynamiques hautes fréquences non considérées dans la modélisation du système. Le mode glissant d'ordre élevé « Higher Order Sliding Mode » est l'une des solutions qui permet de conserver les performances du mode glissant du premier ordre avec l'avantage d'éliminer ou d'atténuer ce phénomène.

L'Algorithme du Super-Twisting (STA) est un algorithme bien connu et classé parmi les algorithmes de modes glissants d'ordre élevé (de second ordre), il a été introduit par Levant en 1993 [Leva-1993]. Il a été largement utilisé après pour le contrôle [Rivi-2012], [Genn-2013], [Bart-2000] et l'observation [Solv-2010], [Davi-2005].

L'algorithme du super-twisting peut être écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = f(\hat{x}_2) + \gamma |e_1|^{0.5} \text{sign}(e_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \xi \text{sign}(e_1) \end{cases} \quad (4.5)$$

$e_1 = x_1 - \hat{x}_1$, avec x_i sont les variables d'état, γ et ξ sont les gains d'observation.

La convergence en temps fini et la robustesse de l'algorithme du super-twisting ont été développées par des méthodes géométriques dans [More-2012] alors que sa stabilité a été prouvée par la méthode de Lyapunov dans [Leva-2007].

2.3 Estimation du flux rotorique

Pour appliquer l'algorithme du super-twisting, on effectue tout d'abord le changement de variables suivant :

$$\begin{cases} z_1 = i_{\alpha s} \\ z_2 = i_{\beta s} \\ z_3 = -\dot{\phi}_{\alpha r} = -\frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} + \frac{1}{\tau_r} \phi_{\alpha r} + \omega_r \phi_{\beta r} \\ z_4 = -\dot{\phi}_{\beta r} = -\frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} + \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\alpha r} \end{cases} \quad (4.6)$$

En substituant la représentation (4.6) dans le modèle (4.4), le modèle dynamique des courants devient :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -R_s b z_1 + a z_3 + b v_{\alpha s} \\ \dot{z}_2 = -R_s b z_2 + a z_4 + b v_{\beta s} \end{cases} \quad (4.7)$$

En appliquant maintenant le STA décrit dans (4.5) au modèle de la machine, l'observateur par mode glissant du second ordre peut être exprimé de la manière suivante :

$$\begin{cases} \hat{z}_1 = -R_s b z_1 + a \hat{z}_3 + b v_{\alpha s} + \gamma_1 |e_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) \\ \hat{z}_3 = \xi_1 \text{sign}(e_1) \\ \hat{z}_2 = -R_s b z_2 + a \hat{z}_4 + b v_{\beta s} + \gamma_2 |e_2|^{1/2} \text{sign}(e_2) \\ \hat{z}_4 = \xi_2 \text{sign}(e_2) \end{cases} \quad (4.8)$$

$e_i = (z_i - \hat{z}_i)_{i=1,2}$ sont les erreurs d'estimation de courants, $\text{sign}(\cdot)$ indique toujours la fonction signe. γ_i et ξ_i représentent les gains d'observation.

Après avoir appliqué l'algorithme de super-twisting, il est important de noter que le modèle d'estimation des courants et de flux (4.8) devient indépendant de la vitesse estimée du rotor. Il est uniquement exprimé en fonction des courants statoriques (\hat{z}_1, \hat{z}_2) , des dérivés du flux rotorique (\hat{z}_3, \hat{z}_4) et des tensions statoriques $(v_{\alpha s}, v_{\beta s})$. Les dérivées du flux sont calculées via

la théorie des modes glissants en utilisant les signes des erreurs entre les courants estimés et ceux mesurés.

2.4 Estimation de la vitesse rotorique

Les deux modèles (4.4) et (4.6) nous donne la représentation suivante :

$$\begin{cases} \hat{z}_3 = -\hat{\phi}_{\alpha r} = -\frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} + \frac{1}{\tau_r} \hat{\phi}_{\alpha r} + \hat{\omega}_r \hat{\phi}_{\beta r} \\ \hat{z}_4 = -\hat{\phi}_{\beta r} = -\frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} + \frac{1}{\tau_r} \hat{\phi}_{\beta r} - \hat{\omega}_r \hat{\phi}_{\alpha r} \end{cases} \quad (4.9)$$

A partir des deux représentations (4.8) et (4.9), la vitesse rotorique estimée peut être exprimée de la manière suivante :

$$\hat{\omega}_r = \frac{(\hat{\phi}_{\beta r} - M i_{\beta s}) \hat{z}_3 - (\hat{\phi}_{\alpha r} - M i_{\alpha s}) \hat{z}_4}{-\hat{\phi}_{\alpha r}^2 - \hat{\phi}_{\beta r}^2 + \hat{\phi}_{\beta r} M i_{\beta s} + \hat{\phi}_{\alpha r} M i_{\alpha s}} \quad (4.10)$$

avec :

$$\begin{cases} -\hat{\phi}_{\alpha r} = \hat{z}_3 \\ -\hat{\phi}_{\beta r} = \hat{z}_4 \end{cases}$$

La figure 4.1 présente un schéma bloc décrivant les étapes de conception de l'observateur par mode glissant à base de l'algorithme du super-twisting :

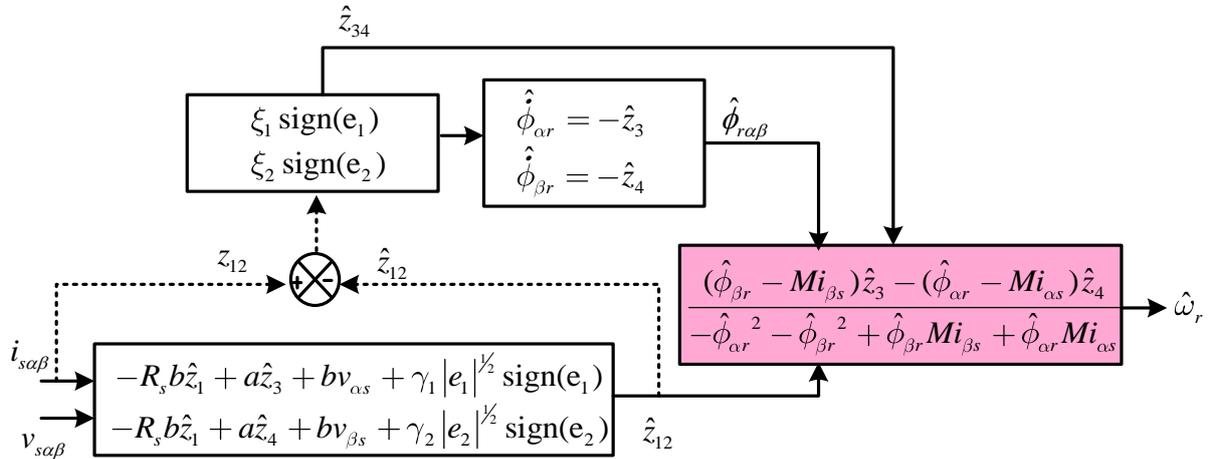


Figure 4.1: Schéma de blocs de l'observateur Super-Twisting.

2.5 Analyse de la stabilité

Dans cette section, nous allons étudier la stabilité de l'observateur par mode glissant à base de l'algorithme du super-twisting suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_1 = -R_s b z_1 + a \hat{z}_3 + b v_{\alpha s} + \gamma_1 |e_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) \\ \dot{\hat{z}}_3 = \xi_1 \text{sign}(e_1) \\ \dot{\hat{z}}_2 = -R_s b z_2 + a \hat{z}_4 + b v_{\beta s} + \gamma_2 |e_2|^{1/2} \text{sign}(e_2) \\ \dot{\hat{z}}_4 = \xi_2 \text{sign}(e_2) \end{cases} \quad (4.11)$$

En faisant un changement de variable tel que :

$$\begin{cases} z_5 = \dot{z}_3 \\ z_6 = \dot{z}_4 \end{cases} \quad (4.12)$$

Le modèle de la machine (4.6) peut être réexprimé sous la forme suivante :

$$\begin{cases} z_1 = i_{\alpha s} \\ z_2 = i_{\beta s} \\ z_3 = -\frac{M}{\tau_r} i_{\alpha s} + \frac{1}{\tau_r} \phi_{\alpha r} + \omega_r \phi_{\beta r} \\ z_4 = -\frac{M}{\tau_r} i_{\beta s} + \frac{1}{\tau_r} \phi_{\beta r} - \omega_r \phi_{\alpha r} \\ z_5 = \dot{z}_3 \\ z_6 = \dot{z}_4 \end{cases} \quad (4.13)$$

Avec le changement de variable, la dynamique du système (4.6) devient :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -R_s b z_1 + a z_3 + b v_{\alpha s} \\ \dot{z}_2 = -R_s b z_2 + a z_4 + b v_{\beta s} \\ \dot{z}_3 = z_5 \\ \dot{z}_4 = z_6 \end{cases} \quad (4.14)$$

Soit \tilde{X} l'erreur entre l'état réel de la machine (4.14) et l'état estimé donné par l'observateur (4.11), tel que :

$$\tilde{X} = [\tilde{X}_1 \quad \tilde{X}_2]^T$$

$$\text{Avec : } \tilde{X}_1 = \begin{bmatrix} z_1 - \hat{z}_1 \\ z_2 - \hat{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{X}_2 = \begin{bmatrix} z_3 - \hat{z}_3 \\ z_4 - \hat{z}_4 \end{bmatrix}$$

La dynamique des erreurs entre le système (4.14) et l'observateur (4.11) est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{X}}_1 &= \begin{pmatrix} \dot{z}_1 - \dot{\hat{z}}_1 \\ \dot{z}_2 - \dot{\hat{z}}_2 \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} z_3 - \hat{z}_3 \\ z_4 - \hat{z}_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \gamma_1 |e_1|^{1/2} \text{sign}(e_1) \\ \gamma_2 |e_2|^{1/2} \text{sign}(e_2) \end{pmatrix} \\ \dot{\tilde{X}}_2 &= \begin{pmatrix} \dot{z}_3 - \dot{\hat{z}}_3 \\ \dot{z}_4 - \dot{\hat{z}}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \xi_1 \text{sign}(e_1) \\ \xi_2 \text{sign}(e_2) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.16)$$

La dynamique d'erreur (4.16) peut être réécrite sous la forme canonique suivante :

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{X}}_1 &= a\tilde{X}_2 - \gamma_{1,2} |\tilde{X}_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\tilde{X}_1) \\ \dot{\tilde{X}}_2 &= \tilde{F}(X_1, X_2, \hat{X}_2) - \xi_{1,2} \text{sign}(\tilde{X}_1)\end{aligned}\quad (4.17)$$

Où $\tilde{F}(X_1, X_2, \hat{X}_2)$ représente les dérivées de \hat{z}_3 et \hat{z}_4 . Elle est exprimée en fonction de X_1 , X_2 , et \hat{X}_2 .

$\gamma_{1,2} = \begin{pmatrix} \gamma_1 & 0 \\ 0 & \gamma_2 \end{pmatrix}$ représente les gains relatifs à l'estimation des courants statoriques (\hat{z}_1, \hat{z}_2).

$\xi_{1,2} = \begin{pmatrix} \xi_1 & 0 \\ 0 & \xi_2 \end{pmatrix}$ représente les gains relatifs à l'estimation des dérivées de flux (\hat{z}_3, \hat{z}_4).

Supposons que les états du système (4.14) peuvent être supposés bornés, alors il existe une constante f^+ de sorte que l'inégalité suivante est vérifiée [Davi-2005] :

$$|\tilde{F}(X_1, X_2, \hat{X}_2)| \leq f^+ \quad (4.18)$$

Par conséquent, cette inégalité doit être vérifiée pour les trois composants X_1, X_2 et $|\hat{X}_2| < 2 \sup |X_2|$.

On suppose que la condition (4.18) est atteinte, les gains de l'observateur (4.11) sont choisis de manière à respecter les deux inégalités suivantes :

$$\begin{cases} \xi_{1,2} > f^+ \\ \gamma_{1,2} > \sqrt{\frac{2}{\xi_{1,2} - f^+}} \frac{(\xi_{1,2} + f^+)}{(1 - c_{1,2})} (1 + c_{1,2}) \end{cases} \quad (4.19)$$

où $c_{1,2}$ sont des constantes choisies bornées, tel que : $c_{1,2} \in]0 \ 1[$.

Théorème 1 : Supposons que les paramètres $(\gamma_{1,2}, \xi_{1,2})$ de l'observateur (4.11) soient sélectionnés selon la condition (4.19) et que la condition (4.18) soit valable pour le système (4.14). Ensuite, les variables estimées par l'observateur à base de l'algorithme du super-twisting (4.18) convergent en un temps fini vers leurs états réels donnés par le système. La preuve de ce théorème de convergence de l'observateur en temps fini est traitée et bien détaillée dans [Davi-2005].

3. Résultats expérimentaux et discussion

Dans cette partie, nous validons expérimentalement l'algorithme proposé en vue de l'amélioration des performances du système commandé sans capteur de vitesse lors de l'apparition d'un défaut et durant le régime transitoire entre l'apparition du défaut et la reconfiguration du système. Cette étape est très importante pour assurer la stabilité du système et garantir sa continuité de fonctionnement en présence du défaut jusqu'à l'accomplissement des deux phases de diagnostic, et la phase d'application de la stratégie de commande tolérante aux défauts dans les meilleurs délais et conditions de fonctionnement.

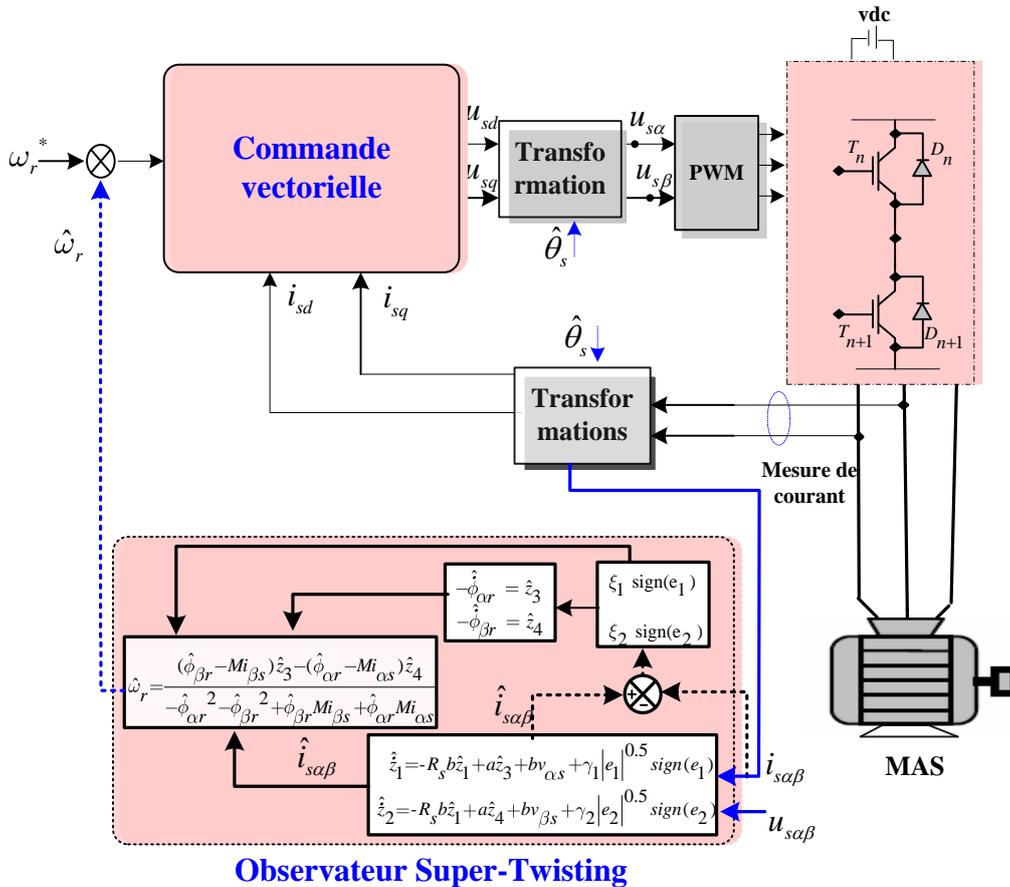


Figure 4.2: Schéma bloc de la commande sans capteur à base d'un observateur Super-Twisting.

Un observateur par mode glissant de second ordre à base de l'algorithme du super-twisting est utilisé pour l'estimation du vecteur d'état de la machine. L'estimation des courants statoriques ainsi que le flux rotorique ne dépendent plus de la dynamique de la vitesse estimée. L'estimation du flux se fait en utilisant la théorie des modes glissants. Pour la validation expérimentale, nous commençons par la vérification des performances de cet algorithme en mode sain. Ensuite, nous appliquons des défauts simples et multiples d'ouverture d'IGBTs dans

le but d'évaluer sa robustesse en mode dégradé. Finalement, une étude comparative entre les deux modèles d'observation (4.2) et (4.6) est à réaliser afin d'étudier l'impact de chaque technique sur les performances du système pendant les phases d'application de la commande tolérante aux défauts (détection, localisation et reconfiguration). La figure 4.2 présente le schéma bloc de la commande vectorielle sans capteur mécanique d'une machine asynchrone à base d'un observateur super-twisting. Les défauts d'ouverture d'IGBTs dans l'onduleur sont introduits en utilisant des relais magnétiques commandés par Matlab/Simulink via la carte dSpace.

3.1. Fonctionnement en mode sain

Dans cette partie, nous avons effectué un essai à vide pour un échelon de vitesse de 1000 tr/min, puis une inversion du sens de rotation du moteur de +1000tr/min à -1000 tr/min est appliquée à l'instant $t=9.38s$. Nous avons fixé les gains de l'observateur $\gamma_{1,2} = 4500$ et $\xi_{1,2} = 19000$. Les paramètres des régulateurs de la boucle de commande sont inchangés (Tableau 2.2). Les résultats expérimentaux sont représentés par la figure 4.3.

Pour analyser le comportement du système contrôlé sans capteur de vitesse, nous avons enregistré sur la figure 4.3-a les courants statoriques mesurés et estimés dans le repère lié au stator (α, β) . Sur la figure 4.3-b, nous avons tracé les trois vitesses de la machine (la vitesse de référence, la vitesse mesurée et la vitesse estimée) et les deux flux rotoriques estimés dans le repère (α, β) .

Sur les tracés des courants statoriques, nous constatons que les courants estimés suivent parfaitement les courants mesurés pendant le régime de fonctionnement permanent avec une assez légère erreur durant la phase de démarrage où la vitesse du moteur est nulle et aussi pendant la phase d'inversion du sens de rotation de la machine. Ces résultats montrent bien les bonnes performances de l'observateur super-twisting en terme de précision d'estimation en dehors et proche de la zone d'inobservabilité de la machine asynchrone. D'après la figure 4.3-b nous constatons aussi que la vitesse mesurée et celle estimée convergent vers leur grandeur de référence, les flux rotoriques sont parfaitement sinusoïdaux avec un module égal au flux de référence ($\phi_{dr-ref} = 1Wb$). Ces résultats confirment aussi les bonnes performances de l'ensemble « commande-observateur » en termes de suivi de la trajectoire.

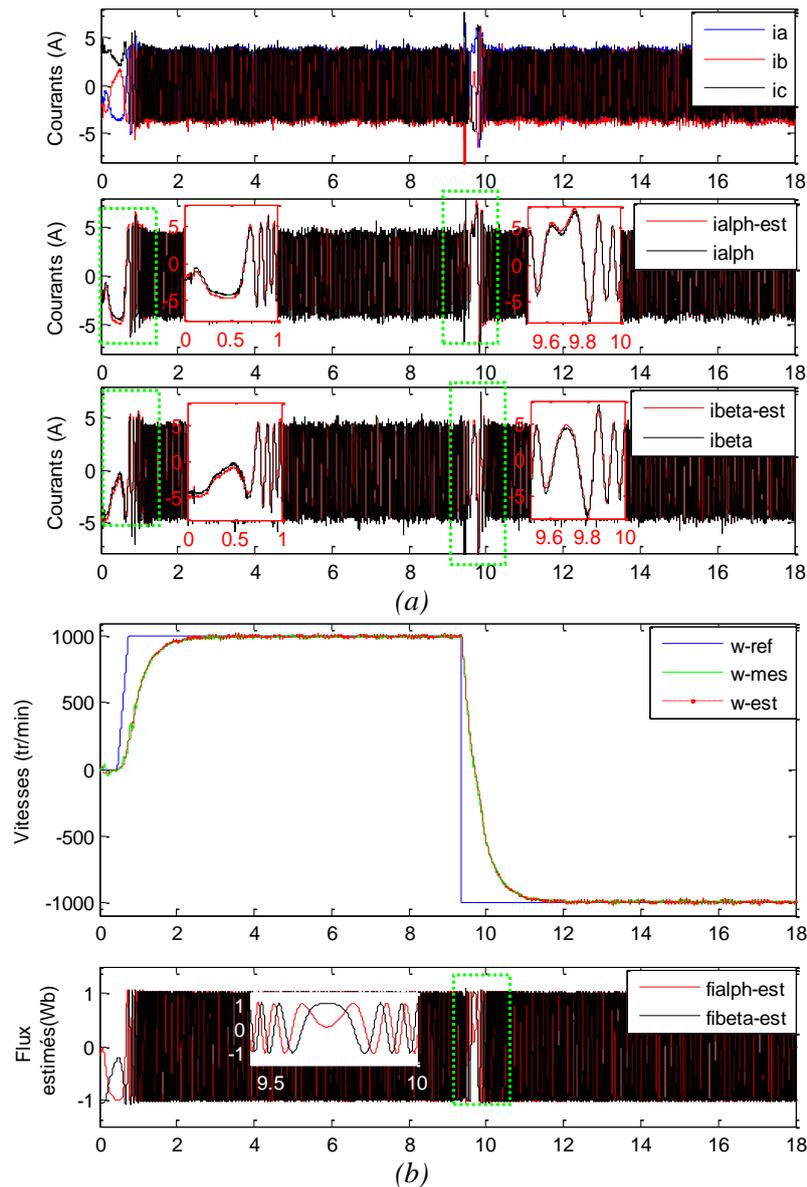


Figure 4.3: Résultats expérimentaux de la commande sensorless à base d'un observateur super-twisting pour une inversion du sens de rotation de la machine.

Dans un deuxième essai, nous avons testé le comportement du système contrôlé sans capteur de vitesse lors de la variation du couple de charge (figure 4.4). La machine démarre à vide avec une vitesse de référence de 1000 tr/min , puis nous avons appliqué un couple de charge de 10 Nm entre $t=5.5s$ et $t=13,4s$. Les résultats expérimentaux sont similaires à ceux de l'essai précédent en termes de suivi de la trajectoire et de précision d'estimation. Lors de l'application et l'annulation du couple de charge, on remarque une atténuation ou un dépassement au niveau de la vitesse estimée et de la vitesse mesurée par rapport à la référence. Cette perturbation est rapidement corrigée par la suite, ce qui traduit ainsi les performances du système "commande-observateur" en termes de rejet de perturbation.

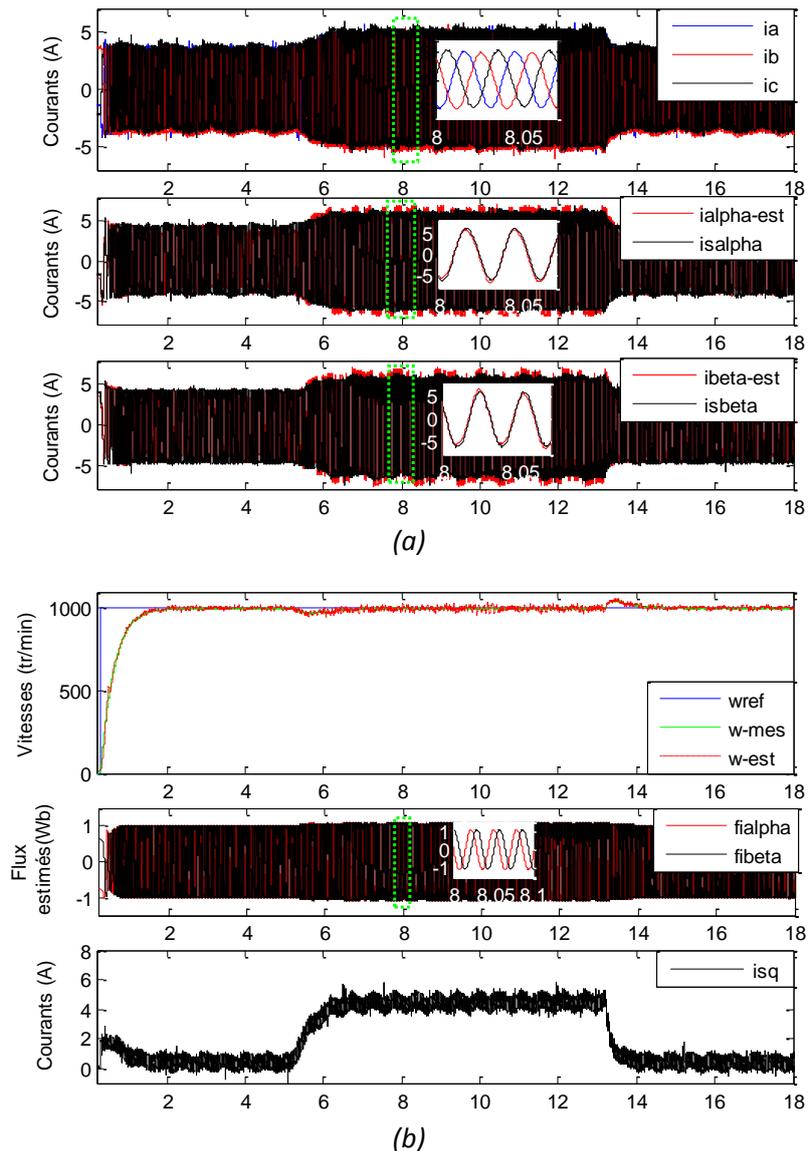


Figure 4.4: Résultats expérimentaux de la commande sensorless à base d'un observateur super-twisting pour une variation du couple de charge de la machine.

3.1. Fonctionnement en présence de défaut

Après l'évaluation des performances de l'observateur super-twisting sous différents régimes de fonctionnement du système en mode sain, nous étudions maintenant le cas de fonctionnement en mode dégradé. Les défauts à appliquer sont des défauts simples et doubles d'ouverture d'IGBTs dans l'onduleur de tension. Comme mentionnée précédemment, cette étude a pour objectif de renforcer la stabilité et la continuité de fonctionnement du système au moment d'apparition du défaut jusqu'à sa détection et sa correction.

Nous avons commencé par le cas d'un défaut simple au niveau de l'IGBT T_4 du second bras de l'onduleur (figure 4.5).

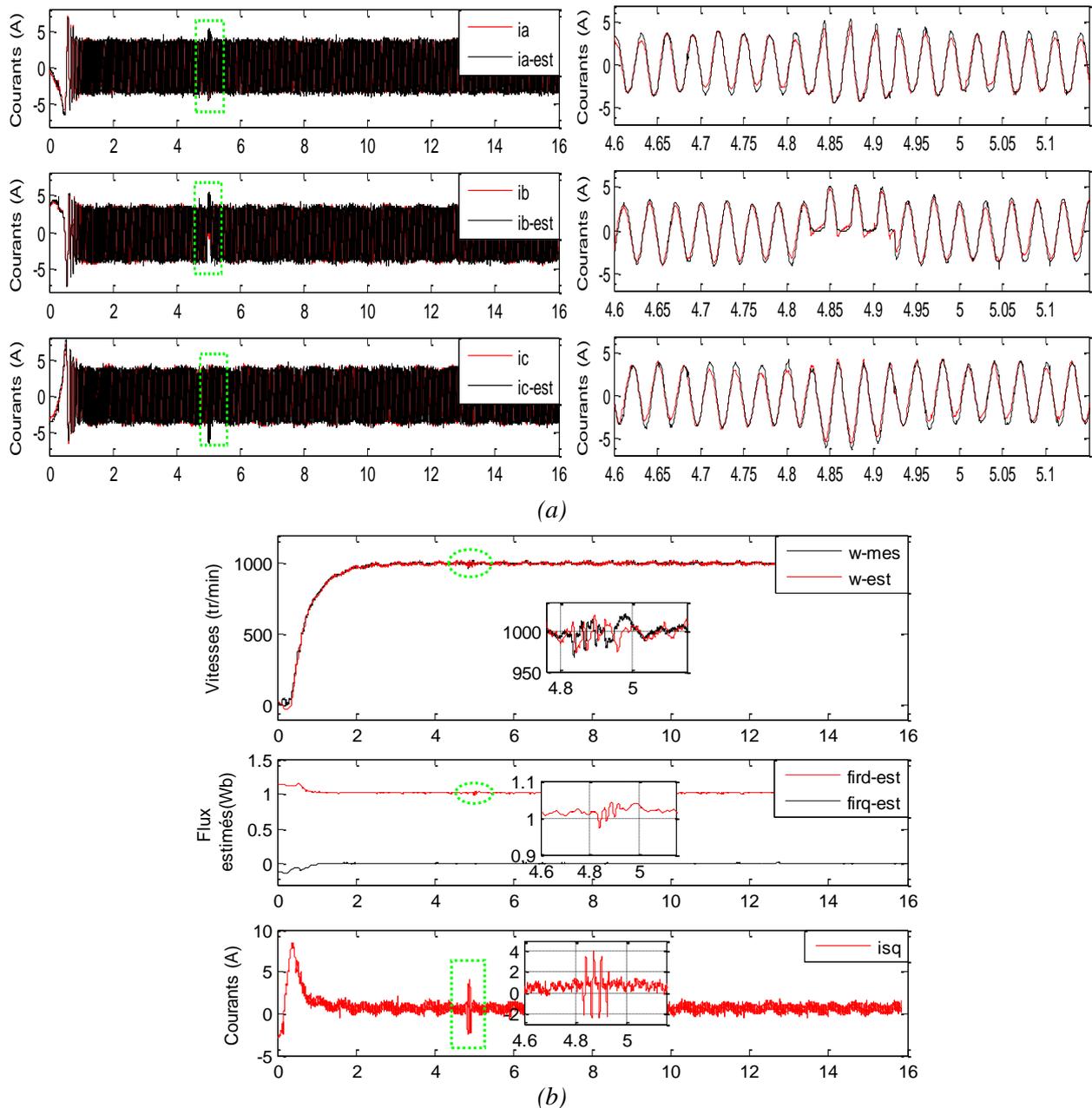


Figure 4.5: Evaluation expérimentale du fonctionnement du système contrôlé en mode sensorless à base d'un observateur super-twisting lors de la présence d'un défaut simple d'ouverture d'IGBT T_4 .

Pour justifier l'apport de l'algorithme du super-twisting sur la commande sensorless dans tous les régimes de fonctionnement du système, les performances d'observation sont analysées par rapport au taux d'ondulation des deux vitesses estimée et mesurée et aussi par rapport au degré de précision d'estimation des grandeurs électriques de la machine en présence du défaut.

Le taux d'ondulation de la vitesse est le quotient de la différence entre la vitesse maximale et la vitesse minimale par sa valeur moyenne, il est donné par la relation suivante :

$$\tau_{\omega} \% = \frac{\omega_{rMax} - \omega_{rmin}}{\langle \omega_r \rangle} \times 100 \quad (4.20)$$

Les courbes expérimentales de la dynamique des grandeurs électriques et mécaniques de la machine asynchrone sont données par la figure 4.5. La figure 4.5-a présente la variation des courants statoriques mesurés et estimés de chaque phase avant et après l'apparition du défaut. Sur la figure 4.5-b nous avons tracé la vitesse rotorique mesurée et estimée du moteur, les flux rotoriques estimés $(\hat{\phi}_{\alpha r}, \hat{\phi}_{\beta r})$ et le courant mesuré i_{qs} image du couple.

Comme dans le cas d'une commande avec capteur, après l'apparition du défaut dans l'IGBT T_4 à l'instant $t = 4.83s$, le courant mesuré (i_b) correspondant à la phase en défaut passe instantanément à zéro. Des déformations sont aussi enregistrées au niveau des deux autres courants correspondants aux phases saines. Pour les courants estimés, on remarque que le courant i_{b-est} suit parfaitement son correspondant mesuré même pendant les alternances correspondantes à la conduction du transistor endommagé. Les deux autres courants estimés (i_{a-est}, i_{c-est}) suivent parfaitement les courants mesurés déformés (i_a, i_c).

Des ondulations au niveau de la vitesse rotorique et du courant (i_{qs}) image du couple sont aussi enregistrées suite à l'apparition du défaut. Les taux d'ondulation de la vitesse estimée et de la vitesse mesurée sont relativement égaux d'environ 3.5%. Les flux rotoriques estimés subissent aussi une perturbation assez légère suite à ce défaut.

Le comportement dynamique du système expérimental dans le cas d'un fonctionnement en charge et lors d'application d'un défaut multiple d'ouverture de deux IGBT dans l'onduleur est illustré par les deux figures 4.6-a et 4.6-b. La machine fonctionne avec une vitesse de rotation de -1000 tr/min et un couple de charge de 50% du couple nominal. Le défaut est appliqué au niveau de l'IGBT T_3 du second bras et au niveau de l'IGBT T_6 du troisième bras. L'impact de ce défaut se manifeste par la perte d'une alternance sur chaque courant correspondant au bras défaillant. La vitesse mesurée et la vitesse estimée subissent une perturbation suite à l'apparition du défaut alors que les courants estimés restent continuellement confondus avec leurs grandeurs mesurées. Ceci confirme bien l'apport de l'algorithme du super-twisting au niveau de la représentation matricielle du modèle de la machine où l'estimation des courants statoriques ne dépend plus de la vitesse estimée. Cette particularité permet à la dynamique du système contrôlé sans capteur mécanique de s'approcher au maximum à celle d'un système avec capteur et d'améliorer ainsi sa stabilité (maintien de la vitesse estimée) et sa continuité de fonctionnement

après l'occurrence de défaut jusqu'à atteindre la phase de diagnostic et de reconfiguration (application de la commande tolérante aux pannes).

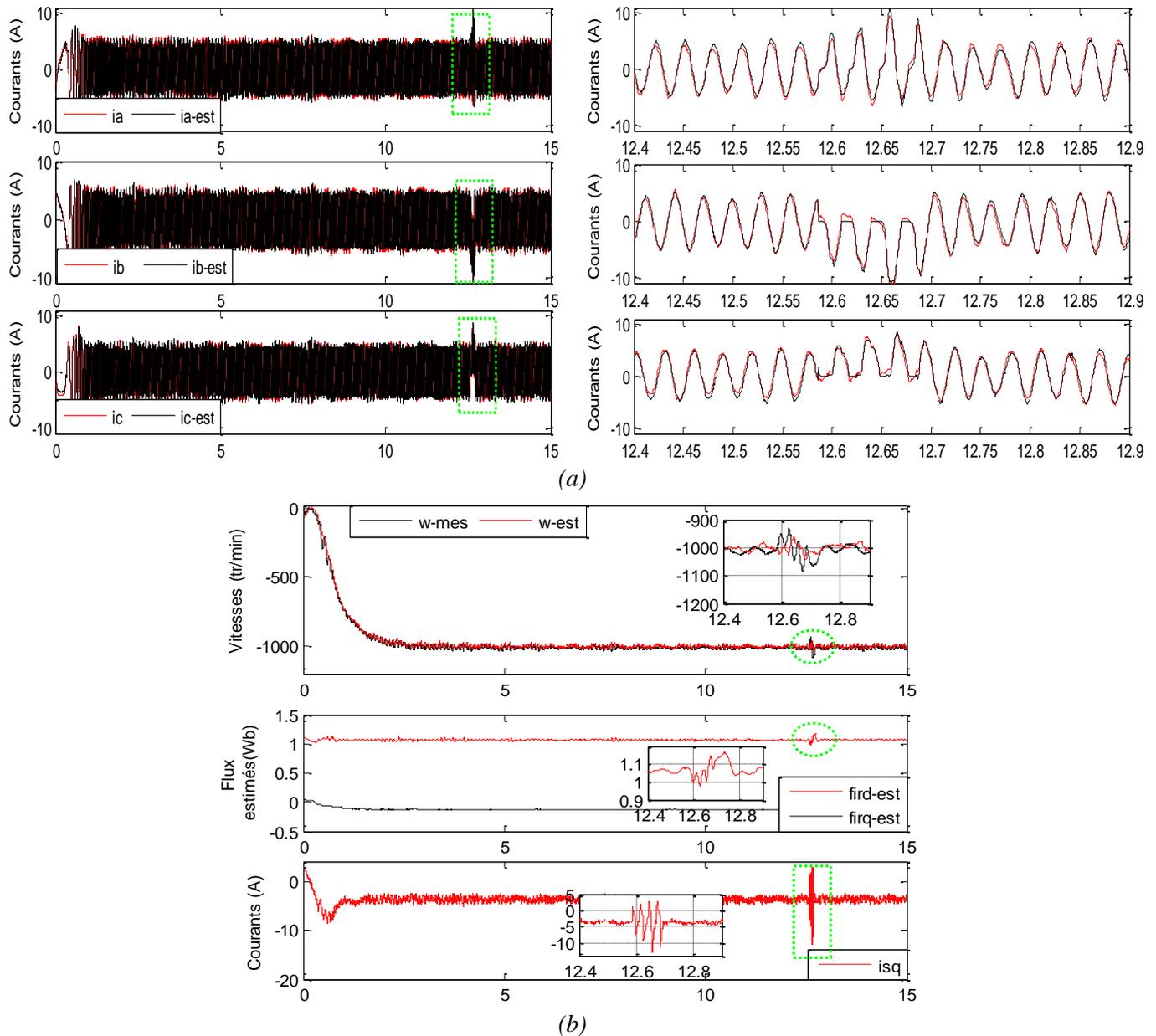


Figure 4.6: Evaluation expérimentale du fonctionnement du système contrôlé en mode sensorless à base d'un observateur super-twisting lors de la présence d'un défaut double d'ouverture des IGBTs T_3 et T_6 (50%Cn, -1000 tr/min).

Les taux d'ondulation des deux vitesses rotoriques (mesurée et estimée) par rapport à leur vitesse de référence sont toujours relativement proches environ égales à 6% pour la vitesse mesurée et 3.3% pour la vitesse estimée. L'augmentation des taux d'ondulation par rapport à l'essai précédent s'explique par l'augmentation du couple de charge ainsi que l'application d'un défaut de type double d'ouverture de deux IGBTs. D'une façon similaire qu'en fonctionnement

avec capteur, le taux d'ondulation au niveau du courant statorique image du couple électromagnétique est relativement important, il est de l'ordre de 156%. Ce pourcentage nous renseigne sur la forte oscillation au niveau du couple électromagnétique ce qui peut conduire à l'apparition d'autres défauts dans l'onduleur en plus de la dégradation du système à cause des vibrations mécaniques importantes. En conséquence, une détection ainsi qu'une compensation rapide du défaut sont nécessaires.

Dans la section suivante, nous allons appliquer une stratégie de compensation suite à l'apparition du défaut dans le but d'étudier le comportement du système commandé sans capteur de vitesse à base de l'observateur super-twisting et de vérifier l'aptitude de l'observateur à reconstituer de nouveau l'état de la machine suite aux perturbations provoquées par la phase d'isolation et de compensation du défaut. Une étude comparative par rapport à l'observateur par mode glissant (basé sur la représentation classique du modèle de la machine) utilisé pour le diagnostic des défauts dans le quatrième chapitre est réalisée.

4. Compensation du défaut

La commande tolérante aux défauts connue en anglais par "Fault Tolerant Control (FTC)" vise à assurer une continuité de fonctionnement du système, même après l'occurrence de défaut. Les systèmes avec commande tolérante aux défauts possèdent la possibilité de détecter automatiquement les composants endommagés en utilisant des méthodes de diagnostic appropriées. Elles sont capables de maintenir la stabilité globale du système avec des performances acceptables jusqu'à ce que le système contrôlé puisse être arrêté en toute sécurité pour la maintenance ou la réparation [Iser-2006], [Blan-2003].

En fonction la solution choisie pour la commande tolérante aux défauts de l'entraînement électrique, différentes stratégies peuvent être distinguées selon la figure 4.7. En raison de la nature des systèmes de commande réglables, il faut choisir une telle méthode de compensation de défaillance qui maintient les caractéristiques de base de la fonctionnalité du système. Généralement, l'utilisation de la redondance logicielle ne préserve pas les fonctionnalités précédentes.

La redondance matérielle est attrayante du point de vue de la restauration des fonctionnalités du système après l'occurrence de défaut, mais elle est coûteuse et nécessite une redondance des équipements de contrôle, de mesure et même d'actionneur. Cette solution n'est pas appliquée que dans des processus ou des applications critiques où la continuité de service est primordiale.

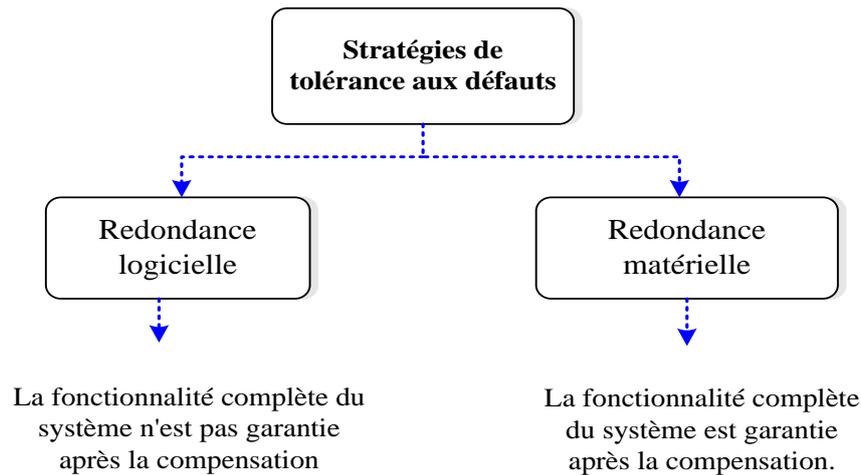


Figure 4.7: Classification des stratégies de compensation des défauts.

Concernant les défauts onduleur, différentes méthodes de diagnostic des défauts d'ouverture des IGBTs sont appliquées dans les systèmes avec tolérance de pannes afin d'assurer une restauration totale ou partielle des fonctionnalités de l'entraînement en présence des composants endommagés. De ce fait, différentes topologies du convertisseur redondant sont développées et discutées sous forme d'une étude comparative entre les caractéristiques, les coûts et les limitations de chacune [Welc-2003], [Zhan-2014]. Parmi ces topologies, la redondance matérielle par l'utilisation d'un bras supplémentaire du convertisseur garantit des performances élevées du système. Néanmoins, compte tenu de son coût élevé, cette solution est recommandée pour une utilisation dans des applications critiques nécessitant une forte sécurité de fonctionnement.

Une autre approche basée sur des topologies des onduleurs triphasés à quatre IGBTs est présentée dans [Arau-2004], [Bads-2013], [Lee-2009], [Nacu-2010], [Nguy-2009]. Selon cette approche, la phase connectée au bras défaillant du convertisseur sera reliée au point milieu du bus continu. L'inconvénient de cette solution est que pour un fonctionnement avec un couple nominal la vitesse de la machine sera limitée à la moitié de sa valeur nominale. Une autre stratégie consiste à isoler la phase défectueuse du convertisseur pour connecter le point neutre de la machine au point milieu du bus continu [Fu-1993], [Bolo-2000], [Tabb-2013]. L'inconvénient majeur de cette solution est l'exigence d'accès au point neutre du moteur qui n'est pas toujours accessible dans la plupart des applications industrielles. En conclusion, un choix judicieux de la topologie appropriée devrait être justifié par le niveau de sécurité requis pour l'application concernée et par un coût de fabrication acceptable.

4.1. Application de la FTC à un système contrôlé sans capteur

Quelque soit la stratégie de configuration choisie, on doit passer obligatoirement par trois étapes essentielles du diagnostic à l'isolation du défaut comme montré sur la figure 4.8. Le passage notamment entre la phase d'isolation et la phase de reconfiguration est généralement accompagné par des perturbations au niveau du système. De ce fait, l'objectif de cette partie est d'étudier le comportement du système contrôlé en mode sensorless et la capacité de l'observateur à résister au régime transitoire induit par la reconfiguration.

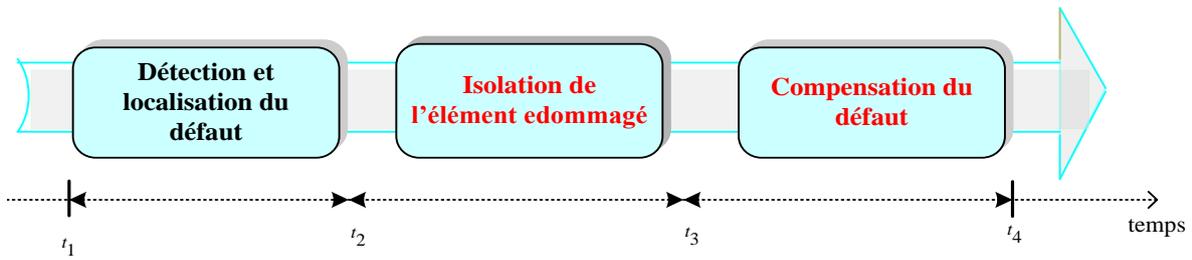


Figure 4.8: Séquences d'une stratégie de reconfiguration du système après l'apparition d'un défaut.

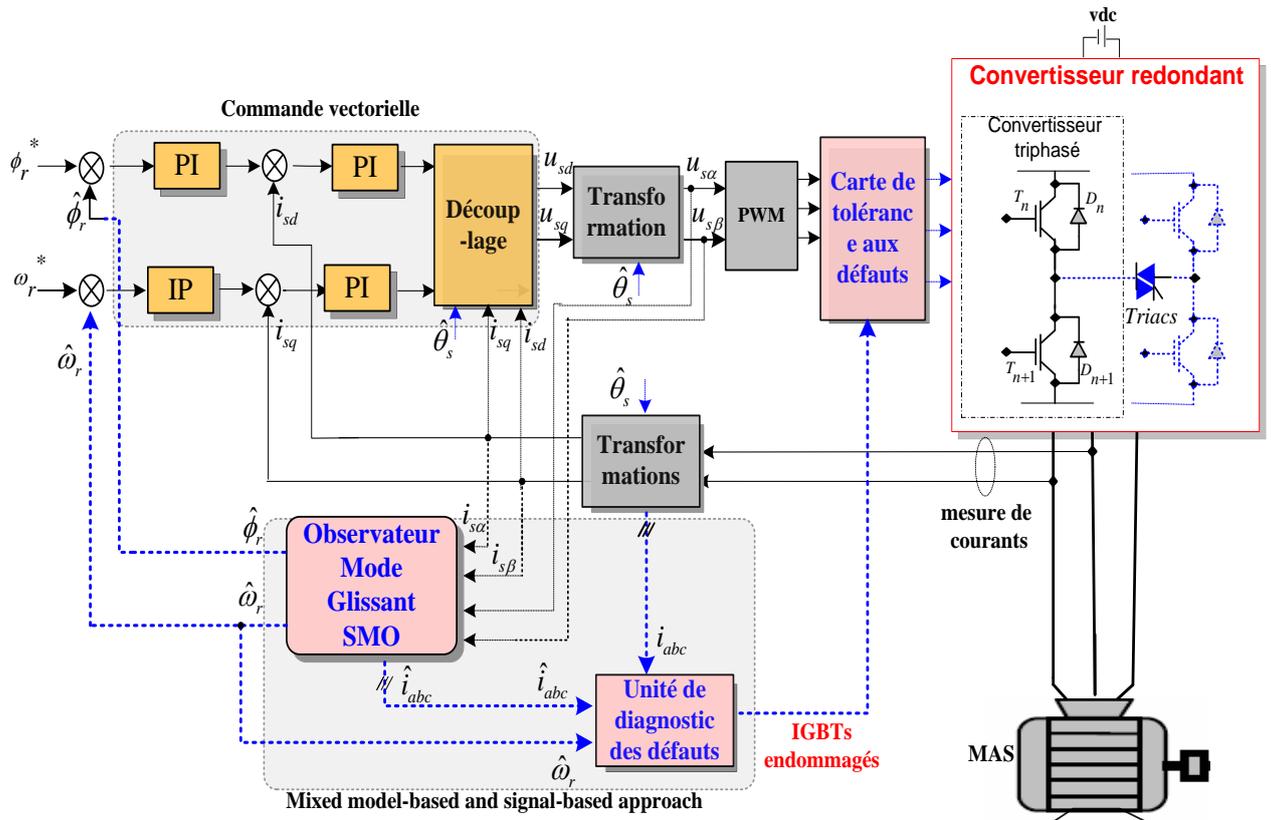


Figure 4.9: schéma bloc de la commande tolérante aux défauts d'un système contrôlé en mode sensorless.

Une méthode de diagnostic des défauts à haute performance doit être introduite dans une stratégie de compensation des défauts. Pour cette raison, on a intégré l'approche proposée dans le troisième chapitre pour la détection et l'identification des défauts d'IGBTs. Le système à tolérance de panne est présenté par la figure 4.9, il est constitué de la commande vectorielle, d'un observateur mode glissant pour la commande sans capteur, d'une unité de diagnostic des défauts d'ouverture d'IGBTs et d'un bloc de reconfiguration pour l'isolation et la compensation des défauts.

La solution utilisée pour la compensation des défauts est basée sur la redondance matérielle, elle est réalisée en utilisant un bras supplémentaire dans le convertisseur statique. La topologie du convertisseur redondant est décrite dans la figure 4.10.

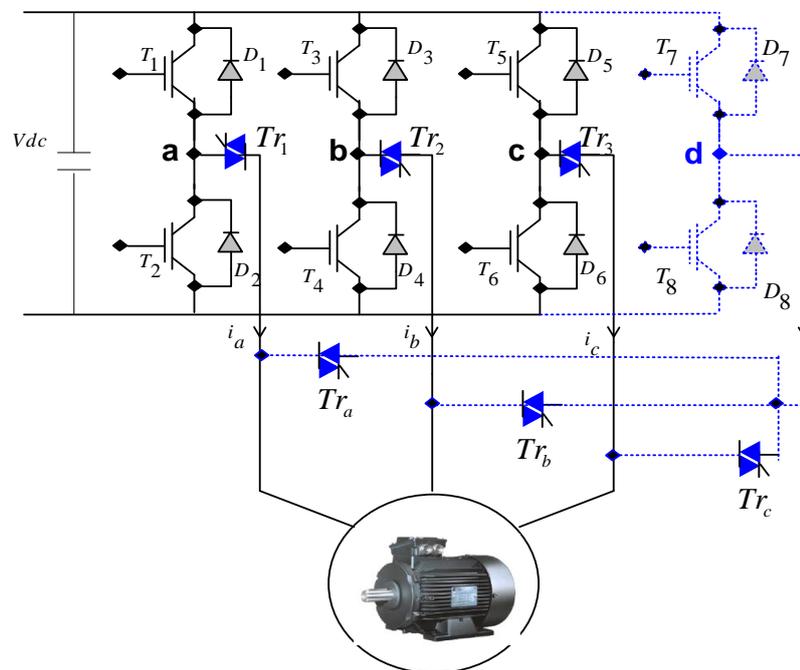


Figure 4.10: Topologie du convertisseur redondant.

Le bras redondant n'est pas utilisé lorsque le système est en fonctionnement sain. Les thyristors connectés entre les bornes de sortie de l'onduleur (a, b et c) et les phases correspondantes de la machine sont utilisés pour isoler le bras défaillant. Trois thyristors supplémentaires (T_{ra}, T_{rb}, T_{rc}) sont connectés entre la borne de sortie du quatrième bras et les trois phases du moteur, ils ont pour rôle d'insérer le bras redondant pour substituer le bras défaillant.

4.1. Validation expérimentale et discussion

Le comportement d'un système commandé avec capteur suite à l'apparition d'un défaut et l'application d'une stratégie de tolérance aux pannes est largement étudié dans la littérature [Erra-2012], [Ribe-2004]. Dans cette partie nous nous intéressons seulement à l'analyse des performances du système commandé en mode sensorless lors de l'application de la stratégie de reconfiguration. Egalement, nous étudions l'aptitude de deux observateurs basés sur la théorie des modes glissants à reconstruire le vecteur d'état estimé de la machine pour garantir une continuité du fonctionnement suite aux deux phases transitoires d'isolation et de compensation.

Un défaut est introduit dans l'IGBT T_5 de l'étage supérieur du troisième bras. Une fois le défaut est détecté et isolé, la topologie de l'onduleur est modifiée de sorte que la phase défectueuse du moteur (phase c) devient connectée au bras redondant de l'onduleur. La figure 4.11 montre les résultats expérimentaux de la commande sensorless tolérante aux défauts basée sur l'observateur par mode glissant d'ordre 1 (figure 4.11-a), et sur l'observateur super-twisting (figure 4.11-b).

Les deux essais sont effectués dans les mêmes conditions de fonctionnement de la machine et le même instant d'introduction du défaut (au début de l'alternance positive du courant i_c). La première figure traite le cas du premier observateur d'ordre 1 (SMO1), elle présente les deux courants mesurés et estimés de la phase défectueuse (i_c et i_{c-est}), la vitesse estimée et mesurée de la machine et à la fin l'erreur d'estimation entre les deux vitesses. Durant l'application de la commande tolérante aux défauts, l'observateur SMO1 subit des perturbations considérables suite aux régimes transitoires provoquées par l'isolation du bras défectueux et la commutation sur le bras redondant. Les performances du système commandé sans capteur se dégradent pour enregistrer une erreur d'estimation maximale entre la vitesse mesurée et estimée de l'ordre de 15%. Le taux d'ondulation de la vitesse estimée par rapport à la référence est de l'ordre de 21%. Celui de la vitesse mesurée est de l'ordre de 9%. A partir de l'instant $t=2.88s$ l'observateur parvient à reconstituer progressivement le vecteur d'état estimé de la machine pour que le système continue à fonctionner avec les mêmes performances qu'avant le défaut.

La deuxième figure présente le cas de la reconfiguration du système contrôlé sans capteur à base de l'Observateur Super-Twisting (STO). De la même façon qu'avec l'observateur par mode glissant d'ordre 1, les grandeurs estimées sont toujours confondues avec leurs grandeurs mesurées en mode de fonctionnement sain. Après l'apparition du défaut, l'observateur STO continue son fonctionnement avec de bonnes performances et a pu surmonter les perturbations provoquées par la phase de reconfiguration avec une stabilité meilleure au niveau du système.

L'erreur maximale enregistrée entre les deux vitesses (estimée et mesurée) durant cette phase transitoire et très faible par rapport au premier observateur ; elle est de l'ordre de 0.37% et pour un taux d'ondulation faible de la vitesse estimée de l'ordre de 4.2%.

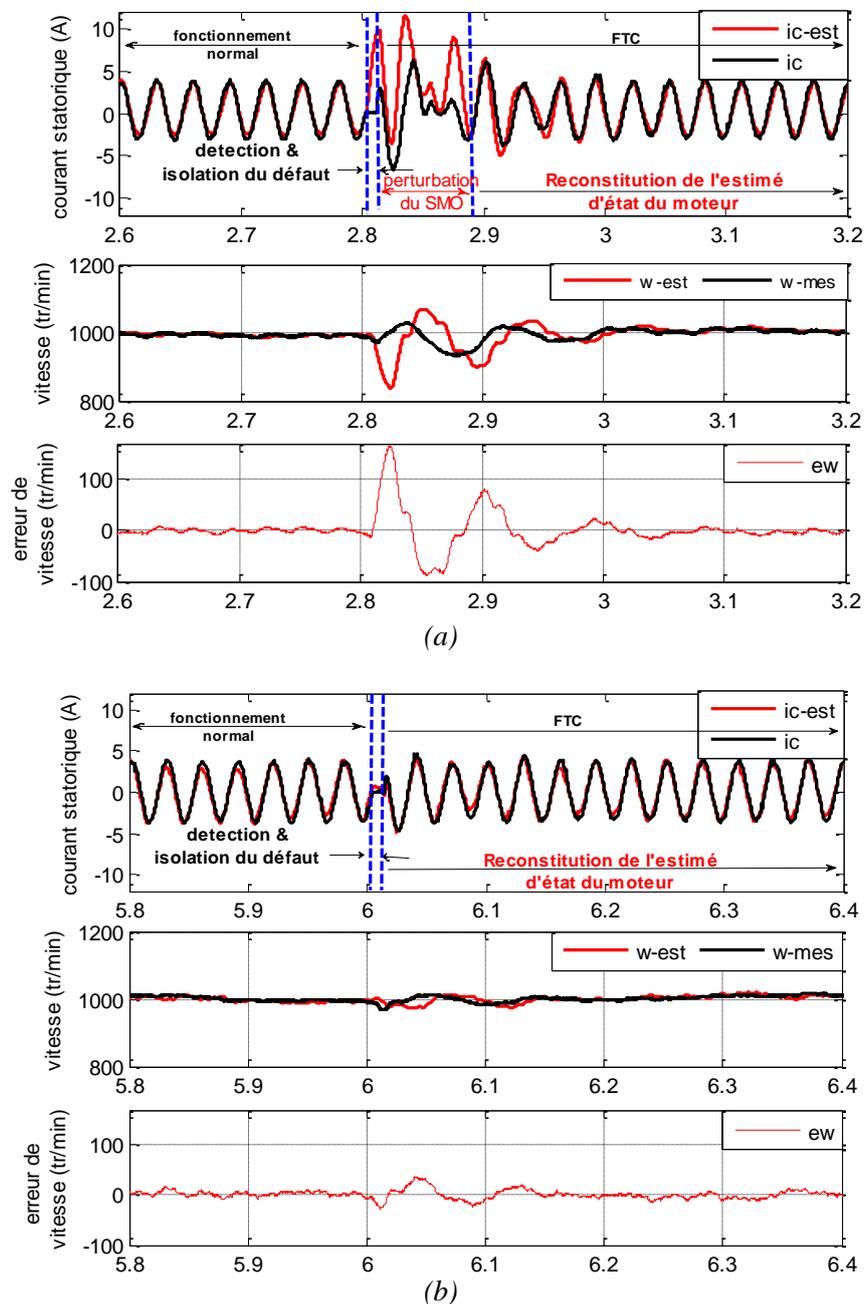


Figure 4.11: Formes d'onde expérimentales de la commande sans capteur tolérante aux pannes en cas d'un défaut d'ouverture d'IGBT T_5 : (a) avec l'observateur mode glissant d'ordre 1, (b) avec l'observateur super-twisting.

Le tableau 4.1 montre les taux d'ondulation maximal de la vitesse estimée et la vitesse mesurée après l'apparition du défaut et durant les phases d'application de la commande

tolérante aux pannes (détection, isolation et compensation) pour les deux techniques d'observation utilisées. Ces résultats montrent les meilleures performances de la commande sans capteur à base de l'observateur STO dans le régime de fonctionnement dégradé où les taux d'ondulation des deux vitesses (estimée et mesurée) sont presque égaux avec un pourcentage faible autour de 4%.

Tableau 4.1: Taux d'ondulation enregistrés durant l'application de la commande tolérante aux défauts

	Observateur mode glissant 1er ordre (SMO1)	Observateur Super-Twisting (STO)
Taux d'ondulation (Vitesse mesurée : ω_{mes})	9.13%	4.1%
Taux d'ondulation (Vitesse estimée : ω_{est})	21%	4.2%

La même technique de reconfiguration par redondance matérielle a été appliquée avec un système conventionnel à base d'une machine asynchrone commandée avec capteur mécanique de vitesse [Espí-2013], l'algorithme de diagnostic utilisé est celui développé par Delgado [Camp-2011], il est aussi basé sur l'approche modèle. Après une durée de 1s de la phase de reconfiguration, le système a réussi à restituer son régime de fonctionnement normal. On se basant sur ces résultats, on peut conclure que même avec les dégradations enregistrées au niveau de notre système commandé en mode sensorless durant la phase transitoire de reconfiguration, les performances de SMO1 et du système entier restent toujours acceptables. L'observateur a réussi après une durée de deux périodes du courant à rétablir son fonctionnement normal.

Concernant la commande sans capteur à base de l'algorithme du super-twisting, le système a enregistré de très bonnes performances en présence du défaut ainsi qu'en régime transitoire de reconfiguration du système. Le taux d'ondulation au niveau de la vitesse estimée et celle mesurée est semblable à celui obtenu par un système commandé avec capteur en mode de fonctionnement avec défaut.

5. Conclusion

Ce chapitre a présenté une stratégie de commande sans capteur de vitesse de la machine asynchrone triphasée. Un observateur par mode glissant d'ordre 2 à base de l'algorithme du super-twisting est développé dans le but d'avoir un système avec des performances de fonctionnement supérieures en mode sain aussi qu'en mode dégradé, et pour un coût faible. La réduction du coût est assurée par le remplacement du capteur mécanique de vitesse par un capteur logiciel. Le but de l'amélioration de la dynamique du système contrôlé sans capteur de

vitesse en présence des défauts n'est pas seulement pour faire fonctionner la machine en mode dégradé, mais plutôt pour assurer la stabilité du système et garantir sa continuité de fonctionnement durant les régimes transitoires. Cette phase est cruciale car avec une technique de contrôle qui n'assure pas la stabilité du système pendant ces transitoires, le moteur diverge ou s'arrête complètement sans laisser le temps nécessaire pour l'application de la stratégie de reconfiguration adaptée.

Pour vérifier ce concept, on a validé expérimentalement cette technique d'observation et on a évalué sa robustesse en régime de fonctionnement sain et en présence de défaut. Les défauts testés sont des défauts de type simple et double d'ouverture d'IGBTs dans un convertisseur statique. Enfin, pour améliorer la fiabilité du système et dans le but d'étudier le comportement des deux observateurs (SMO1 et STO), la méthode de diagnostic proposée dans le chapitre précédent est introduite dans une stratégie de reconfiguration à base d'une redondance matérielle (onduleur triphasé avec un bras supplémentaire).

Pour la première technique d'observation, des dégradations sont enregistrées après l'apparition du défaut mais l'observateur mode glissant d'ordre 1 a réussi à reconstituer rapidement le vecteur d'état estimé de la machine pour que le système puisse continuer son fonctionnement en toute sécurité après sa reconfiguration.

Pour la deuxième technique, l'observateur STO garde toujours des bonnes performances par rapport à l'estimation d'état de la machine en présence et en absence du défaut. Une meilleure stabilité du système est ainsi garantie durant les différentes étapes d'application de la commande tolérante aux défauts.