

# Diagnostic de défauts de circuit ouvert d'interrupteurs de puissance d'un convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux pour des applications électrolyseur

Damien GUILBERT, Melika HINAJE

Université de Lorraine, GREEN, F-54000 Nancy, France

**RESUME** – Le but de cet article est de proposer une nouvelle méthode de diagnostic de défauts de circuit ouvert d'interrupteurs de puissance pour un convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux dans un système de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Pour garantir des performances optimales en cas de défaillances, il est crucial d'identifier avec précision le composant défectueux dans le convertisseur et d'appliquer une stratégie de contrôle tolérante aux défauts. La méthode de diagnostic repose sur la comparaison de la forme d'onde du courant d'entrée et des signaux PWM de chaque interrupteur de puissance. Les performances de la méthode de diagnostic et de la stratégie de contrôle tolérante aux défauts sont évaluées via des simulations et des expérimentations. Les résultats obtenus ont démontré que la méthode de diagnostic proposée peut détecter les défaillances d'interrupteurs de puissance en une période de commutation et que la stratégie de contrôle tolérante aux défauts permet de garantir des performances optimales de l'électrolyseur.

**Mots-clés** – *électronique de puissance, électrolyseur, convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux, fiabilité, diagnostic de défauts, tolérance aux défauts.*

## 1. INTRODUCTION

La diffusion de centrales de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau alimentées par des sources d'énergie décarbonées a suscité un intérêt croissant ces dernières années [1]. D'autre part, une augmentation pertinente pourrait provenir de la diffusion de nombreuses petites centrales de production plus proches des consommateurs. L'électrolyse de l'eau consiste à exploiter l'énergie décarbonée et de l'eau pure pour fabriquer de l'hydrogène qui peut être utilisé à différentes fins : stockage de l'énergie, alimentation de piles à combustible pour la génération d'électricité (transport, bâtiment), et applications *power-to-gas* pour la production de gaz vert [2]. Le processus d'électrolyse de l'eau est possible grâce à l'utilisation d'électrolyseurs.

Les électrolyseurs peuvent être vus comme des charges exigeant des courants très élevés (de l'ordre du millier d'ampères) et des tensions élevées (de l'ordre d'une centaine de volts). En conséquence, ils sont généralement associés avec de l'électronique de puissance qui peut être classée en deux catégories : (1) des convertisseurs AC-DC basés soit sur des thyristors ou des IGBT, (2) des convertisseurs DC-DC pouvant être combinés avec des convertisseurs AC-DC non commandés [3]. De nos jours, la disponibilité sur le marché des interrupteurs de puissance, offrant un rendement élevé aux convertisseurs dans lesquels ils sont adoptés, a accru l'intérêt pour le développement de convertisseurs DC-DC de puissance nominale jusqu'à environ 10 kW à utiliser également dans les applications domestiques [3]. Dans ce cas, la tension de fonctionnement est réduite (environ une dizaine de volts) ce qui renforce la sécurité ; cependant, le marché exige une fiabilité améliorée afin que le coût de maintenance soit réduit et que la continuité de fonctionnement soit garantie.

Ce problème de fiabilité est étudié puisque les convertisseurs DC-DC sont fréquemment des sources de défaillances dans beaucoup d'applications [4]. En effet, comme souligné dans la littérature, la diminution de la fiabilité de ces convertisseurs est causée par les conditions de fonctionnement et climatiques. En outre, les composants présentant les taux de défaillance les plus élevés sont les condensateurs électrolytiques et les interrupteurs de puissance [4]. Les défauts de circuit ouvert d'interrupteurs de puissance sont considérés dans ce travail de recherche. Le processus d'électrolyse de l'eau est une application critique et une fourniture continue de l'hydrogène doit être assurée malgré la présence de défaillances dans le convertisseur de puissance. De là, pour éviter toute perturbation de la production d'hydrogène, l'utilisation de convertisseurs tolérants aux défauts et de diagnostic de défauts est hautement recommandée [5].

Ces dernières années, de nombreux chercheurs ont employés des convertisseurs DC-DC tolérants aux défauts exploitant une architecture redondante couplés avec des algorithmes de détection de défauts pour assurer une continuité de service tout en améliorant les performances du système [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Partant de la littérature, il est à noter que le diagnostic des défauts est souvent proposé pour les convertisseurs entrelacés et entrelacés flottants qui conviennent bien aux applications pile à combustible et photovoltaïques. Toutefois, pour les applications électrolyseur, cette thématique de recherche est peu représentée dans la littérature puisqu'un seul article a été publié à ce jour [14]. Dans cet article, les auteurs ont proposé une stratégie de contrôle tolérante aux défauts de circuit ouvert d'interrupteurs de puissance pour un convertisseur entrelacé de type abaisseur. Cependant, le diagnostic de défaut n'a pas été considéré.

Partant de ce constat, la contribution principale de cet article est de développer une méthode de diagnostic de défauts pour identifier avec précision l'interrupteur défectueux et une stratégie de contrôle tolérante aux défauts dans un convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux approprié pour des applications électrolyseur. La méthode de diagnostic consiste à comparer la forme d'onde du courant d'entrée du convertisseur et des signaux PWM de chaque interrupteur de puissance. Pour évaluer les performances de la méthode de diagnostic proposée, un banc de test a été réalisé incluant un système de prototype rapide basé sur un MicroLabBox dSPACE associé à un microcontrôleur. Les résultats obtenus de simulations et d'expérimentations ont démontré que la méthode de diagnostic développée permet de détecter un défaut en une période de commutation. Par ailleurs, le défaut n'interrompt pas le fonctionnement du convertisseur, qui continue d'alimenter l'électrolyseur avec un circuit de configuration réduit.

L'article est composé de six sections. Après avoir fourni un état de l'art approfondi axé sur la fiabilité de l'électronique de puissance et les motivations pour mener à bien ces travaux de recherche, la section 2 présente le convertisseur DC-DC étudié

à des fins de diagnostic de défaut et quelques résultats de simulation pour faire ressortir les impacts des défaillances d'un interrupteur de puissance défectueux au sein du convertisseur. Ensuite, dans la section 3, la méthode de diagnostic de défaut proposée et les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts adoptées sont décrites. Ensuite, dans la section 4, des résultats de simulation sont donnés pour valider à la fois la méthode de diagnostic proposée et les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts. Dans la section 5, le banc d'essai expérimental conçu est détaillé et des résultats expérimentaux sont fournis pour confirmer les performances de la méthode de diagnostic proposée pour la détection et l'identification précise du défaut au sein du convertisseur. Enfin, la section 6 résume les principaux avantages de l'approche proposée et des résultats obtenus.

## 2. CONVERTISSEUR DC-DC ÉTUDIÉ POUR DES OBJECTIFS DE DIAGNOSTIC DE DÉFAUTS

### 2.1. Convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux

Au cours de ces dernières années, de nombreux efforts ont été réalisés pour proposer de nouvelles topologies de convertisseurs DC-DC pour interfacier les sources d'énergie renouvelables et les électrolyseurs pour des applications de moyenne puissance (une dizaine de kilowatts) [14, 15, 16, 17]. Ces convertisseurs peuvent être connectés directement aux systèmes photovoltaïques [14, 16] ou aux systèmes de conversion éolien grâce à l'utilisation d'un redresseur [3]. Le bon fonctionnement du convertisseur DC-DC est crucial pour la chaîne de conversion [14]. Dans cet article, l'étude du diagnostic des défauts de circuit ouvert d'interrupteurs de puissance est portée sur un convertisseur abaisseur entrelacé à trois niveaux, connu sous le terme *three-level interleaved buck converter*, pour adresser les principales problématiques abordées dans l'introduction. Aucun travail similaire n'a été publié dans la littérature sur le diagnostic de défauts d'interrupteurs de puissance de ce convertisseur.

Le schéma du convertisseur et son principe de fonctionnement sont illustrés sur les figures 1 et 2, respectivement. Du point de vue de son architecture électrique, le convertisseur présente des similitudes avec le convertisseur boost entrelacé flottant à quatre phases présenté dans [13]. Cependant, le convertisseur représenté sur la figure 1 fonctionne en mode abaisseur puisque l'électrolyseur exige une basse tension d'alimentation (environ dix volts). Dans la partie supérieure du convertisseur, deux convertisseurs DC-DC dévolteur sont connectés en parallèle ; tandis que dans la partie inférieure, les versions inversées du convertisseur DC-DC dévolteur sont connectées. De là, le courant peut être partagé de manière équilibrée entre les phases et les contraintes de courant sur les composants de l'électronique de puissance peut être réduites. De plus, cette solution réduit les pertes de conduction puisque la moitié du courant total traversant la même résistance parasite (comprenant la somme de la résistance à l'état passant de l'interrupteur de puissance et de la résistance de l'inductance) donne un quart des pertes totales. En conséquence, les pertes de conduction totales en considérant  $Q_1$  et  $Q_2$  sont réduites de moitié. Cette redondance statique permet également, non seulement de maintenir le convertisseur en fonctionnement même en cas de défaillance mais également de compenser le courant en conservant une ondulation de courant réduite. Cette dernière caractéristique est cruciale pour alimenter les électrolyseurs puisque l'ondulation du courant dégrade ses performances en diminuant sa fiabilité [18, 19]. A l'entrée du convertisseur, deux condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont présents, permettant de réduire la contrainte de tension aux bornes des composants de l'électronique de puissance. En effet, ils sont soumis à une tension de blocage d'une seule capacité. Enfin, à la sortie du convertisseur, deux inductances  $L_0/2$  sont utilisées pour réaliser une commutation à courant nul. En résumé, les caractéristiques du convertisseur proposées sont les suivantes : a) faible rapport de conversion en tension, b) faible ondulation de courant, c) rendement énergétique élevé, et d) continuité de fonc-

tionnement en cas de défaillance de l'interrupteur de puissance du fait de son architecture entrelacée adoptant deux couples d'interrupteurs de puissance complémentaires.

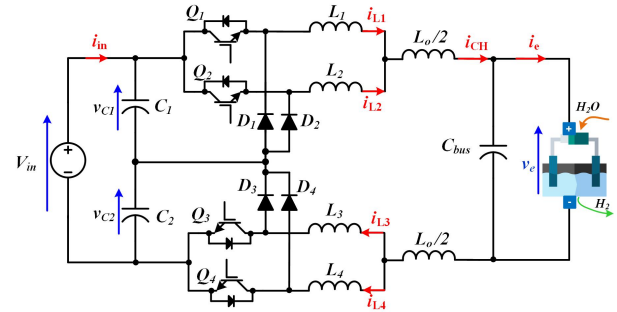


Fig. 1. Convertisseur DC-DC buck entrelacé trois niveaux étudié.

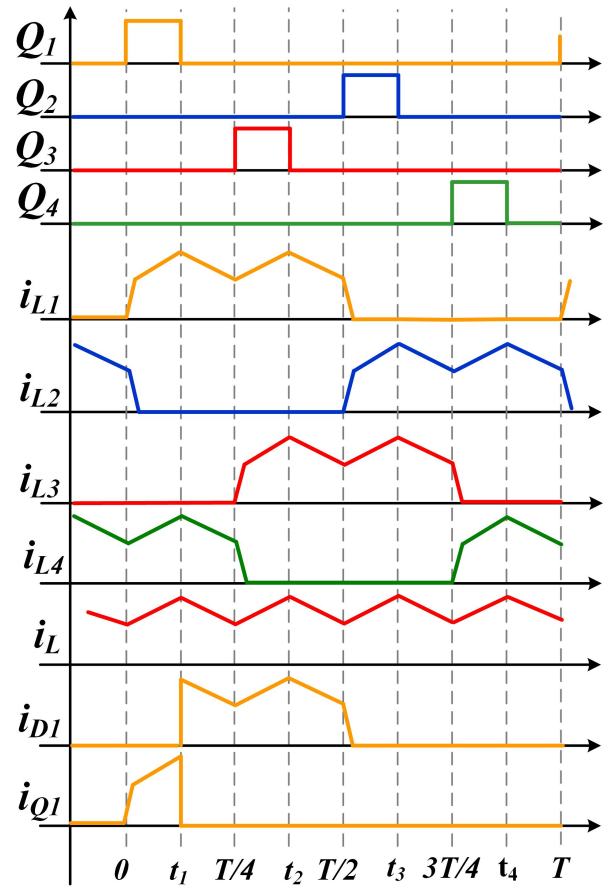


Fig. 2. Principe de fonctionnement du convertisseur étudié.

En ce qui concerne le fonctionnement du convertisseur illustré sur la figure 2, chaque signal de commande PWM pilotant les interrupteurs de puissance est contrôlé avec un angle de décalage de  $\pi/2$  radian dans cet ordre :  $Q_1, Q_3, Q_2, Q_4$ . Chaque interrupteur de puissance avec sa diode de roue libre se comporte comme dans un convertisseur abaisseur traditionnel ; cependant, grâce au déphasage des signaux de commande, chaque composant fonctionne pendant la moitié de la période de commutation réduisant la contrainte thermique. En conséquence, le courant traversant la charge, donné par la somme de  $i_{L1}$  et  $i_{L2}$ , présente une valeur crête à crête réduite. L'ondulation du courant de sortie peut être réduite et permet d'optimiser les performances de l'électrolyseur en s'appuyant sur une étude récente des effets des

ondulations du courant sur la dégradation des performances de l'électrolyseur qui a montré une détérioration des performances et une diminution de la fiabilité [19]. Grâce à l'adoption de deux couples d'interrupteurs de puissance complémentaires, la compensation de l'ondulation de courant est également obtenue en cas de défaut.

## 2.2. Fonctionnement du convertisseur suite à une défaillance d'un interrupteur de puissance

Pour mettre en évidence les effets d'un défaut de circuit ouvert d'interrupteur de puissance sur le système, des simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel PSIM. Le système comprend à la fois le convertisseur étudié et le modèle de l'électrolyseur basé sur un circuit électrique équivalent prenant en compte les conditions de fonctionnement statiques et dynamiques [20]. Les spécifications techniques du convertisseur utilisé pour les simulations sont données dans le tableau 1. La fréquence de découpage du convertisseur a été fixée à 10 kHz. Il convient de remarquer que dans cette analyse, le courant de sortie est régulé par un contrôleur de type mode glissant modifié conçu dans [21]; cette solution permet de minimiser l'effet de la présence d'un défaut. De plus, cette loi de commande est conçue pour deux objectifs principaux : premièrement, contrôler le débit d'hydrogène et deuxièmement, assurer l'équilibre des deux tensions d'entrée des condensateurs. Le schéma de principe du contrôleur est illustré sur la figure 3.

Tableau 1. Synthèse des spécifications techniques et des paramètres de contrôle du convertisseur.

Donnée	Valeur	Unité
Inductance $L_{1,2,3,4}$	200	$\mu H$
Inductance $L_0/2$	800	$\mu H$
Condensateur d'entrée $C_{1,2}$	4400	$\mu F$
Condensateur de sortie $C_{bus}$	3300	$\mu F$
Fréquence de commutation	10	$kHz$
$k_i = \lambda_i$	1256	-
$k_v = \lambda_v$	125	-

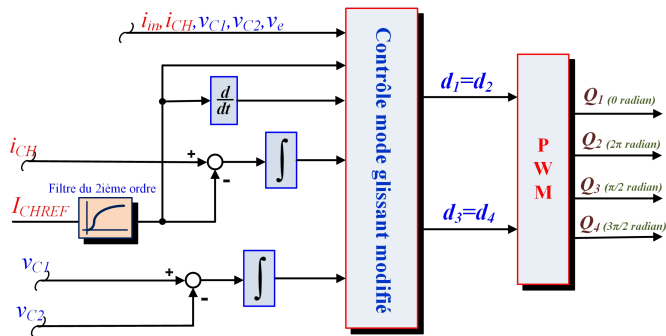


Fig. 3. Schéma de principe de la commande par mode glissant modifié du convertisseur.

En s'appuyant sur la figure 3, le courant d'entrée  $i_{in}$ , le courant de sortie  $i_{ch}$  et la tension du condensateur de  $C_1$  et  $C_2$  ( $V_{C1}$  et  $V_{C2}$ ) ont été mesurés afin que la commande par mode glissant modifié puisse calculer le rapport cyclique ( $d$ ). De plus, le rapport cyclique de  $Q1$  et  $Q2$  est supposé être  $d_1=d_2$ , tandis que le rapport cyclique de  $Q_3$  et  $Q_4$  est  $d_3=d_4$ . La référence du courant de sortie est filtrée par un filtre du second ordre pour lisser le courant du condensateur de sortie.

Afin de vérifier les performances du système en cas de défaut, un défaut de circuit ouvert a d'abord été simulé dans la partie inférieure du convertisseur (interrupteur de puissance  $Q_3$ ) et les

résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures 4 et 5.

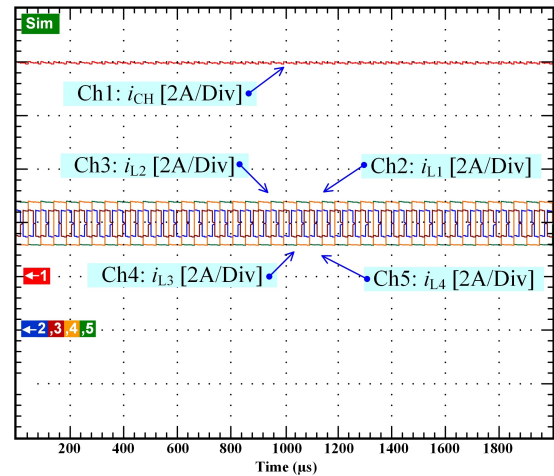


Fig. 4. Résultats de simulation : mode sain.

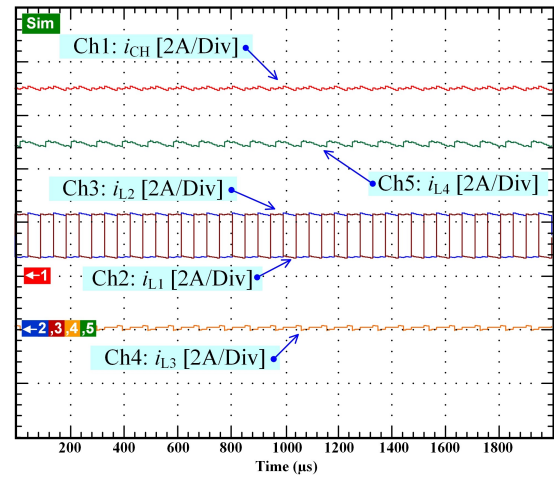


Fig. 5. Résultats de simulation : mode dégradé.

D'après la figure 4, d'une part, lors du fonctionnement en mode sain (sans défaut), le courant de sortie est égal à 10 A avec une ondulation de courant très réduite (inférieure à 0,1 A, soit environ 1%), tandis que les quatre courant de phases ( $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$ ,  $i_{L4}$ ) sont parfaitement équilibrés (environ 5 A). Même si les courants traversant  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  et  $L_4$  sont soumis à une ondulation de courant, cela se compense sur la charge. D'autre part, à la suite d'un défaut sur l'interrupteur  $Q_3$ , la figure 5 montre la conséquence sur le fonctionnement du convertisseur en conservant la même loi de commande que dans un mode de fonctionnement sain. Après un léger transitoire d'une durée de quelques périodes de commutation, le nouveau fonctionnement stable montre que le convertisseur est toujours capable de fonctionner mais avec des performances réduites. En particulier, le courant de sortie  $i_{ch}$  est abaissé d'environ 10% et l'ondulation associée est presque doublée. En comparaison, l'interrupteur de puissance  $Q_4$  compense intégralement le défaut sur  $Q_3$  puisqu'il est situé dans la partie inférieure défectueuse. En effet, les parties supérieure et inférieure sont indépendantes l'une de l'autre. Ainsi, l'intensité du courant  $i_{L2}$  est le double de la valeur en mode sain (environ 10 A) et le courant de sortie est maintenu proche de sa valeur de référence grâce à la robustesse du contrôleur. Cependant, cela peut être perçu comme une légère augmentation de l'ondulation de courant (0,16 A) qui est soulignée sur

la figure 5. Cette augmentation est due à un angle de déphasage inadapté des signaux de commande PWM pilotant les interrupteurs de puissance sains, ce qui entraîne également une forme modifiée du courant comme le montre la figure 5 par rapport à un mode sain avec un angle de décalage adapté. Ce fonctionnement en mode dégradé peut être compensé en adoptant les techniques de décalage des signaux de commande et de compensation proposées dans cet article conçues pour restaurer les performances d'origine.

À partir de cette analyse détaillée lorsqu'un défaut de circuit ouvert se produit, un diagnostic de défaut et une stratégie de contrôle tolérante aux défauts sont nécessaires et sont présentés dans la prochaine section. Bien que la stratégie de contrôle décrite dans [21] soit capable de minimiser l'effet d'un défaut, elle nécessite l'identification précise de l'interrupteur de puissance défectueux. Pour cette raison, l'une des caractéristiques les plus importantes demandées pour le diagnostic de défaut est d'identifier précisément son emplacement qui est proposé dans cet article. Sur cette base, par la technique de reconfiguration des signaux de commande PWM proposée dans cet article, les performances d'origine peuvent être restaurées.

### 3. DIAGNOSTIC DE DÉFAUTS ET STRATÉGIES TOLÉRANTES AUX DÉFAUTS

#### 3.1. Description de la méthode de diagnostic

Une méthode de diagnostic de défauts a été conçue pour identifier précisément le défaut de circuit ouvert au sein du convertisseur. Elle repose sur la comparaison de la forme d'onde du courant d'entrée  $i_{in}$  avec le signal de commande PWM de chaque interrupteur de puissance du convertisseur. Comme mentionné dans la section 2.1, le signal de commande de chaque phase du convertisseur est décalé de  $\pi/2$  radian ( $Q_1, Q_3, Q_2, Q_4$ ). Par conséquent, la forme d'onde du courant d'entrée  $i_{in}$  du convertisseur est un signal d'impulsion avec les formes d'onde PWM des 4 phases. Un diagramme schématique de la méthode de diagnostic proposée pour détecter une défaillance sur la phase 3 est illustré sur la figure 6.

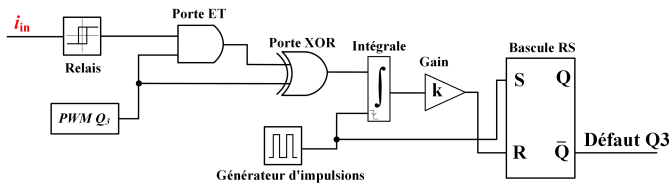


Fig. 6. Méthode de diagnostic pour identifier un défaut sur la phase 3.

À partir de la figure 6, la méthode de diagnostic développée est composée de 3 signaux (le courant d'entrée  $i_{in}$ , le signal PWM et le générateur d'impulsions), 2 comparateurs analogiques (la porte ET et la porte XOR (ou exclusif)), un relais, une bascule RS, une intégrale, et un gain. La méthode de diagnostic étudiée commence par recevoir le courant d'entrée  $i_{in}$  du convertisseur. La forme d'onde du courant d'entrée est similaire à l'état passant du signal PWM des 4 phases. Ensuite, le relais convertit le courant d'entrée  $i_{in}$  de haute amplitude en forme binaire pour le comparer avec le signal PWM.

Ensuite, la sortie du relais et le signal PWM de la phase 3 sont comparés via l'utilisation d'une "porte ET" pour capturer la forme du courant de la phase 3. En conséquence, la sortie du signal de la "porte ET" ne montre que le courant de la phase 3 par rapport à la sortie du relais.

Par la suite, pour détecter le défaut de la phase 3, la "porte XOR" a été appliquée pour comparer la sortie de la "porte ET" et encore une fois avec le signal PWM de la phase 3. D'une part, la sortie de la "porte XOR" est égale à 1 (état passant) lorsque les deux entrées sont identiques en même temps. Cependant, la

sortie de la "porte XOR" passe à l'état passant en quelques secondes. Pour cette raison, l'intégrateur et le gain ont été appliqués à ce signal pour augmenter sa période lorsqu'il est égal à 1. De plus, la valeur du gain est égale à la période de fréquence de commutation (10 ms). D'autre part, la sortie de la "porte XOR" est égale à 0 (état bloqué) lorsque les deux entrées sont dans des états différents.

De plus, une bascule RS a été utilisée dans cette méthode de diagnostic. La borne R (RESET) de la bascule RS est commandée par la sortie de la "porte XOR". En outre, un générateur d'impulsions avec le même déphasage et la même fréquence de commutation que la PWM de la phase 3 à un rapport cyclique de 50 % a été utilisé pour l'entrée S (SET) de la bascule RS et pour réinitialiser la valeur de l'intégrateur. Enfin, la sortie  $\bar{Q}$  de la bascule RS est égale à 1 ou 0 lorsque le convertisseur fonctionne respectivement en mode sain et dégradé. Le fonctionnement de la méthode de diagnostic proposée lors du passage du mode sain au mode dégradé est schématisé sur la figure 7.

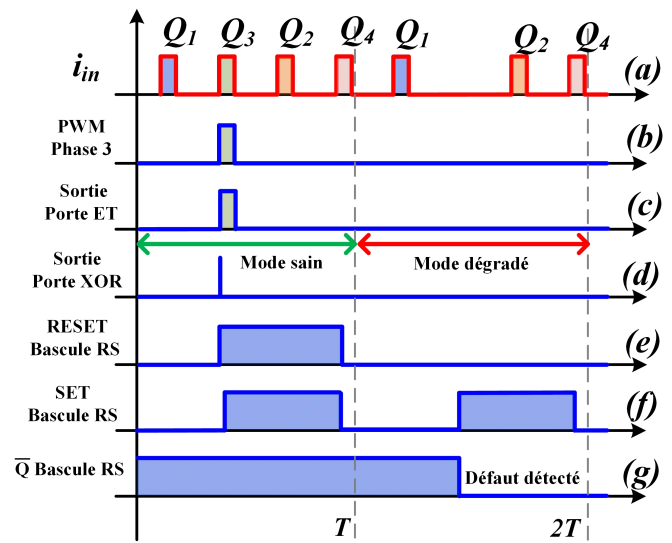


Fig. 7. Diagramme de la méthode de diagnostic proposée en cas de défauts sur la phase 3.

En se basant sur la figure 7, les formes d'onde ne montrent que deux périodes de commutation avec sept signaux : le courant d'entrée  $i_{in}$ , le signal PWM de la phase 3, la sortie de la "porte ET", la sortie de la "porte XOR" et les sorties RESET, SET et  $\bar{Q}$  de la bascule RS.

Le diagramme commence avec le convertisseur fonctionnant en mode sain (première période de commutation), on peut souligner que le signal du courant d'entrée  $i_{in}$  (filtré par le relais) est composé de l'état passant des signaux de commande PWM des 4 phases (figure 7 (a)). Ensuite, la sortie de la "porte ET" ne présente que le courant de la phase 3 (figure 7 (c)). De là, les deux entrées de la "porte XOR" sont les mêmes signaux. La sortie de la "porte XOR" est à l'état passant pendant une courte période (figure 7 (d)). Par la suite, ce signal a été intégré et multiplié par un gain pour augmenter la période où le signal est égal à 1 (figure 7 (e)) et appliqué à la borne RESET de la bascule RS. De plus, un signal d'impulsion avec un rapport cyclique de 50 % avec le même angle de décalage et la même fréquence de commutation que le signal PWM de la phase 3 a été généré pour l'entrée SET de la bascule RS et permet de réinitialiser l'intégrateur (figure 7 (f)). Enfin, la sortie  $\bar{Q}$  de la bascule RS est égale à 1 car les deux entrées de la bascule RS sont dans les mêmes états. Dans ce cas, le convertisseur fonctionne en mode sain.

Ensuite, durant la deuxième période de commutation, le convertisseur commence à fonctionner en mode dégradé. On peut observer qu'un défaut de circuit ouvert s'est produit sur

la phase 3. Pour créer cette défaillance, le signal de commande PWM de  $Q_3$  a été forcé à 0. Par conséquent, le courant de la phase 3 dans le courant d'entrée a disparu. Le courant d'entrée affiche uniquement les courants des phases 1, 2 et 4 (figure 7 (a)). Les deux entrées de la "porte ET et XOR" sont égales à 0, ce qui fait que les deux sorties sont à 0 (figure 7 (c) et figure 7 (d)). Enfin, les deux entrées de la bascule RS sont dans des états différents. Par conséquent, la sortie  $Q$  de la bascule RS est égale à 0. Cela signifie que la méthode de diagnostic proposée a détecté un défaut de circuit ouvert sur la phase 3.

La connaissance de l'interrupteur de puissance défectueux permet d'appliquer une stratégie de contrôle tolérante aux défauts appropriée pour le convertisseur, qui est détaillée dans la prochaine sous-section.

### 3.2. Stratégie de contrôle tolérante aux défauts

En se référant aux résultats de simulation obtenus sur les figures 4 et 5, l'apparition d'un défaut de circuit ouvert provoque l'augmentation de l'ondulation du courant de sortie  $i_{ch}$  et du courant circulant à travers l'interrupteur de puissance sain situé dans la partie défectueuse (la valeur du courant est deux fois plus élevée que dans un mode de fonctionnement sain sans défaut). En outre, l'ondulation du courant de sortie  $i_{ch}$  est une forme d'onde asymétrique en raison d'un angle de déphasage inapproprié des signaux de commande PWM des trois interrupteurs de puissance restants par rapport à un mode sain. Comme souligné récemment dans la littérature [18, 19], les ondulations de courant altèrent l'efficacité énergétique et les performances des électrolyseurs, en particulier celles provenant des convertisseurs DC-DC fonctionnant à des fréquences de commutation élevées. Par conséquent, dans cette sous-section, des stratégies de contrôle tolérantes aux défauts ont été étudiées pour réduire l'ondulation du courant de sortie et améliorer les performances de l'électrolyseur sur une longue période de fonctionnement.

Les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts proposées pour le convertisseur en mode dégradé sont développées en s'appuyant sur les interrupteurs de puissance sains restants. Une fois que l'interrupteur de puissance défectueux est identifié par la méthode de diagnostic, le signal PWM inadapte est ajusté en conséquence à l'angle de déphasage approprié des interrupteurs de puissance restants. En effet, les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts proposées permettent de modifier l'angle de décalage à  $2\pi/3$  radian entre chaque interrupteur de puissance restant au lieu de  $\pi/2$  en mode sain. En conséquence, les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts à appliquer suivant la phase défectueuse sont données dans le tableau 2.

Tableau 2. Stratégies de contrôle tolérantes aux défauts à appliquer suivant la phase défectueuse.

Phase	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
1	-	$\pi + \pi/6$	$\pi/2$	$3\pi/2 + \pi/3$
2	0	-	$\pi/2 + \pi/6$	$3\pi/2 - \pi/6$
3	0	$\pi - \pi/3$	-	$3\pi/2 - \pi/6$
4	0	$\pi + \pi/3$	$\pi/2 + \pi/6$	-

Les valeurs indiquées dans le tableau 2 indiquent la phase qu'il faut ajouter à la valeur d'origine avant le défaut pour obtenir le déphasage permettant la compensation après le défaut. A titre d'exemple, la nouvelle valeur de phase de  $Q_2$  sera modifiée de  $\pi$  à  $\pi + \pi/6$  en cas de défaut détecté en  $Q_1$ , de  $\pi$  à  $\pi - \pi/3$  en cas de défaut détecté en  $Q_3$ , et de  $\pi$  à  $\pi + \pi/3$  en cas de défaut détecté en  $Q_4$ .

En se basant sur le tableau 2, on peut observer que les nouveaux angles de déphasage des interrupteurs de puissance restants sont modifiés pour obtenir l'angle approprié sur la base de l'angle de phase de référence sans défauts. De plus, l'un des angles de phase de l'interrupteur de puissance sain n'est pas mo-

difié (interrupteur  $Q_1$ ) pour faire la référence des deux interrupteurs de puissance restants. D'une part, un défaut se produisant sur la phase 1, l'angle de phase de  $Q_3$  est choisi comme référence. D'autre part, un défaut se produisant sur les phases 2, 3 et 4, l'angle de phase de  $Q_1$  n'a pas besoin d'être décalé car l'angle initial est de 0 radian. Ainsi, l'angle de phase du convertisseur en mode dégradé est ajusté à  $2\pi/3$  radian.

Dans les dernières sections, des simulations et des expérimentations sont effectuées pour prouver les performances de la méthode de diagnostic et des stratégies de contrôle tolérantes aux défauts proposées à l'identification de l'interrupteur de puissance défectueux et à l'amélioration du fonctionnement du système.

## 4. RÉSULTATS DE SIMULATION

En partant du fonctionnement sain illustré sur la figure 4, cette section montre les avantages de la modification de l'angle de déphasage et de la compensation du courant de sortie  $i_{ch}$ . Pour une meilleure compréhension, l'effet de la modification de l'angle de déphasage et de la compensation sont d'abord présentés séparément. Ensuite, une simulation adoptant les deux techniques est montrée pour confirmer la complémentarité des deux solutions.

Les courants traversant les quatre inductances ( $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$ ,  $i_{L4}$ ) et le courant de sortie  $i_{ch}$ , en adoptant la technique de modification de l'angle de déphasage uniquement, sont donnés sur la figure 8. Par rapport aux résultats de la figure 5 (mode de fonctionnement dégradé sans correction de la commande), la minimisation de l'ondulation du courant de sortie peut être observée.

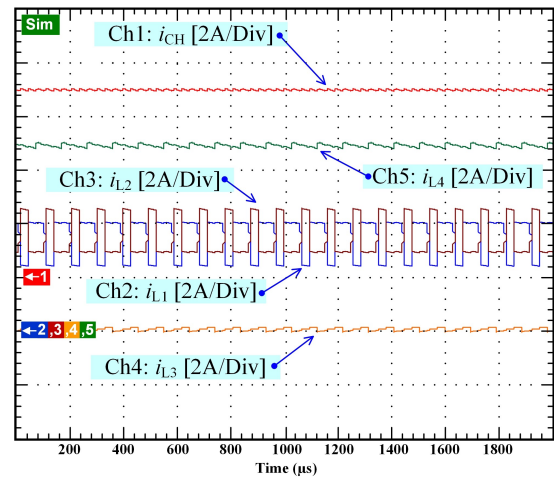


Fig. 8. Résultats de simulation : modification de l'angle de déphasage uniquement.

En adoptant uniquement la technique de compensation, comme le montre la figure 9. On peut remarquer que la technique de compensation est capable de restaurer la valeur d'origine du courant de sortie  $i_{ch}$ , ce qui signifie que l'hydrogène produit est inchangé. Cependant, une ondulation de courant peut être remarquée. Comme expliqué ci-dessus, l'ondulation de courant doit être minimisée.

Enfin, les effets de la modification de l'angle de déphasage et de la compensation sont représentés sur la figure 10 où le courant et son ondulation ont été repris comme en mode sain.

Concernant la phase transitoire entre le mode sain et le mode dégradé, comme le montre la figure 11, on peut remarquer qu'après 6 ms le convertisseur peut fonctionner comme avant défaut. La constante de temps est due principalement à la capacité de sortie  $C_{bus}$ . C'est un intervalle de temps très réduit, dans lequel l'électrolyseur ne subit aucun dépassement.

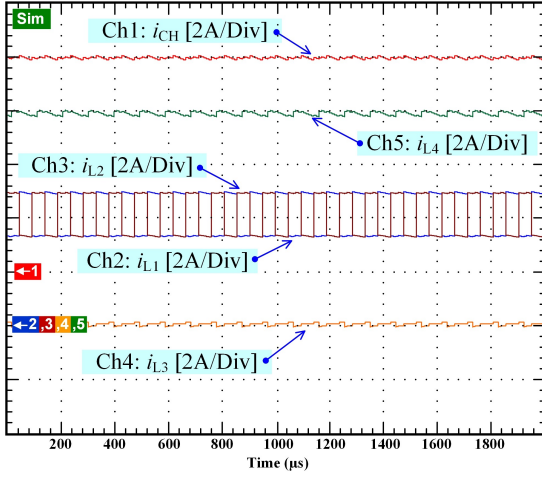


Fig. 9. Résultats de simulation : technique de compensation uniquement.

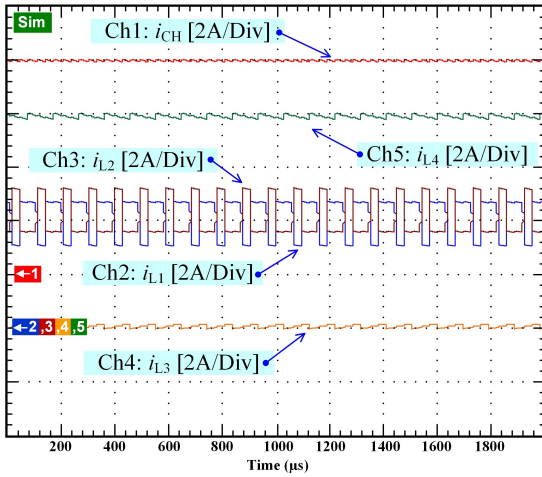


Fig. 10. Résultats de simulation : association de la modification de l'angle de déphasage et de la technique de compensation.

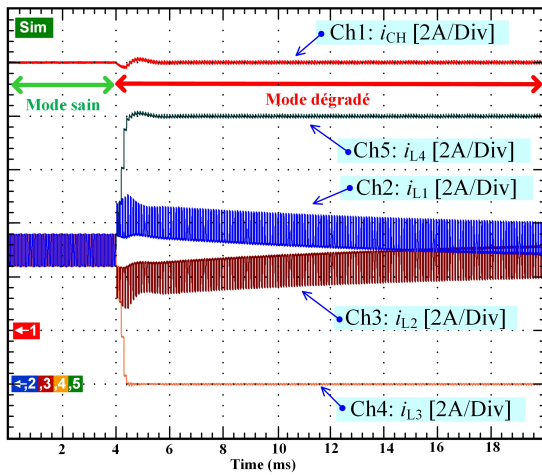


Fig. 11. Résultats de simulation : phase transitoire entre un mode sain et dégradé avec la modification de l'angle de déphasage et la compensation.

## 5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

### 5.1. Description du banc de test expérimental

Pour évaluer les performances de la méthode de diagnostic de défauts dans l'identification de l'interrupteur de puissance défectueux et des stratégies de contrôle tolérantes aux défauts, une plateforme expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire GREEN de l'IUT de Longwy, comme illustrée sur la figure 12. La plateforme comprend le convertisseur conçu (1) avec les spécifications techniques fournies dans la Section 2, une source d'alimentation DC (2), un système de prototypage rapide dSPACE MicroLabBox (3), un ordinateur avec le logiciel dSPACE Control Desk (4), un microcontrôleur C2000 (5), un émulateur d'électrolyseur PEM (à membrane échangeuse de protons) (6) et un oscilloscope à 8 voies (7). Pour la charge du système, un émulateur d'électrolyseur PEM décrit et conçu dans [22] a été employé dans ce travail de recherche. Cet émulateur permet de recréer le comportement statique et dynamique d'un véritable électrolyseur PEM grâce à l'utilisation d'un circuit électrique équivalent comme le montre la figure 13. De plus, il présente un faible coût et permet d'éviter l'utilisation d'un véritable électrolyseur PEM dont les performances pourraient être dégradés au cours d'expérimentations comme indiqué dans [19, 23].

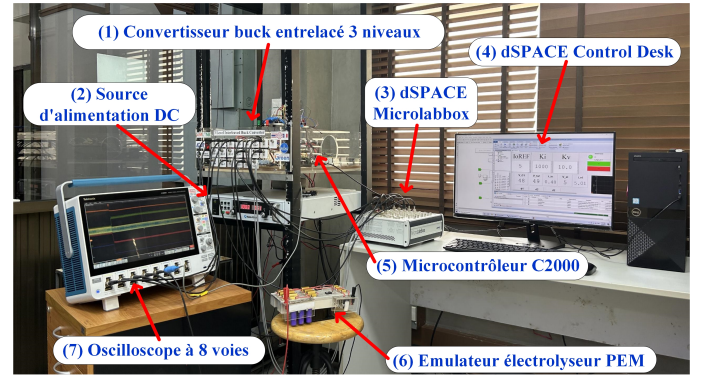


Fig. 12. Plateforme expérimentale développée pour tester la méthode de diagnostic et les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts.

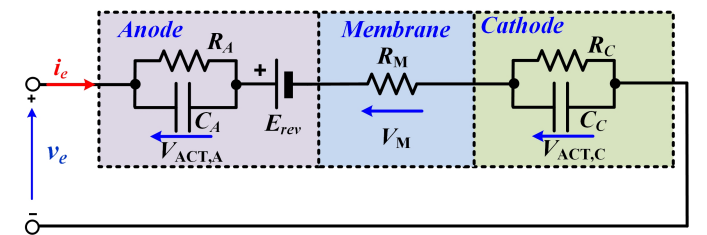


Fig. 13. Emulateur d'électrolyseur PEM basé sur un circuit électrique équivalent.

Le contrôleur basé sur du mode glissant modifié (illustré à la figure 3) conçu dans [21] pour contrôler le courant de sortie  $i_{ch}$  et équilibrer les deux condensateurs d'entrée  $C_1$  et  $C_2$  du convertisseur, a été implémenté dans le système de prototypage rapide dSPACE MicroLabbox via l'utilisation du logiciel Matlab/Simulink. La méthode de diagnostic de défauts proposée (présentée sur la figure 6) a été réalisée via un circuit analogique comprenant des amplificateurs opérationnels. En comparaison, les stratégies de contrôle tolérantes aux défauts ont été implémentées dans un microcontrôleur C2000. Le logiciel dSPACE Control Desk permet de surveiller, de superviser et d'enregistrer les expérimentations réalisées. Les capteurs de courant et de tension requis à des fins de contrôle et de diagnostic de défauts sont insérés dans le convertisseur. Les signaux de courant

et de tension acquis sont envoyés aux entrées du système de prototypage dSPACE Microlabbox.

## 5.2. Résultats expérimentaux obtenus

Après avoir effectué des simulations via le logiciel Matlab/Simulink, des tests expérimentaux ont été réalisés pour corroborer les résultats de simulation obtenus. D'ailleurs, les résultats expérimentaux permettent de conclure sur les performances de la méthode de diagnostic couplée aux stratégies de contrôle tolérantes aux défauts. Comme dans les simulations, un défaut de circuit ouvert sur l'interrupteur de puissance  $Q_3$  a été généré à 4 ms et le courant de sortie  $i_{ch}$  du convertisseur est réglé à 5 A. Les résultats expérimentaux obtenus sont donnés sur les figures 14, 15 et 16. Sur la figure 14 (en s'appuyant sur le schéma de l'algorithme de détection de défaut donné à la figure 6), la sortie "relais", la sortie "porte ET", la sortie "porte XOR" et la sortie  $\bar{Q}$  de la bascule RS sont représentées. Avant l'apparition du défaut, les sorties "porte ET" et "porte XOR" indiquent que le convertisseur fonctionne en mode sain comme mis en évidence sur la figure 6. Ensuite, après l'apparition du défaut à 400  $\mu s$ , l'absence des sorties "porte ET" et "porte XOR" soulignent que le convertisseur fonctionne en mode dégradé. Le défaut de circuit ouvert de l'interrupteur de puissance  $Q_3$  peut être détecté en une période de commutation, à savoir 100  $\mu s$ , comme indiqué dans la sortie  $\bar{Q}$  de la bascule RS. De plus, on peut remarquer que la reconfiguration de l'angle de déphasage entre les interrupteurs de puissance sains restants ( $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_4$ ) se produit à 200  $\mu s$  après l'apparition du défaut.

Sur les figures 15 et 16, les mêmes résultats expérimentaux du convertisseur sont présentés avec différentes échelles de temps pour souligner à la fois les fonctionnements en régime transitoire et en régime permanent après l'apparition du défaut sur  $Q_3$ . En s'appuyant sur les deux figures, on peut noter qu'après l'apparition du défaut et l'identification de l'interrupteur de puissance défectueux par l'algorithme de diagnostic de défauts, le convertisseur continue de fonctionner normalement et le courant de sortie  $i_{ch}$  est toujours réglé à 5 A. La phase transitoire du courant de sortie dure 3 ms avant d'atteindre sa valeur de référence. Le défaut sur  $Q_3$  est entièrement compensé par l'interrupteur de puissance  $Q_4$  situé dans la partie défectueuse (partie inférieure du convertisseur), tandis que les interrupteurs de puissance  $Q_1$  et  $Q_2$  ne sont pas affectés par le défaut sur  $Q_3$  comme observé sur la figure 15. On peut également voir que l'ondulation du courant de sortie  $i_{ch}$  en mode de fonctionnement dégradé est plus faible qu'en mode de fonctionnement sain en raison de la reconfiguration de l'angle de déphasage entre les interrupteurs de puissance restants. Ainsi, le convertisseur continue d'alimenter l'électrolyseur avec une très faible ondulation de courant à haute fréquence de découpage contribuant à sa fiabilité en gardant des performances optimales [19].

## 6. CONCLUSION

La conception d'un convertisseur de puissance pour alimenter des électrolyseurs doit comporter comme contrainte, la caractéristique d'optimiser les performances après défaut pour maintenir la production d'hydrogène. La topologie de convertisseur proposée répond à cette exigence. Il est basé sur un convertisseur abaisseur entrelacé à trois niveaux et sur une architecture appropriée qui est capable de détecter un défaut sur un interrupteur de puissance et de le compenser en assurant le même courant de charge et la même ondulation qu'avant l'apparition d'un défaut.

Les performances du convertisseur proposé ont été vérifiées par simulation et expérimentalement sur un cas pratique d'un convertisseur alimentant un émulateur d'électrolyseur, permettant de remplacer un électrolyseur physique qui pourrait être endommagé au cours d'expérimentations. Un défaut sur un interrupteur de puissance est détecté par un algorithme de détection de défauts adapté dans un intervalle de temps très court

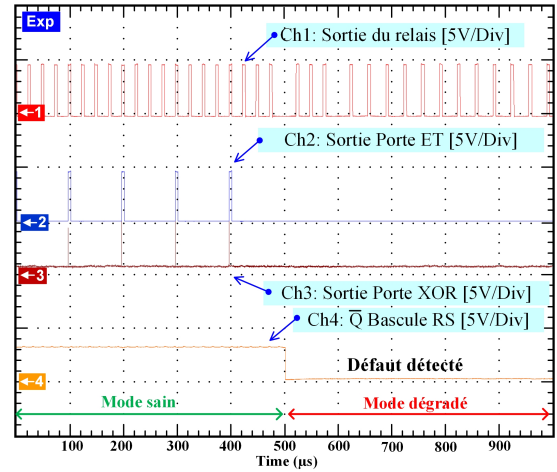


Fig. 14. Résultats expérimentaux obtenus : sorties de l'algorithme de détection de défauts.

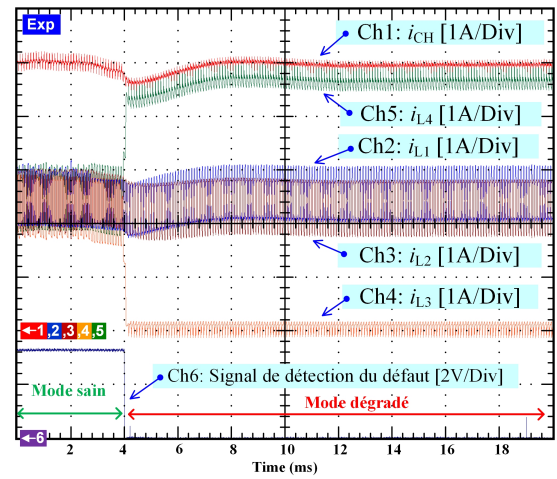


Fig. 15. Résultats expérimentaux obtenus : phase transitoire après détection du défaut et modification de l'angle de déphasage.

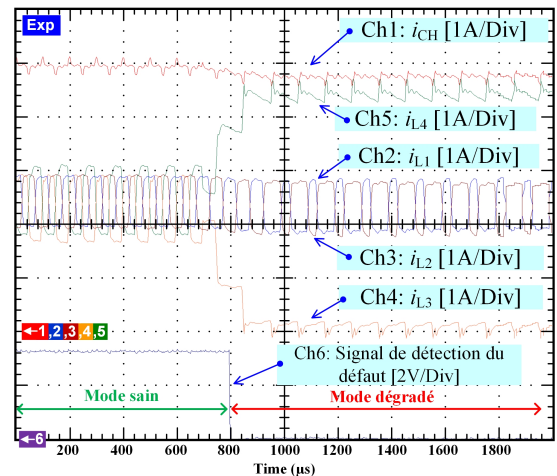


Fig. 16. Résultats expérimentaux obtenus : zoom pour observer la phase transitoire entre le mode sain et dégradé.

(une période de commutation, 100  $\mu s$ ). Ensuite, une stratégie de contrôle tolérante aux défauts est appliquée pour adapter l'angle de déphasage entre les interrupteurs de puissance restants et le rapport cyclique de sorte que le fonctionnement d'origine soit

restauré à la fois en termes de courant de charge et d'ondulation. La composante continue du courant délivré par le convertisseur ne présente pas de variation significative après la détection de défaut et la reconfiguration des angles de déphasage, restant égale à 5 A dans notre cas d'étude, et son ondulation superposée passe de 0,1021 A à 0,1123 A crête à crête. De là, l'électrolyseur est toujours protégé contre les conséquences des défauts et aucun dépassement ne se produit.

## 7. RÉFÉRENCES

- [1] M. Yue et al., « Hydrogen energy systems : A critical review of technologies, applications, trends and challenges », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 146, 111180, 2021.
- [2] Y. Pleshivtseva et al., « Comprehensive review of low carbon hydrogen projects towards the decarbonization pathway », *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
- [3] B. Yodwong et al., « AC-DC Converters for Electrolyzer Applications : State of the Art and Future Challenges », *Electronics*, vol. 9, 912, 2020.
- [4] S. Peyghami, P. Palensky, F. Blaabjerg, « An overview on the reliability of modern power electronic based Power Systems », *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 1, pp. 34-50, 2020.
- [5] F. Bento, A.J. Cardoso, « A comprehensive survey on fault diagnosis and fault tolerance of DC-DC converters », *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, pp. 1-12, 2018.
- [6] E. Jamshidpour, P. Poure, S. Saadate, « Common Switch Fault Diagnosis for Two-Stage DC-DC Converters Used in Energy Harvesting Applications », *Electronics*, vol. 8, 293, 2019.
- [7] S. Zhuo et al., « An observer-based switch open-circuit fault diagnosis of DC-DC converter for Fuel Cell Application », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, pp. 3159-3167, 2020.
- [8] Z. Liu, Z. Xu, X. Zhang, « A novel real-time fast fault-tolerance diagnosis and fault adjustment strategy for M-phase interleaved boost converter », *IEEE Access*, vol. 9, pp. 11776-11786, 2021.
- [9] C. Li et al., « A robust open-circuit fault diagnosis method for three-phase interleaved boost converter », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, pp. 11187-11198, 2022.
- [10] F. Bento, A.J. Cardoso, « Open-circuit fault diagnosis and fault tolerant operation of interleaved DC-DC boost converters for homes and offices », *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, pp. 4855-4864, 2019.
- [11] N. Wassinger et al., « Open-circuit fault identification method for interleaved converters based on time-domain analysis of the state observer residual », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 3740-3749, 2019.
- [12] L. Xu et al., « Open-circuit switch fault diagnosis and fault-tolerant control for output-series interleaved boost DC-DC converter », *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, pp. 2054-2066, 2021.
- [13] S. Zhuo et al., « Robust open-circuit fault diagnosis of multi-phase floating interleaved DC-DC boost converter based on Sliding mode observer », *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, pp. 638-649, 2019.
- [14] X. Guo et al., « A new multi-mode fault-tolerant operation control strategy of multiphase stacked interleaved buck converter for Green Hydrogen production », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, pp. 30359-30370, 2022.
- [15] S.A. Gorji, « Reconfigurable Quadratic Converters for Electrolyzers Utilized in DC Microgrids », *IEEE Access*, vol. 10, pp. 109677-109687, 2022.
- [16] D. Concha et al., « Evaluation of DCX Converters for Off-Grid Photovoltaic-Based Green Hydrogen Production », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 38, pp. 19861-19870, 2021.
- [17] C. Zhang et al., « A DC/DC Converter for Electrolytic Hydrogen Production Based on DC Microgrid », in : *Proceedings of the 2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, pp. 1348-1353, 2022.
- [18] H.P.C. Buitendach et al., « Effect of a Ripple Current on the Efficiency of a PEM Electrolyser », *Results in Engineering*, vol. 10, 100216, 2021.
- [19] F. Parache et al., « Impact of Power Converter Current Ripple on the Degradation of PEM Electrolyzer Performances », *Membranes*, vol. 12, no. 2, 109, 2022.
- [20] D. Guilbert, G. Vitale, « Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model », *Energies*, vol. 12, no. 4, 750, 2019.
- [21] B. Yodwong et al., « Modified Sliding Mode-Based Control of a Three-Level Interleaved DC-DC Buck Converter for Proton Exchange Membrane Water Electrolysis », in : *Proceedings of the 2021 Research, Invention, and Innovation Congress : Innovation Electricals and Electronics (RI2C)*, pp. 221-226, 2021.
- [22] B. Yodwong et al., « Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications », *Processes*, vol. 9, no. 3, 498, 2021.
- [23] G. Papakonstantinou et al., « Degradation Study of a Proton Exchange Membrane Water Electrolyzer under Dynamic Operation Conditions », *Applied Energy*, vol. 280, 115911, 2020.