



# CONTRIBUTION À LA RÉCONFIGURATION D'ONDULEUR À TOLÉRANCE DE PANNE APPLIQUÉE AU PARC ÉOLIEN CONNECTÉ AU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

OMAR FETHI BENAOUA<sup>1,2</sup>, AZZEDINE BENDIABDELLAH<sup>2</sup>, KAHLA SAMI<sup>1</sup>

**Mots clés:** Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), Turbine, Onduleur, Diagnostic, Détection, Localisation, Reconfiguration, Défaut, Circuit- ouvert, Insulated gate bipolar transistor (IGBT).

Cet article propose une nouvelle technique de diagnostic basée sur les vecteurs de Park associés aux coordonnées polaires pour la détection et la localisation des défauts de circuit- ouvert (CO), ainsi que l'intégration de l'onduleur reconfigurable à tolérance de panne afin de permettre la continuité de service du système du parc éolien. Le modèle utilisé est celui d'une éolienne à vitesse variable couplée à une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) connecté au réseau électrique via un convertisseur à tolérance de panne pour améliorer les performances après l'apparition du défaut. Ce convertisseur est utilisé à base d'IGBT pour l'obtention d'une précision acceptable avec des fréquences de commutation élevées. Ce modèle est bien adapté pour l'observation des harmoniques et la performance dynamique du système de contrôle sur des périodes de temps relativement courtes (généralement des centaines de millisecondes à une seconde). Cette méthode permet d'extraire l'énergie maximale du vent lors d'une faible vitesse du vent en optimisant la vitesse de la turbine tout en minimisant les contraintes mécaniques sur la turbine pendant les rafales de vent. Pour illustrer l'amélioration de diagnostic des défauts en circuit ouvert du convertisseur à tolérance de panne, plusieurs résultats sont présentés et discutés dans cet article.

## SYMBOLES:

$v, v_s, v_t$	Vitesse du vent, totale, moyenne et turbulente [m/s].
$d, q$	Variables exprimées dans le repère (d,q)
$b_1, b_2$	Extrémités de la bande de seuil.
$B$	Bande de seuil.
$M_\mu$	Module de la valeur moyenne.
$S_{11}$	Interrupteur supérieur du premier bras.
$\theta_\mu$	Argument de la valeur moyenne.
$\mu_x$	Valeur moyenne du courant, $x \in (1, 2)$ .

## 1. INTRODUCTION

Les influences négatives des combustibles fossiles ont forcé les scientifiques à attirer l'attention sur des sources d'énergie qui sont à la fois propres et renouvelables, parmi ces sources, l'énergie éolienne a été prise en considération [1]. Le marché mondial des sources d'énergie renouvelables, y compris l'énergie éolienne, gagne du terrain rapidement, en particulier au cours des deux dernières décennies. La turbine a une source de puissance sans carburant et ne cause pas de quantité inépuisable de pollution pendant la production d'électricité. En outre, ce système peut à la fois produire de l'énergie éolienne proche des centres de charge et éliminer une perte de transmission dans les lignes dans les paysages urbains et ruraux [2]. L'énergie est une activité puissante et clé pour le développement technico-industriel et socio-économique pour tous les pays en développement pour subvenir à leur besoin de subsistance [3]. L'énergie éolienne est considérée aujourd'hui pour sa rentabilité énergétique et les progrès permettent de concurrencer la technologie de production de l'énergie conventionnelle.

Récemment, de nombreux nouveaux parcs éoliens ont utilisés des éoliennes à base de générateurs asynchrone à double alimentation (GADA) [4], en raison de leur capacité de commande de puissance, de leur fonctionnement à vitesse variable, de leur faible coût de convertisseur et de leur perte de puissance réduite [5, 6]. Cependant, la GADA constitue un problème de contrôle difficile, en raison de sa dynamique rapide et d'un système multi-variable hautement couplé et non linéaire.

Dans la plupart des applications du parc éolien, les onduleurs de tension sont utilisés afin d'alimenter les réseaux électriques. Ces onduleurs utilisent des commutateurs de puissance basés sur les transistors bipolaires à portes isolées (IGBT) à cause de leur commutation rapide, de leur efficacité élevée et de leur capacité à gérer les courants de court-circuit pendant des périodes dépassant 10  $\mu$ s. Le nombre de semi-conducteurs IGBT requis pour la réalisation de l'onduleur en trois phases est élevé et peut entraîner à une probable occurrence des défauts [7].

Dans les systèmes électriques contenant un onduleur, la plupart des défauts sont produits soit dans l'onduleur ou au niveau de son contrôle. Dans l'onduleur, les défauts les plus critiques et les plus fréquents sont de toute façon liés au contrôle des interrupteurs [8]. Par conséquent, la fiabilité est une question importante, qui se rapporte à l'électronique de puissance. On peut dire que le composant semi-conducteur physique peut montrer généralement des défauts critiques [9].

Actuellement, l'attention d'un grand nombre de chercheurs se concentre au comportement de l'onduleur lors de l'apparition d'un défaut au niveau du semi-conducteur de puissance ou d'un défaut de contrôle [10, 11].

<sup>1</sup> Research Center in Industrial Technologies CRTI, P.O.Box 64, Cheraga 16014, Algiers, Algeria [o.benaouda@crti.dz](mailto:o.benaouda@crti.dz)

<sup>2</sup> Diagnostic Group, LDEE laboratory, Electrical Engineering faculty University of Sciences and Technology of Oran MB ,BP 1505 El-Mnaouer Oran 31000, Algeria, [Benaouda.omar@gmail.com](mailto:Benaouda.omar@gmail.com).

Dans le système de parc éolien, les deux sous-systèmes de convertisseurs (onduleur ou redresseur), sont souvent les plus sensibles aux défauts selon leur point de fiabilité, d'où la détection et la localisation des défauts sont les plus efficaces. Ainsi, l'amélioration de la fiabilité et l'assurance de maintenance planifiée ont souvent besoin des méthodes de diagnostic. Elles peuvent être classées de manière générale comme défauts de circuit-ouvert ou défauts de court-circuit [12]. Au cours de la dernière décennie, certaines méthodes de diagnostic de défaut de circuit-ouvert dans les deux convertisseurs (ac/dc) ou (dc/ac) ont été développées par Mendes, Abramik, Peugeot et d'autres [13, 14]. La plupart de ces méthodes de diagnostic de défaut dans les onduleurs ont été examinées par Bin Lu [15, 16]. Par ailleurs, il est remarqué qu'il est difficile d'appliquer les méthodes de diagnostic utilisées pour l'ensemble de système de parc éolien sous le défaut d'ouverture au niveau des interrupteurs de l'IGBT, surtout si elles sont appliquées sur les longues distances après la défaillance de l'onduleur.

La continuité opérationnelle après le défaut répond aux exigences des chercheurs afin de permettre l'instauration de la notion de tolérance de panne. La tolérance de panne permet au système défaillant de maintenir sa performance acceptable après le défaut à travers le changement de sa structure et/ou du contrôle du convertisseur [17]. Il y a plusieurs types de topologies de reconfiguration du convertisseur [18], soit :

- En isolant le bras défaillant, les deux autres bras restants en fonctionnement tout en tenant compte du changement de contrôle.
- En ajoutant un quatrième bras secours redondant, le fonctionnement se fera alors avec trois bras.
- En plaçant un quatrième bras supplémentaire connecté au neutre de la machine.

En appliquant ces dernières reconfigurations, l'ajout de certains dispositifs à topologie fondamentale est nécessaire [15, 19].

Cet article propose une nouvelle méthode de diagnostic pour le défaut de circuit-ouvert au niveau de l'IGBT dans un onduleur triphasé.

En premier lieu, une modélisation de système globale inclue une partie aérodynamique, mécanique et électrique connecté au réseau électrique à trois jeux de barre. Cet ensemble est sans défaut d'ouverture (CO) des interrupteurs de l'IGBT.

En second lieu, la création de défauts d'ouverture des interrupteurs de l'IGBT est indiquée dans l'onduleur avec l'impact des défauts sur le système. Par la suite, en appliquant des méthodes de diagnostic des défauts modifiés à base des vecteurs de Park et des coordonnées polaires pour détecter et localiser les défauts. En troisième lieu, l'intégration de l'onduleur triphasé à tolérance de panne dans le système de parc éolien pour assurer la continuité de service. Enfin, l'impact des défauts de circuit-ouvert sur l'ensemble de système est étudié.

## 2. MODÉLISATION DU SYSTÈME

Figure 1 montre le diagramme en ligne unique du système utilisé. Ce modèle de réseau se compose d'un point tension de source de 120 kV, 50 Hz, alimentant respectivement le système de distribution de 25 kV grâce à un transformateur

élévateur 47 MVA à 120/25 kV, puis le système de 575 V à travers un transformateur abaisseur de 25 kV/575 V et 12.5 MVA sur une ligne de transport nominale de 30 km, 25 kV. Le parc éolien basé sur la GADA se compose de cinq éoliennes chacune avec 2 MW connectées au bus 575 V.

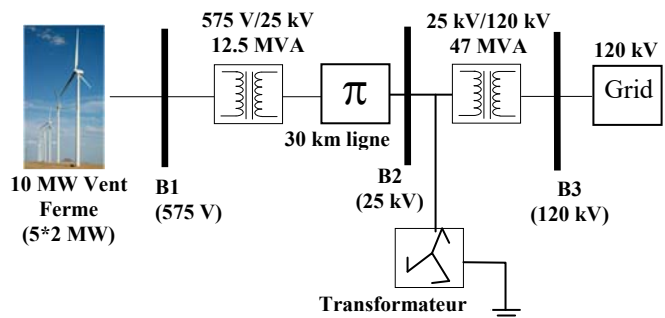


Fig.1 – Système proposé.

## 3. MODÈLE DE VITESSE DU VENT

La dynamique du vent résulte de la combinaison de conditions météorologiques avec des caractéristiques particulières d'un site de vent donné. Ainsi, la vitesse du vent est modélisée dans la littérature comme un processus aléatoire non stationnaire, [20]:

$$V(t) = V_s(t) + V_t(t) \quad (1)$$

$V_s(t)$  et  $V_t(t)$  représentent les composantes de basse fréquence et turbulence respectivement. les deux mêmes composantes peuvent également être identifiées dans le modèle de grande bande de Van der Hoven (Fig.2). La pause spectrale d'environ 0,5 mHz permet de modéliser la composante de turbulence comme un processus aléatoire moyen nul,  $S(f)$  est la densité spectrale de puissance de la vitesse du vent  $v(t)$ .

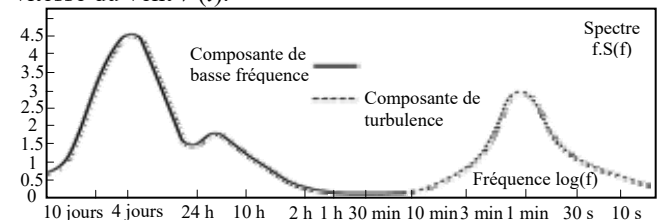


Fig. 2– Le modèle spectral de Van der Hoven de la vitesse du vent.

La vitesse du vent peut être synthétisée grâce au moyen du diagramme Fig. 3, où le signal d'entrée est un bruit blanc Gaussien de variance unitaire moyenne zéro. La valeur  $V_0$  est une moyenne quotidienne de la vitesse du vent et est constante pendant un temps de simulation.

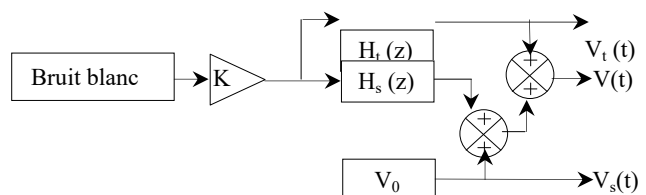


Fig. 3– Schéma simplifié pour la synthèse de la vitesse du vent.

Figure 3 montre le schéma simplifié pour la synthèse de la vitesse du vent, d'où  $H_s$  et  $H_t$  sont les filtres de mise en forme de premier ordre de la synthèse de la vitesse du vent.

$$H_t(z) = \frac{2.439}{z-0.95} \quad H_s(z) = \frac{0.75}{z-1} \quad (2)$$

Figure 4 présente l'évolution de la vitesse du vent non stationnaire en (m/s), calculée avec la procédure présentée ci-dessus.

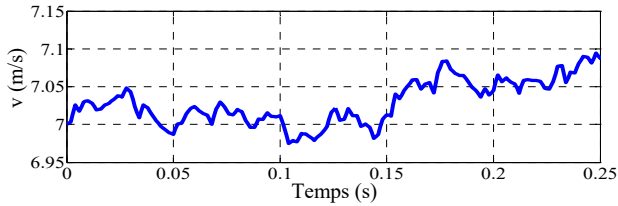


Fig. 4– Vitesse du vent non stationnaire.

#### 4. PARC ÉOLIEN SOUS DÉFAUT DE L'OUVERTURE D'INTERRUPTEUR

##### 4.1 DÉFAULT DE CIRCUIT OUVERT DE L'IGBT DE L'ONDULEUR

Dans ce cas, un type de défaut de circuit-ouvert au niveau de l'interrupteur  $S_{11}$  dans l'onduleur à deux niveaux est créé à  $t=0.1$  s, voir Fig. 5, afin d'étudier le comportement de fonctionnement du parc éolien.

##### 4.2 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans ce cas, les résultats de simulation de réponse dynamique de parc éolien avant et après le défaut de circuit-ouvert sont présentés dans la Fig. 6. Le but de cette création de défaut est d'étudier l'influence de défaillance de convertisseur sur le système de parc éolien.

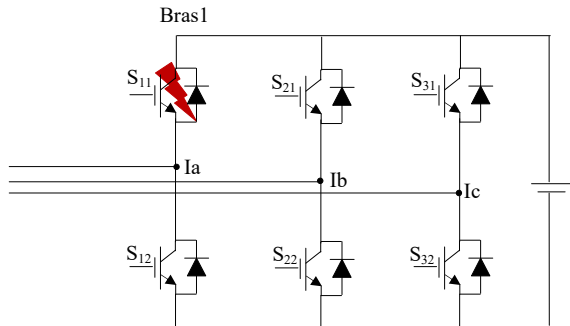


Fig.5 – Onduleur à deux niveaux sous défaut de l'ouverture d'interrupteur.

Il est à noter que la tension de jeu de barre  $V_{B3}$  avant et après le défaut est stable à sa valeur de référence, on peut dire que la défaillance n'affecte pas la tension  $V_{B3}$  de ce système.

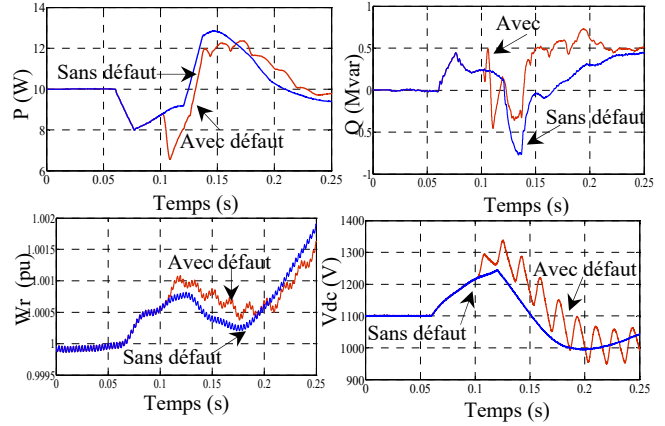
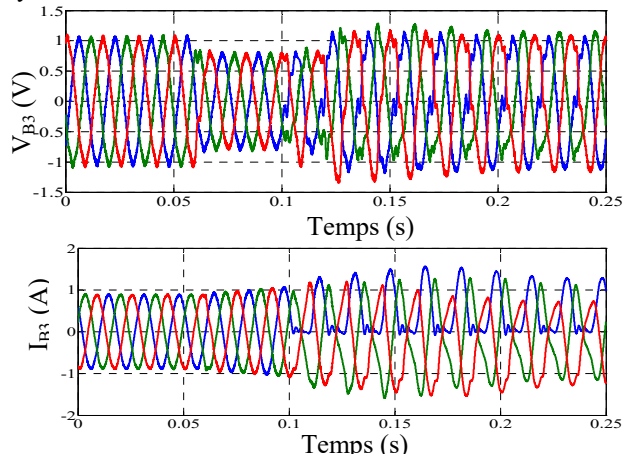


Fig.6 – Formes des ondes ( $V_{B3}$ ,  $I_{B3}$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $\omega_r$ ,  $V_{dc}$ ) du parc éolien selon le changement de tension du système avec un défaut de circuit-ouvert à l'instant 0.1 s.

Après le défaut, des fluctuations apparaissent sur le courant primaire  $I_{B3}$ . En conséquence, l'onduleur défaillant a généré des harmoniques affectant le fonctionnement du réseau électrique. Le parc éolien a généré une puissance active instable, après l'instant 0.1 s, puis commence à chuter comparativement à la puissance active  $P$  sans défaut. Après le défaut, la puissance réactive  $Q$  oscille et augmente avec des fluctuations. Après cet instant, la tension continue  $V_{dc}$  prend une forte valeur de 160 V. La vitesse rotative  $\omega_r$  diminue et augmente légèrement. Il est donc difficile de déterminer le défaut sous ces conditions, c'est pourquoi on a désespérément besoin de nouvelles approches de diagnostic pour pouvoir détecter les défauts de circuit-ouvert existants dans les convertisseurs de ces systèmes. Ceci fera l'objet de la section suivante.

#### 5. DÉTECTION DE DÉFAUT PAR LA VALEUR MOYENNE DES VECTEURS DE PARK

La méthode des vecteurs de Park [21] compte sur l'avantage d'une valeur moyenne des courants dans les axes d-q au cours d'un cycle. Les deux courants d-q peuvent être transformés à partir des trois courants de phase par la transformation de Park voir l'équation (3). Ensuite, les valeurs moyennes dans les courants d-q pendant un cycle sont calculées par l'équation (4), où l'amplitude et l'argument sont calculés. L'équation (6) exprime les deux valeurs moyennes obtenues.

$$i_d = \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}(i_b + i_c), \quad i_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c), \quad (3)$$

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_x(k\tau), \quad (4)$$

$$\mu = \mu_d + j\mu_q = M_\mu \angle \theta_\mu, \quad (5)$$

$$M_\mu = \sqrt{\mu_d^2 + \mu_q^2}, \quad \theta_\mu = \tan^{-1} \frac{\mu_q}{\mu_d}. \quad (6)$$

Dans ce cas, on applique la méthode des vecteurs de Park de la valeur moyenne  $\mu$  aux courants de l'onduleur. Un défaut de circuit-ouvert dans un interrupteur de l'IGBT peut produire des fluctuations dans les courants de réseau électrique. Bien sûr cette méthode de diagnostic est basée sur le calcul des valeurs moyennes de ces courants [22]. À

partir de ces valeurs et pour détecter le défaut de circuit-ouvert, on propose la méthode de bande de seuil [7].

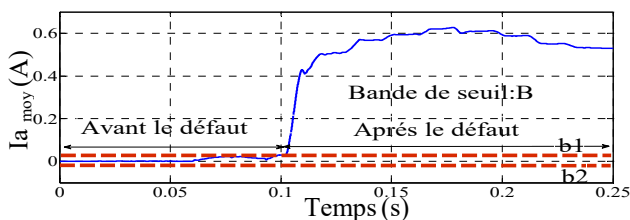


Fig. 7– Résultat de simulation de valeur moyenne du courant du premier bras de l'onduleur avec la bande de seuil sous défaut de circuit-ouvert au niveau de l'interrupteur de l'IGBT  $S_{11}$ .

Tableau 1 et Fig. 7 indiquent le défaut de circuit-ouvert des interrupteurs de l'IGBT par une bande de seuil de courant B d'où  $b_1 < B < b_2$  est définie par le dépassement de la condition nominale. Le Tableau 1 combine les caractéristiques des différents défauts des IGBT de l'onduleur selon l'extrémité de la valeur moyenne de courants de trois bras d'onduleur à deux niveaux.

Tableau 1

Caractéristique des différents défauts de circuit-ouvert de l'interrupteur de l'IGBT de l'onduleur

Etats	Bras1	Bras2	Bras3
Sain	$b_2 \leq I_{a(moy)} \leq b_1$	$b_2 \leq I_{b(moy)} \leq b_1$	$b_2 \leq I_{c(moy)} \leq b_1$
$S_{11}$ ouvert	$B < I_{a(moy)} < I_{seuil}$	$I_{b(moy)} < B$	$I_{c(moy)} < B$
$S_{12}$ ouvert	$-I_{seuil} < I_{a(moy)} < B$	$I_{b(moy)} > B$	$I_{c(moy)} > B$
$S_{21}$ ouvert	$I_{a(moy)} > B$	$-I_{seuil} < I_{b(moy)} < B$	$I_{c(moy)} > B$
$S_{22}$ ouvert	$I_{a(moy)} < B$	$B < I_{b(moy)} < I_{seuil}$	$I_{c(moy)} > B$
$S_{31}$ ouvert	$I_{a(moy)} > B$	$I_{b(moy)} > B$	$-I_{seuil} < I_{c(moy)} < B$
$S_{32}$ ouvert	$I_{a(moy)} < B$	$I_{b(moy)} < B$	$B < I_{c(moy)} < I_{seuil}$

### 6. LOCALISATION DU DÉFAUT PAR LA VALEUR MOYENNE DES VECTEURS DE PARK

D'abord, nous appliquons la technique des coordonnées polaires afin de calculer l'angle de défaut  $\theta_\mu$  sur l'onduleur à deux niveaux sous fonctionnement sain comme le montre la Fig. 8. Nous notons qu'aucun défaut n'est observé d'après la représentation graphique des coordonnées polaires de l'angle du défaut qui prend une forme rotationnelle et instable.

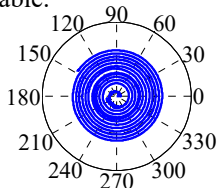


Fig.8 – L'angle du défaut  $\theta_\mu$  avant le défaut dans les coordonnées polaires sous l'influence de la tension de source (chute de tension).

Tableau 2

Localisation de défauts de circuit-ouvert avec des intervalles correspondants de l'angle du défaut sous la chute de tension.

Circuit ouvert		$I_{a,b,c(moy)}$	Intervalle de $\theta_\mu$
Chute de tension	B3	$S_{11}$	$210 < \theta_\mu < 270$
		$S_{12}$	$30 < \theta_\mu < 90$
		$S_{21}$	$330 < \theta_\mu < 30$
		$S_{22}$	$150 < \theta_\mu < 180$
		$S_{31}$	$90 < \theta_\mu < 120$
		$S_{32}$	$270 < \theta_\mu < 300$

En créant un défaut de circuit-ouvert à l'instant 0,1 s, les angles de défaut sont montrés dans le Tableau 2, obtenus d'après la méthode de diagnostic par la technique des coordonnées de polaire de la Fig. 9.

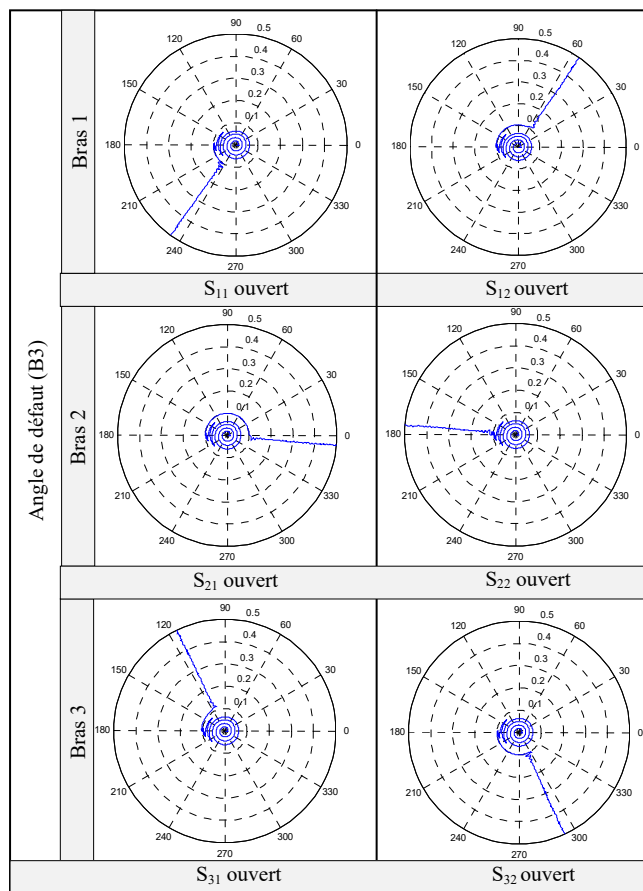


Fig. 9 – Représentation graphique des coordonnées polaires des différents interrupteurs défaillants des IGBT, sous fonctionnement de chute de tension de la source.

La topologie du circuit représentée sur la Fig. 10, peut tolérer les défauts des interrupteurs à circuit-ouvert et à court-circuit avec un comportement unique après défaut. Dans ce circuit, le quatrième bras est relié aux bras principaux à travers un ensemble de triacs ( $T_a$ ,  $T_b$  et  $T_c$ ). Sous le fonctionnement sans défaut, les triacs sont arrêtés, dans ce cas, le système est en état normal. Lors du processus après le défaut, les fusibles à action rapide isolent le bras défaillant, et la borne correspondante du jeu de barre B3 de réseau électrique est désormais reliée au point milieu du quatrième bras en allumant le triac associé du bras défaillant.

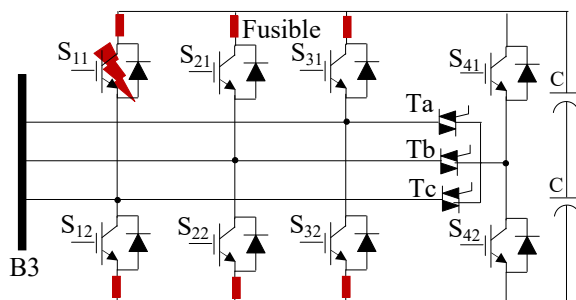


Fig. 10 – Reconfiguration de l'onduleur à deux niveaux.



## 7. CONTRÔLE DU PARC ÉOLIEN EN INTÉGRANT L'ONDULEUR TRIPHASÉ À TOLÉRANCE DE PANNES

Figure 11 représente le schéma général de l'onduleur à deux niveaux à tolérance de panne reconfigurable avec son bloc de diagnostic. Ce dernier système est lié aux blocs de détection et localisation du défaut ainsi qu'au bloc de décision afin d'envoyer les ordres de reconfiguration, en envoyant les signaux aux trois triacs.

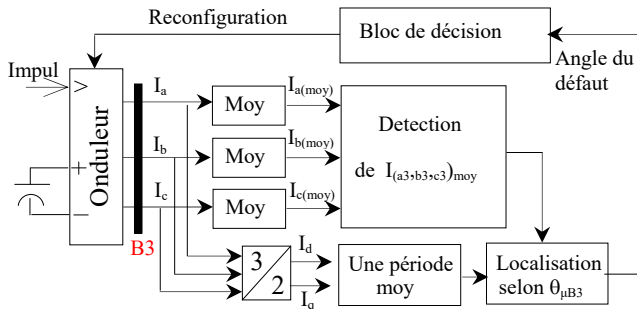


Fig. 11 – Schéma de contrôle de parc éolien à tolérance de panne d'onduleur à trois phases avec une capacité d'isolement.

Les blocs de détection du défaut dépendent des valeurs moyennes des trois courants ( $I_{(a,b,c)B3}$ ) selon leur repositionnement dans la bande de seuil, voir Fig. 7 et Tableau 1. Le bloc de localisation du défaut en fonction de  $\theta_{\mu B3}$  dépend des valeurs moyennes des courants ( $I_{dB3}, I_{qB3}$ ) comme montrées dans la Fig. 9. Le bloc de décision démarre immédiatement après la détection et la localisation du défaut

### 7.1. RÉSULTAT DE SIMULATION

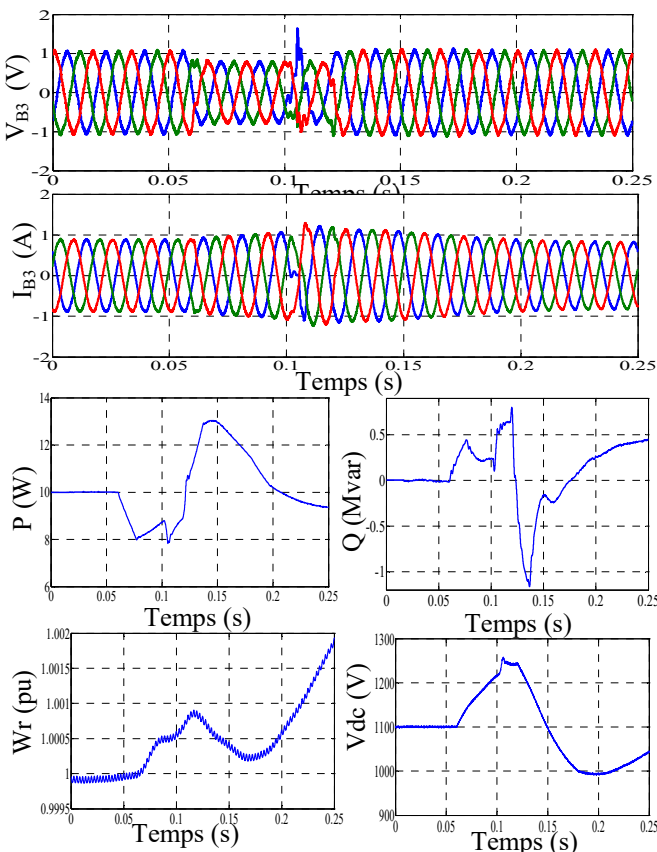


Fig.12 – Formes des ondes de ( $V_{B3}, I_{B3}, P, Q, \omega_r, V_{dc}$ ) du parc éolien à tolérance de panne selon le changement de tension du système avec un défaut de circuit-ouvert à l'instant 0.1 s.

L'objectif de cette partie est de savoir l'importance d'intégrer l'onduleur à tolérance de panne reconfigurable dans le parc éolien.

Pour cela, un défaut de circuit-ouvert dans l'instant 0.1 s est créé, et les résultats obtenus dans la Fig. 12, montrent l'avantage de cette intégration. Nous avons remarqué que la tension et le courant du troisième jeu de barre ( $V_{B3}, I_{B3}$ ) sont affectés. La tension  $V_{aB3}$  du bras défaillant atteint la valeur de 1.6 pu et le courant  $I_{aB3}$  oscille autour de 0 A jusqu'au rétablissement par la reconfiguration de l'onduleur à tolérance de panne.

Figure 13 montre les différents instants avant et après le défaut. Notez que les temps de détection, de localisation et de reconfiguration peuvent être définis comme indiqué dans la figure ci-dessous. Le temps pris par ces trois opérations est de 0.005 s, ce qui est assez suffisant pour assurer la continuité de service du système de parc éolien.

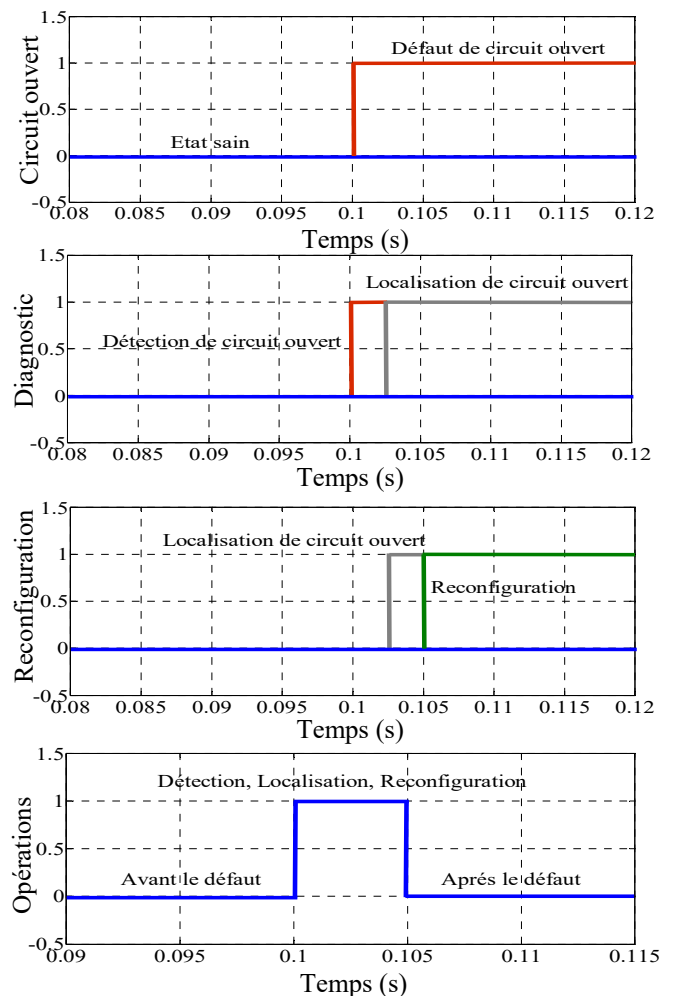


Fig. 13 – Chronologie de fonctionnement en sain, lors du défaut et le fonctionnement après le défaut du circuit-ouvert à l'interrupteur  $S_{11}$  de l'onduleur.

## 8. CONCLUSION

Les différents résultats sont obtenus en prouvant que les coordonnées polaires des angles des défauts sont affectés par les emplacements des transformateurs que ce soit élévateur ou abaisseur. Ils sont également affectés par la longueur du câble électrique ainsi que par le changement de la tension de source. Plusieurs résultats de simulation sont présentés pour montrer la durée du défaut et le fonctionnement après le défaut.

Ce qui peut être suggéré durant le diagnostic, est qu'il est possible de détecter et de localiser les défauts de circuit-ouvert de l'onduleur pour les longues distances. On contribue ainsi au profit du temps surtout si nous sommes loin du convertisseur défaillant, en plus des avantages de la tolérance de panne. Il est à noter qu'un court temps de 0,005 s lié aux trois tâches : la détection, la localisation et la reconfiguration, est réalisé en comparaison aux études précédentes [7]. Ce dernier est très suffisant pour assurer le bon diagnostic et la bonne continuité de service de l'ensemble du système du parc éolien.

Pour les perspectives futures, il est préférable d'essayer des applications de la méthode de diagnostic au redresseur à l'aide de l'IGBT.

Reçu le 26 septembre 2017.

## RÉFÉRENCES

1. B.Belabes, A.Youcefi, O.Guerri, M.Djamai, A.Kaabeche, *Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria*, *Renew Sustain Energy Rev.*, **51**, pp.1245–1255, (2015).
2. FethiAmri, *The relationship amongst energy consumption (renewable and non-renewable), and GDP in Algeria*, *Renew Sustain Energy Rev.*, **76**, pp. 62–71, (2017).
3. A.Beddar, H. Bouzekri, B. Babes, H. Afghoul, *Real time implementation of improved fractional order proportional-integral controller for grid connected wind energy conversion system*, *Rev. Roum. Sci. Tech. Ser. Électrotech. Énerg.*, **61**, *4*, pp. 402–407, (2016).
4. S. Kahla, Y. Soufi, M. Sedraoui, M.Bechouat, *On-Off control based particle swarm optimization for maximum power point tracking of wind turbine equipped by DFIG connected to the grid with energy storage*, *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, *39* pp. 13749–13758, (2015).
5. A. Izanlo, M. V. Kazemi, A. Gholamian, *A new method of predictive direct torque control for doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage*, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.*, **63**, *3*, pp. 332–337, (2018).
6. A. Azib, D. Ziane, T. Rekioua, A. Tounzi, *Robustness of the direct torque control of double star induction motor in fault condition*, *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.*, **61**, *1*, pp. 147–152, (2016).
7. O.F.Benaouda, A.Bendiabdellah, B. Cherif, *Contribution to Reconfigured Multi-Level Inverter Fed Double Stator Induction Machine DTC-SVM*, *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, **9**, *5*, pp.1–13, Sep 2016.
8. D. Zhou, J. Zhao, Y. Liu, *Independent Control Scheme for Nonredundant Two-Leg Fault-Tolerant Back-to-Back Converter-Fed Induction Motor Drives*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **63**, *11*, pp.6790 – 6800, (2016).
9. M.Ciappa, *Selected Failure Mechanisms of Modern Power Modules*, *Microelectronics Reliability*, **42**, *4-5*, pp. 653–667, (2002).
10. H. Djafar, H. Razik, A. Rezzoug, *On the Modeling and Design of Dual-Stator Windings to Minimize Circulating Harmonic Currents for VSI Fed AC Machines*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **40**, *2*, pp. 506–515, March./April, (2004).
11. I. Jlassi, J.O. Estima, S.Khojet El Khil, N. M. Bellaaj, A.J. M. Cardoso, *A robust observer-based method for IGBTs and current sensors fault diagnosis in voltage-source inverters of PMSM drives*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **35**, *3*, pp. 2894–2905, (2017).
12. F. W. Fuchs, *Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines-A survey*, *Proc. IEEE Ind. Conf.*, pp.1378–1385, (2003).
13. A. M. S. Mendes, A. J. M. Cardoso, *Fault diagnosis in a rectifier/inverter system used in variable speed ac drives, by the average current Park's vector approach*, *EPE'99*, 8 th European Conf. on Power Electronics and Applications. pp.1–9, (1999).
14. D.-E. Kim, D.-C. Lee, *Fault diagnosis of three-phase PWM inverters using wavelet and SVM*, *Journal of Power Electronics*, **9**, *3*, pp. 377–385, (2009).
15. B. Lu, S. K. Sharma, *A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **45**, *5*, pp.1770–1777, (2009).
16. B. Lu, S. K. Sharma, *A survey of IGBT fault diagnostic methods for three-phase power inverters*, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp.1-8, (2008).
17. Mavier J., Richardeau F., Piquet H., *Onduleur Reconfigurable, à Tolérance de Pannes, pour l'Alimentation d'un Moteur Triphasé Synchrone à Aimants Permanents, et Ensemble Desdits Onduleur et Moteur*, Aux noms de Airbus France SAS, Centre National de Recherche Scientifique, Institut National Polytechnique de Toulouse, FR 2 892 243 B, (2010).
18. L.Boulon, D.Hissel, A. Bouscayrol, O.Pape, M.-C. Péra, *Simulation Model of a Military HEV With a Highly Redundant Architecture*, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **59**, *6*, pp. 2654–2663, (2010).
19. D.-E. Kim, D.-C. Lee, *Fault diagnosis of three-phase PWM inverters using wavelet and SVM*, *Journal of Power Electronics*, **9**, *3*, pp. 377–385, (2009).
20. A. Mezidi, O. Guerri, S.M. Boudia, K.Mohammedi, *Influence of wind data temporal variation in wind resource assessment. Two case studies in the southern part of Algeria*, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **41**, pp. 1–15, (2019).
21. T. Shi, Y. He, F. Deng, J. Tong, T. Wang, L. Shi, *Online diagnostic method of open-switch faults in PWM voltage source rectifier based on instantaneous AC current distortion*, *IET Electric Power Applications*, **12**, *3*, pp. 447–454, (2018).
22. B.K. Bose, *Modern power electronics and AC drives*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, (2001).

# CONTRIBUTION TO RECONFIGURATION OF FAULT-TOLERANT INVERTER APPLIED TO THE WIND PARK CONNECTED TO THE ELECTRICAL NETWORK

OMAR FETHI BENAOUA, AZZEDINE BENDIABDELLAH, KAHLA SAMI

**Key words:** DFIG, Turbine, Inverter, Diagnosis, Detection, Location, Reconfiguration, Fault, Open-Circuit, IGBT

This paper proposes a new diagnostic technique based on Park vectors associated with polar coordinates for the detection and location of open circuit (OC) faults, as well as the integration of fault-tolerant reconfigurable inverter in order to enable continuity of service of the wind farm system. The model used is that of a variable speed wind turbine coupled to a double-fed induction generator (DFIG) connected to the power grid via a fault-tolerant converter to improve performance after the appearance of the fault. This converter is used based on IGBT to obtain an acceptable accuracy with high switching frequencies. This model is well suited for the observation of harmonics and the dynamic performance of the control system over relatively short periods of time (typically hundreds of milliseconds to one second). This method allows extracting the maximum wind energy during a low wind speed by optimizing the turbine speed while minimizing the mechanical stress on the turbine during gusts of wind. To illustrate the diagnostic improvement of fault-tolerant inverter open circuit faults, several results are presented and discussed in this article.