

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE  
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET  
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commandes Électriques

### THÈME

**Contrôle et Diagnostic des convertisseurs DC/AC à  
deux et trois niveaux dans une chaîne éolienne  
basée sur une GSAP connectée au réseau.**

Préparé par : GUADABI Ali et MEGHERBI Med Ilias

Devant le Jury :

Noms et prénoms	Grade	Qualité
S. LARIBI	MCA	Président
A.TAHRI	MCB	Examineur 1
M.KOURA	MCB	Examineur 2
M. LARBI	Pr	Encadrants
D. TOUMI	MCA	

PROMOTION 2023 / 2024

## ***Remerciements***

*Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers Allah pour m'avoir accordé le courage et la santé tout au long de ces années d'études, afin de mener à bien ce travail malgré tous les obstacles rencontrés.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude sincère envers Monsieur **LARBI M'hamed** pour son accueil en nous proposant ce sujet, pour son suivi constant et sa bonne orientation.*

*Nos remerciements vont également à Monsieur **TOUMI Djilali** pour son aide et ses conseils précieux*

*Nous tenons également à remercier tous les membres du jury d'avoir.*

## ***Dédicace***

*Nous dédions ce modeste travail à nos très chères familles, en premier lieu à nos chers parents, que dieu les protège pour leurs patiences, leurs Amours, leurs soutiens et leurs encouragements. A nos chères sœurs et frères. A tous nos amis et à ceux qui nous connaissent*

# Notations symboliques

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<i>MSAP</i>	Moteur Synchrone à Aimant Permanent.
<i>GSAP</i>	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent.
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point tracking.
<i>DC/AC</i>	Direct current / Alternative current.
<i>AC/DC</i>	Alternative current / Direct current.
<i>FTBO</i>	Fonction de transfert en boucle ouverte.
<i>FTBF</i>	Fonction de transfert en boucle fermée.
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistor.
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsions.
<i>PI</i>	Proportionnel Intégral.
<i>CCM</i>	Convertisseur côté machine
<i>CCR</i>	Convertisseur côté réseau.
<i>NPC</i>	Neutral Point Clamped.
<i>PLL</i>	Phased Locked Loop.
<i>ACPV</i>	Average Current Park's Vector.
<i>RNA</i>	Réseau de neurones artificiels.

# Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>
$V_v$	vitesse de vent en (m/s).
$P_v$	Puissance de l'éolienne en (W).
$\rho$	La masse volumique d'air en (Kg/m <sup>3</sup> ).
$S$	La surface utile traversée par le vent.
$R$	représente le Rayon de la voilure en (m).
$H$	représente hauteur de la voilure en (m).
$P_{Betz}$	Puissance maximale de l'éolienne.
$C_p$	Coefficient de puissance.
$C_{PBetz}$	Coefficient de puissance maximal théorique.
$\lambda$	Le coefficient de vitesse spécifique.
$\lambda_{opt}$	Vitesse relative optimale de l'éolienne
$R_v$	Longueur d'une pale de la turbine éolienne en (m).
$\Omega$	Vitesse angulaire de la turbine éolienne en (rad/sec).

$P_{\text{éol}}$	La puissance captée par la turbine éolienne en (W).
$J_{\text{tur}}$	Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.
$J_{\text{gé}}$	Le moment d'inertie de la génératrice.
$C_{\text{tur}}$	Couple de la turbine en (N.m).
$C_{\text{gé}}$	Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur en (N.m).
$\Omega_{\text{gé}}$	La vitesse de rotation de la génératrice en (rad/s).
$\Omega_{\text{tur}}$	La vitesse de rotation de l'éolienne.
$G$	Le gain du multiplicateur de vitesse.
$C_{\text{méc}}$	Le couple électromagnétique développé par la génératrice.
$f_v$	Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.
$C_f$	Le couple résistant dû aux frottements.
$f$	Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions statoriques en (V).
$\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$	Vecteur des flux traversant les bobines statoriques en (Wb).
$i_a, i_b, i_c$	Courants de phase statorique en (A).
$R_s$	Résistance d'une phase statorique en ( $\Omega$ ).
$\Phi_F$	Valeur crête du flux à vide à travers l'entrefer en (Wb).
$L_s$	L'inductance propre en (H).
$M_{s0}$	L'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques en (H).
$\theta$	La position angulaire du rotor par rapport au stator en (rad).
$C_{em}$	Le couple électromagnétique en (N.m).
$C_r$	Le couple résistant ou de charge en (N.m).
$C_f$	Couple de frottement visqueux en (N.m)
$[P(\theta)]$	La matrice de passage dans le repère de Park.
$[P(\theta)]^{-1}$	La matrice de passage inverse de Park.
$d$	L'axe direct dans le repère de Park.
$q$	L'axe quadratique dans le repère de Park.
$V_d, V_q$	Les Tension dans le repère de Park en (V).
$i_d, i_q$	Les courants dans le repère de Park en (A).
$\Phi_d, \Phi_q$	Les flux dans le repère de Park en (Wb).
$L_d, L_q$	L'inductance cyclique dans le repère de Park en (H).
$\omega$	La vitesse électrique de rotor en (rad/s).

$F_{KM}^b$	la fonction de connexion du demi-bras.
$p$	Nombre de pair de pôles.
$K_p$	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
$K_i$	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
$m$	L'indice de modulation.
$r$	Taux de modulation.
$F_p$	Fréquence de la porteuse en (Hz).
$F_r$	Fréquence du signal de référence en (Hz).
$V_{dc}$	Tension de bus continu en (V).
$V_{ref}$	Tension de référence en (V).
$C$	La capacité de condensateur de bus continu en (F).
$i_s$	Le courant du bus continu du coté générateur en (A).
$i_g$	Le courant du bus continu du coté réseau en (A).
$R_f, L_f$	La résistance et l'inductance du filtre.
$P_{em}$	La puissance électromagnétique injectée au réseau en (W).
$P_{dc}$	La puissance de condensateur en (W).
$P, Q$	Les puissances active et réactive débitées au réseau à travers le convertisseur.
$i_{xav}$	Courant moyenne en (A).
$K_x$	Interrupteur.

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale ..... 1

## Chapitre I : Commande d'une chaîne de conversion éolienne isolée

I.1 Introduction.....	3
I.2 Énergie éolienne .....	3
I.2.1 Principe d'une éolienne .....	3
I.2.2 Classification des éoliennes .....	4
I.3 Modélisation des éléments de la chaîne éolienne .....	4
I.3.1 Modélisation du vent .....	4
I.3.1.1 Puissance extraite du vent.....	4
I.3.1.2 Loi de Betz.....	5
I.3.1.3 Coefficient de vitesse spécifique .....	5
I.3.1.4 Coefficient de puissance $C_p$ .....	5
I.3.2 Modélisation de la partie mécanique .....	6
I.3.3 Modèle du multiplicateur.....	6
I.3.4 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	7
I.4 La technique de commande de la MPPT .....	7
I.4.1 Maximisation de puissance avec asservissement .....	7
I.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	8
I.5.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP .....	8
I.6 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé .....	8
I.6.1 Équations électriques .....	8
I.6.2 Equations magnétiques .....	9
I.7 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq.....	9
I.7.1 Transformation de Park.....	9
I.7.2 Equations électriques .....	10
I.7.3 Equations magnétiques .....	10
I.7.4 Équations mécaniques .....	11
I.7.5 Expression du couple électromagnétique .....	11
I.8 Modélisation des convertisseurs statiques .....	11
I.8.1 Onduleur 2 niveaux.....	12
I.8.2 Onduleur 3 niveaux.....	12
I.8.3 Commande MLI Sinus-Triangle à l'onduleur 2 et 3 niveaux .....	14
I.9 Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents .....	15
I.9.1 Modelé de la machine à commander .....	15
I.9.2 Découplage par compensation : .....	16
I.9.3 Calcul des régulateurs de courant .....	17
I.9.4 Calcul du Régulateur de vitesse.....	18
I.10 Résultats de simulation et interprétation.....	18
I.10.1 Résultats de simulation .....	19
I.10.2 Résultats d'onduleur deux et trois niveaux.....	20
I.10.3 Interprétation.....	23
I.11 Conclusion .....	24

## **Chapitre II : Commande d'une chaîne éolienne connectée au réseau**

II.1 Introduction .....	27
II.2 Modélisation des éléments du réseau .....	27
II.2.1 Modélisation de bus continu.....	27
II.2.2 Modélisation du convertisseur coté réseau.....	28
II.2.3 Modélisation du filtre .....	28
II.2.4 Modélisation du réseau.....	29
II.3 Régulateur de la tension de bus continue .....	29
II.4 Synthèse du régulateur des courants du filtre.....	30
II.5 Synchronisation du courant de l'onduleur avec la tension du réseau .....	31
II.6 Stratégie de commande des puissances injectées au réseau .....	31
II.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau par la commande vectorielle.....	32
II.7 Résultats de simulation et interprétation .....	33
II.7.1 Résultats d'onduleur deux et trois niveaux .....	33
II.7.2 Interprétation .....	35
II.7.3 Comparaison entre l'onduleur à deux et à trois niveaux .....	36
II.8 Conclusion.....	37

## **Chapitre III : Diagnostic des défauts des convertisseurs**

III.1 Introduction.....	40
III.2 L'IGBT .....	40
III.3 Le défaut circuit ouvert d'un interrupteur IGBT .....	40
III.4 Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert .....	41
III.4.1 Onduleur deux niveaux .....	41
III.4.2 Onduleur trois niveaux.....	43
III.5 Détection des défauts de circuit ouvert .....	45
III.5.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen .....	45
III.5.1.1 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur deux niveaux .....	46
III.5.1.2 Exemple de détection des défauts avec onduleur deux niveaux .....	47
III.5.1.3 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur trois niveaux.....	49
III.5.1.4 Exemple de détection des défauts .....	54
III.5.2 Diagnostic par réseau de neurones artificiels.....	57
III.5.2.1 Apprentissage du RNA utilisée dans l'onduleur 02 niveaux.....	57
III.5.2.1.1 Entrées du réseau .....	57
III.5.2.1.2 Sorties du réseau .....	57
III.5.2.1.3 Analyse de performance.....	59
III.5.2.1.4 Analyse de régression .....	59
III.5.2.1.5 Résultats de simulation et interprétations .....	60
III.5.2.2 Apprentissage du RNA utilisée dans l'onduleur 03 niveaux .....	61
III.5.2.2.1 Analyse de performance.....	62
III.5.2.2.2 Analyse de régression .....	63
III.5.2.2.3 Résultats de simulation et interprétations .....	64
III.6 La comparaison entre ACPV et RNA .....	65
III.7 Conclusion .....	67

<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>69</b>
----------------------------------	-----------

<b>ANNEXES.....</b>	<b>71</b>
---------------------	-----------



# Liste des figures

## Chapitre I : Commande d'une chaîne de conversion éolienne isolée

Figure I.1: principe de conversion de l'énergie éolienne.....	3
Figure I.2: Classification des systèmes éoliens. ....	4
Figure I.3: Modèle mécanique simplifié de la turbine.....	6
Figure I.4: Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse. .....	8
Figure I.5: Passage de système triphasé au système biphasé.....	9
Figure I.6: Architecture de commande du système éolienne.....	11
Figure I.7: Schéma d'un onduleur 2 niveaux. ....	12
Figure I.8: Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux. ....	13
Figure I.9: Tension simple et composée du l'onduleur 2 niveaux. ....	14
Figure I.10: Tension simple et composée du l'onduleur 3 niveaux. ....	15
Figure I.11: Structure de la commande Vectorielle de GSAP. ....	15
Figure I.12: Découplage par compensation. ....	16
Figure I.13: Commande des courants $i_d$ et $i_q$ en deux boucles indépendantes. ....	17
Figure I.14: Boucle de régulateur de vitesse. ....	18
Figure I.15: Coefficient $C_p$ et le coefficient de vitesse $\lambda$ . ....	19
Figure I.16: puissance aérodynamique et le couple du multiplicateur.....	19
Figure I.17: Vitesse de rotation de la GSAP. ....	20
Figure I.18: Couple électromagnétique de la GSAP. ....	20
Figure I.19: Courant directe de la GSAP. ....	21
Figure I.20: Courant quadratique de la GSAP. ....	21
Figure I.21: Puissance électromécanique de la GSAP. ....	22

## Chapitre II : Commande d'une chaîne éolienne connectée au réseau

Figure II.1: architecture de commande du système éolien. ....	27
Figure II.2: Schéma électrique du bus continu. ....	27
Figure II.3: Schéma électrique du filtre de liaison au réseau. ....	29
Figure II.4: Boucle de régulation de la tension de bus continu. ....	29
Figure II.5: Boucle de régulation de la tension de bus continu. ....	30
Figure II.6: Schéma fonctionnel de la boucle verrouillage de la phase.....	31
Figure II.7: Tension de bus continu Vdc. ....	33
Figure II.8: Courant triphasée injecté au réseau. ....	34
Figure II.9: Courant direct injecté au réseau. ....	34
Figure II.10: Courant quadratique injecté au réseau.....	34
Figure II.11: Puissance active injecté au réseau. ....	35
Figure II.12: Puissance réactive injectés au réseau. ....	35
Figure II.13: THD du signal de courant de l'onduleur à deux niveaux. ....	36
Figure II.14: THD du signal de courant de l'onduleur à trois niveaux.....	37

## Chapitre III : Diagnostic des défauts des convertisseurs

Figure III.1: Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras. ....	41
Figure III.2: Onduleur à deux niveaux. ....	41
Figure III.3: Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K1. ....	42

<b>Figure III.4:</b> Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K2.....	43
<b>Figure III.5:</b> Onduleur à trois niveaux.....	43
<b>Figure III.6:</b> Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K11.....	44
<b>Figure III.7:</b> Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur K13.....	44
<b>Figure III.8:</b> Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.....	47
<b>Figure III.9:</b> Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	47
<b>Figure III.10:</b> Amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	48
<b>Figure III.11:</b> Interrupteur en défaut.....	48
<b>Figure III.12:</b> Amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	49
<b>Figure III.13:</b> Interrupteur en défaut.....	49
<b>Figure III.14:</b> Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	50
<b>Figure III.15:</b> Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.....	51
<b>Figure III.16:</b> valeur moyenne des courants du premier bras.....	52
<b>Figure III.17:</b> valeur moyenne des courants du deuxième bras.....	53
<b>Figure III.18:</b> valeur moyenne des courants du troisième bras.....	53
<b>Figure III.19:</b> Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	54
<b>Figure III.20:</b> amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	55
<b>Figure III.21:</b> Les courants moyennes $i_{xn}$ et $i_{xn\_pos}$ .....	55
<b>Figure III.22:</b> Phase et Interrupteur en défaut.....	55
<b>Figure III.23:</b> amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	56
<b>Figure III.24:</b> Les courants moyennes $i_{xn}$ et $i_{xn\_nég}$ .....	56
<b>Figure III.25:</b> Phase et Interrupteur en défaut.....	57
<b>Figure III.26:</b> Vue générale d'ensemble du <b>RNA</b> .....	58
<b>Figure III.27:</b> Courbe de performance du détecteur neuronal.....	59
<b>Figure III.28:</b> Graphe de régression pour le détecteur neuronal.....	60
<b>Figure III.29:</b> Test <b>RNA</b> dans le cas sans défaut.....	60
<b>Figure III.30:</b> Test <b>RNA</b> dans le cas de défaut K3.....	61
<b>Figure III.32:</b> Test <b>RNA</b> dans le cas de défaut K6.....	61
<b>Figure III.33:</b> Vue générale d'ensemble du <b>RNA</b> .....	62
<b>Figure III.34:</b> Courbe de performance du détecteur neuronal.....	63
 <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	 <b>69</b>
 <b>ANNEXES</b> .....	 <b>71</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1:</b> Diagnostic du défaut d'ouverture d' <b>IGBT</b> utilisant le vecteur de Park. ....	46
<b>Tableau III.2</b> Diagnostic du défaut d'ouverture d' <b>IGBT</b> de l'onduleur trois niveaux utilisant le vecteur de Park.....	50
<b>Tableau III.3:</b> Comparaison entre <b>ACPV</b> et <b>RNA</b> . ....	66

# **Introduction générale**

Devant une industrialisation croissante à travers le monde, la consommation d'énergie n'a cessé de croître, ce qui a entraîné des problèmes environnementaux préoccupants, en particulier liés à la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), qui sont responsables de pollution et de gaz à effet de serre. Aujourd'hui encore, les énergies fossiles représentent deux tiers des sources utilisées pour produire de l'électricité. Cependant, elles sont de plus en plus susceptibles d'être remplacés par une nouvelle forme d'énergie appelée "renouvelable", ce qui réduit l'émission de CO<sub>2</sub> et limite le recours aux centrales nucléaires. Il est nécessaire que le monde se tourne vers l'utilisation de ces énergies afin de développer les méthodes d'extraction des puissances, tout en cherchant à améliorer la fiabilité et l'efficacité énergétique, ainsi qu'à réduire les coûts de production, d'utilisation et de consommation [1].

En ce qui concerne notre étude, nous examinerons la transformation de l'énergie éolienne en électricité. Regardée comme l'une des énergies les plus prometteuses et non polluantes, l'énergie éolienne fut la première source d'énergie à être exploitée par l'homme il y a plusieurs siècles.

Le vent est à la fois le moyen le plus efficace et le plus économique pour produire de l'électricité, car il s'agit d'un carburant propre qu'il y a assez à travers la planète.

Toutefois, la sélection du type d'aérogénérateur pour une éolienne est complexe et repose sur divers critères tels que la structure, la configuration du convertisseur, l'emplacement de la turbine, les performances et les coûts, ce qui rend la sélection du générateur adéquat une tâche complexe.

La production de l'électricité est faite par une génératrice synchrone à aimants permanents **GSAP**, la commande vectorielle de la **GSAP** est similaire à celle d'une génératrice à courant continu. Toutefois, cette structure de contrôle demande une précision des paramètres de la machine, ce qui requiert une identification précise des paramètres.

Les défaillances survenant dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne peuvent être causées par sa commande, ses composants de puissance ou ses capteurs, ce qui peut entraîner une perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase et de puissance. Il est donc essentiel d'identifier ces défauts rapidement pour éviter leur propagation aux autres éléments du système et de mettre en œuvre des techniques de détection et de correction des défauts.

Nous avons organisé ce mémoire de la façon suivante pour mener notre étude :

- Le premier chapitre comporte des généralités sur la commande d'une chaîne de conversion éolienne. Nous élaborons un modèle mathématique qui repose sur des hypothèses simplificatrices dans le repère  $(d, q)$  de la **GSAP**. De plus, nous examinons la modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux et trois niveaux qui utilisent la technique **MLI**, la

commande vectorielle de la **GSAP** est commandée par des régulateurs de type **PI** afin de contrôler la vitesse et les courants, et les résultats des simulations sont exposés et analysés à l'aide des deux topologies d'onduleurs.

- Le deuxième chapitre se concentre sur l'élaboration de la commande à tension orientée pour l'onduleur deux niveaux et trois niveaux connecté au réseau électrique, Nous avons comparé les deux topologies d'onduleurs en fonction de divers critères tels que la distorsion harmonique totale (**THD**) et la qualité de l'énergie ainsi que les performances du système. Les résultats de la simulation seront précisés et annotés pour les deux topologies d'onduleur à la fin de ce chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous examinons les défaillances d'onduleurs à deux et trois niveaux, en particulier les problèmes de circuit ouvert. Nous réalisons une simulation d'un diagnostic traditionnel en utilisant l'approche vecteur de Park à courant moyen (Average Current Park's Vector approach **ACPV**) [2].associé au Réseau de Neurones Artificiels (**RNA**) pour un diagnostic plus performant avec une comparaison entre ces deux méthodes. Les résultats obtenus montrent que cette méthode est efficace pour les défauts de circuit ouvert.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui englobera les résultats obtenus au cours de notre étude, ainsi que des perspectives futures.

# **Chapitre I : Commande d'une chaîne de conversion éolienne isolée**

## I.1 Introduction

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [3].

Ce présent chapitre comprend une généralité sur les systèmes des conversions éoliennes à base de **GSAP**, il est nécessaire de modéliser mathématiquement la turbine éolienne avec la génératrice synchrone à aimants permanents **GSAP**, ce système est commandée par un redresseur à modulation de largeur d'impulsion (**MLI**), ainsi que la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents.

## I.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source renouvelable d'énergie qui est omniprésente géographiquement et non dégradée. Elle est caractérisée par une corrélation saisonnière, ne générant aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Cependant, sa disponibilité varie dans le temps, ce qui nécessite des structures complexes, telles que des éoliennes de grande taille, installées dans des zones dégagées pour minimiser les effets de turbulence [4].

### I.2.1 Principe d'une éolienne

Un aérogénérateur, souvent désigné sous le nom d'éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique via un arbre de transmission, puis la transforme en énergie électrique à travers une génératrice **figure I.1**.

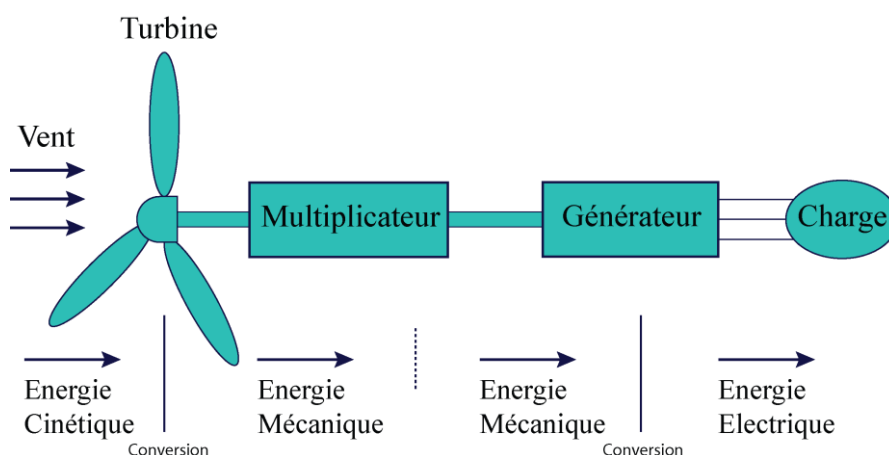


Figure I.1: principe de conversion de l'énergie éolienne.



## I.2.2 Classification des éoliennes

Les générateurs éoliens peuvent être classés en fonction de divers critères. Ces derniers peuvent ensuite être classés en fonction de [5]:

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc...).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

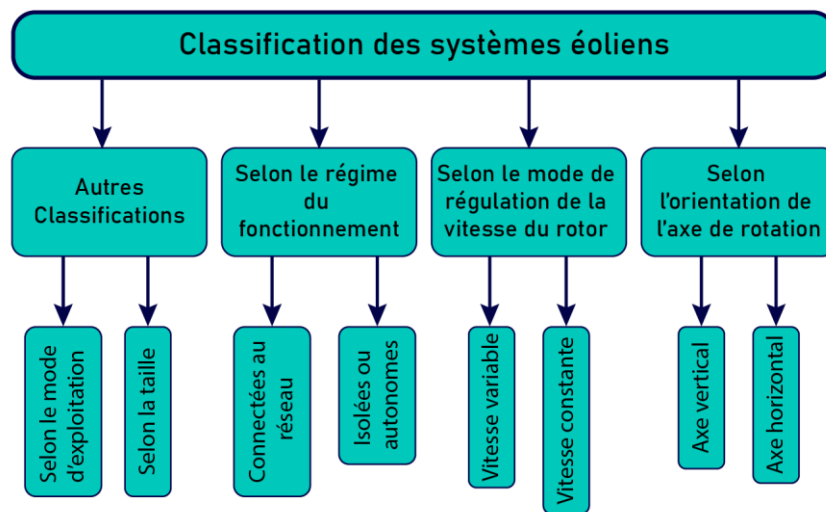


Figure I.2: Classification des systèmes éoliens.

## I.3 Modélisation des éléments de la chaîne éolienne

### I.3.1 Modélisation du vent

Les caractéristiques dynamiques du vent sont également essentielles pour analyser l'ensemble du système de conversion d'énergie, on peut exprimer le vent par une fonction mathématique (somme de plusieurs harmoniques) qui varie en fonction du temps [6].

$$V_v(t) = A + \sum(a_k)\sin(\omega_k t + \varphi) \quad (I.1)$$

Avec A : représente la valeur moyenne de la vitesse du vent.

#### I.3.1.1 Puissance extraite du vent

La puissance de la masse d'air traversant la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est obtenue à partir de l'énergie cinétique des particules mobiles de la masse d'air traversant la section de la surface active S de la voilure. Elle s'exprime de la manière :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (I.2)$$

Avec :

$\rho$  : représente la masse volumique d'air (Kg/m<sup>3</sup>).

$V_v$  : représente la vitesse du vent (m/s).

$S$  : La surface utile traversée par le vent a pour expression.

$$S = 2 \cdot R \cdot H \quad (I.3)$$

$R$  : représente le rayon de la voilure (m).

$H$  : représente la hauteur de la voilure (m).

### **I.3.1.2 Loi de Betz**

Le vent théoriquement non perturbé traverserait cette surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_v$ , la puissance  $P_{Betz}$  correspondante serait alors :

$$P_{Betz} = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \cdot C_{PBetz} \quad (I.4)$$

$C_{PBetz}$  : Coefficient de puissance de Betz.

### **I.3.1.3 Coefficient de vitesse spécifique**

Le coefficient de vitesse  $\lambda$  est un facteur spécifique des aérogénérateurs est défini comme étant le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales  $R_v$  et  $\Omega$  sur la vitesse instantanée du vent :

$$\lambda = \frac{R_v \Omega}{V_v} \quad (I.5)$$

Avec :

$R_v$  : Longueur d'une pale de la turbine éolienne (m).

$\Omega$  : Vitesse angulaire de la turbine éolienne (rad/sec).

### **I.3.1.4 Coefficient de puissance $C_p$**

Le coefficient de puissance  $C_p$  est le rapport entre la puissance éolienne et la puissance du vent. La  $C_p$  dépend du nombre des pales du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profile de section) par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_{éol}}{V_v} \quad (I.6)$$

Avec :

$P_{éol}$  : La puissance captée par la turbine éolienne en (W).

La turbine éolienne choisie dans cette étude est une turbine tripale. Ses propriétés sont données dans l'annexe, Le coefficient de puissance de la turbine utilisé est donné comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda_i \quad (I.7)$$

Le paramètre  $\lambda_i$  dépend également de  $\lambda$  et  $\beta$ .

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035^2}{1 + \beta^2} \quad (I.8)$$

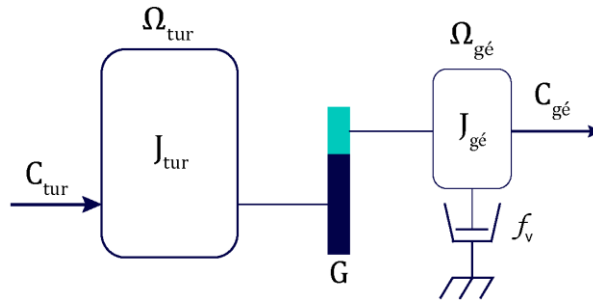
$\lambda$  : Coefficient de vitesse spécifique.

$\beta$  : Angle d'orientation des pales en (rad).

### I.3.2 Modélisation de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{tur}$  qui est relié à une génératrice électrique par l'intermédiaire d'un multiplicateur de gain G [7].

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple :



**Figure I.3:** Modèle mécanique simplifié de la turbine.

$J_{tur}$ : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.

$J_{gé}$  : Le moment d'inertie de la génératrice.

$f_v$ : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

$C_{gé}$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.

$\Omega_{gé}$ : La vitesse de rotation de la génératrice.

$\Omega_{tur}$ : La vitesse de rotation de l'éolienne.

$G$  : Le gain du multiplicateur de vitesse.

$C_{tur}$ : Couple de la turbine

### I.3.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur a pour fonction de convertir la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur en utilisant les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{\Omega_{g\acute{e}}}{\Omega_{tur}} \quad (I.9)$$

$$G = \frac{C_{tur}}{C_{g\acute{e}}} \quad (I.10)$$

### I.3.4 Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'inertie totale  $J$  est constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'arbre de la génératrice, et l'inertie de la génératrice  $J_{méc}$  [8].

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{g\acute{e}} \quad (I.11)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor [9]:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (I.12)$$

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{méc} = C_{g\acute{e}} - C_{em} - C_f \quad (I.13)$$

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

$C_f$ : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{méc} \quad (I.14)$$

$f$ : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

## I.4 La technique de commande de la MPPT

Il existe un point de fonctionnement où la puissance débitée est maximale. L'optimisation consiste à réaliser ce point en permanence en agissant de façon automatique sur la charge vue par le générateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en général à l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent être aussi faibles que possible, Ce type de commande est souvent nommé Maximum Power Point Tracking (MPPT) [10].

### I.4.1 Maximisation de puissance avec asservissement

Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine, qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée, la vitesse de rotation de référence est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (I.15)$$

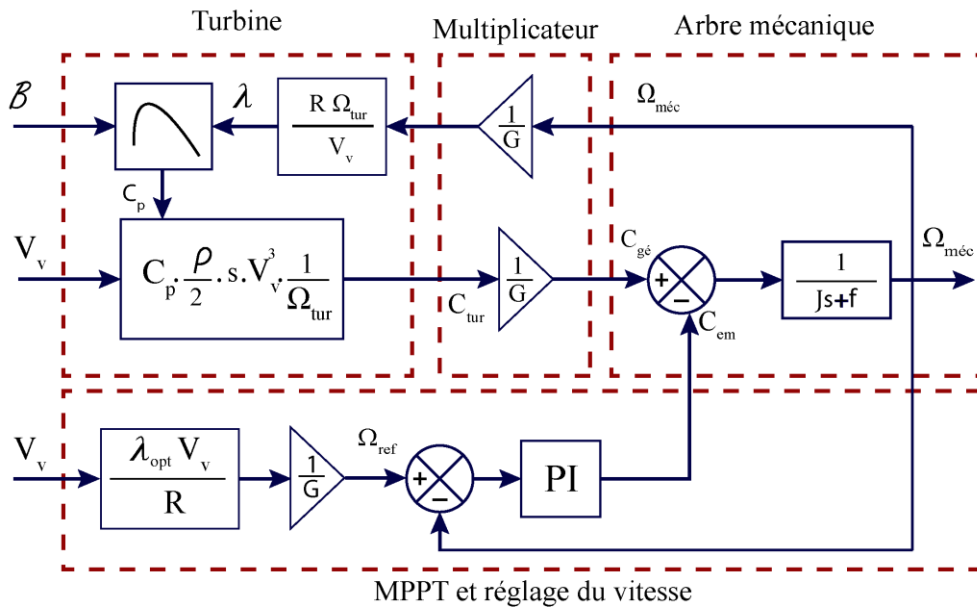


Figure I.4: Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

## I.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

### I.5.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP

Le fonctionnement de la génératrice synchrone à aimants permanents est influencé par divers paramètres, dont certains sont non linéaires, ce qui rend la modélisation mathématique de la machine complexe. Afin de rendre cette modélisation plus accessible pour l'étude du comportement de la génératrice, la littérature propose généralement des hypothèses simplificatrices [11] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique,
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator,
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau,
- L'effet d'encoche est négligeable,
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

## I.6 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé

### I.6.1 Équations électriques

Les équations régissant le fonctionnement des génératrices synchrones à aimants permanents s'obtiennent en écrivant que la tension appliquée à chaque phase et l'excitation rotorique est assurée par l'aimant permanent. Les équations électriques dans le plan (a, b, c) peuvent s'écrire comme suit [12].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

Avec :

$[V_s] = [V_a V_b V_c]^T$  : Le vecteur des tensions statoriques.

$[i_s] = [i_a i_b i_c]^T$  : Le vecteur des courants statoriques.

$[\phi_s] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$  : Le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$  : La résistance d'une phase statorique.

On peut écrire l'équation (I. 16) par l'expression suivante :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (I. 17)$$

### I.6.2 Equations magnétiques

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que [13] :

$$[\phi_s] = [L_s][i_s] + [\phi_F] \quad (I. 18)$$

Ou

$[\phi_s] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$  : Le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$[i_s] = [i_a i_b i_c]^T$  : Le vecteur des courants statoriques.

$[\phi_F] = [\phi_{Fa} \phi_{Fb} \phi_{Fc}]^T$  : Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

$[L_s]$  : Matrice des inductances statoriques.

On peut réécrire le système (I. 17) sous la forme suivante :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}\{[L_s][i_s] + [\phi_F]\} \quad (I. 19)$$

## I.7 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq

### I.7.1 Transformation de Park

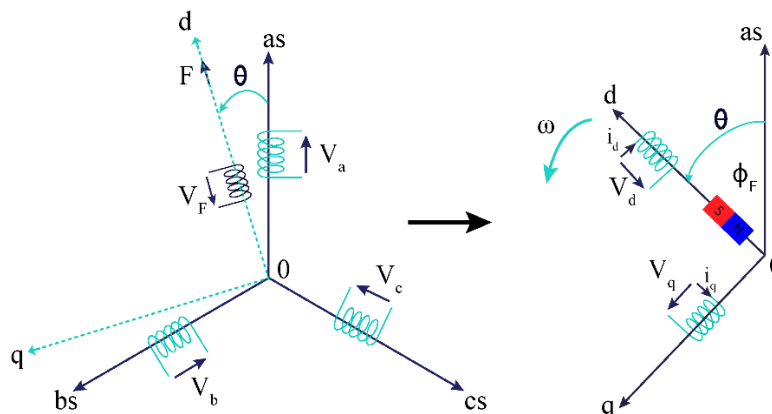


Figure I.5: Passage de système triphasé au système biphasé.

La transformation de Park permet de passer facilement des variables triphasées aux variables biphasées continues plutôt qu'alternatives. Elle est définie par les relations suivantes [14]:

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \text{ avec: } [P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$[P(\theta)]$  : La matrice de passage direct de Park.

### I.7.2 Equations électriques

En appliquant la transformation de Park au système (I. 19) on aura le modèle globale suivant [15] :

$$[V_{dq}] = [P(\theta)][V_{abc}] = [P(\theta)][R_s][i_s] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (I. 20)$$

Après la simplification de système (I. 20) on trouve :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \phi_d \end{cases} \quad (I. 21)$$

### I.7.3 Equations magnétiques

A l'aide de la transformation de Park appliqué au système d'équation (I. 18), on passe à partir des grandeurs statoriques réelles  $\phi_a \phi_b \phi_c$  et  $i_a i_b i_c$  à leur composantes  $\phi_d \phi_q$  et  $i_d i_q$  [16] :

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \phi_F \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (I. 22)$$

Si on remplace les flux par leurs expressions dans le système d'équation électriques, on obtient :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \phi_F) \end{cases} \quad (I. 23)$$

$L_d, L_q$ : L'inductance suivant l'axe d et q.

$\phi_F$  : Flux des aimants permanents.

### I.7.4 Équations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$\sum_{i=1}^n C_i = J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_{g\acute{e}} - f_v \Omega \quad (I.24)$$

$$J = J_{tur} + J_{g\acute{e}} \quad (I.25)$$

Avec :

$J_{tur}$  et  $J_{g\acute{e}}$  : sont respectivement le moment d'inertie de la turbine et celui du générateur.

$\Omega$  : est la vitesse de rotation du générateur.

### I.7.5 Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique après les simplifications s'écrit comme suit :

$$C_{em} = p[\phi_F i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (I.26)$$

### I.8 Modélisation des convertisseurs statiques

Le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation et introduction des convertisseurs de puissance grâce à son développement rapide et aux avantages qu'il offre sur le plan capacité et qualité d'énergie. Dans le système de conversion d'énergie éolienne, l'emploi de convertisseurs de puissance permet non seulement d'obtenir la forme désirée de l'énergie électrique, mais également d'améliorer la puissance obtenue.

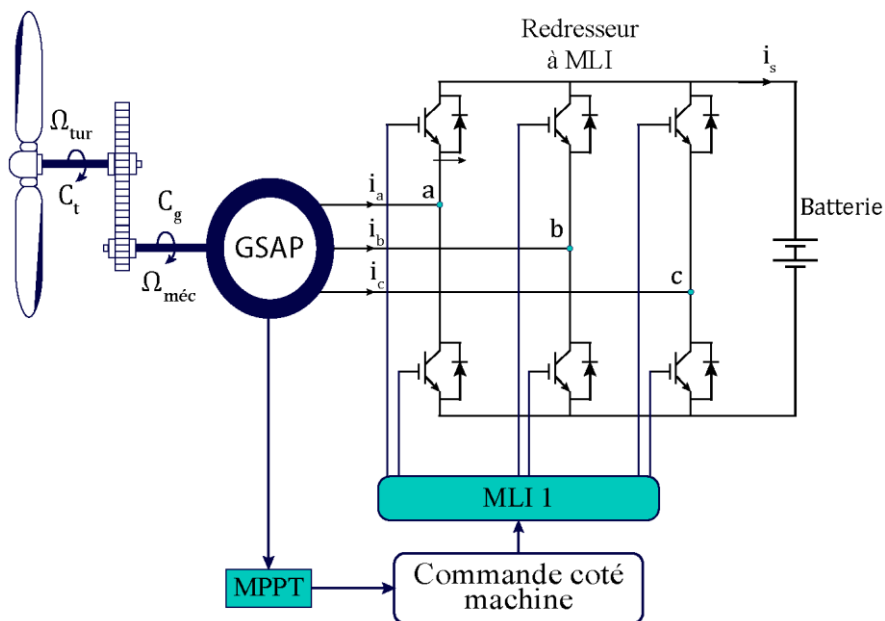


Figure I.6: Architecture de commande du système éolienne.



### I.8.1 Onduleur 2 niveaux

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs, leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source continue  $V_{dc}$ . Les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, les interrupteurs peuvent être soit des **MOSFET** pour les faibles puissances et fréquences très élevées, soit des **IGBT** pour les moyennes et grandes puissances et fréquences élevées, ou des **GTO** pour les très grandes puissances et fréquences faibles. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode [17] [18].

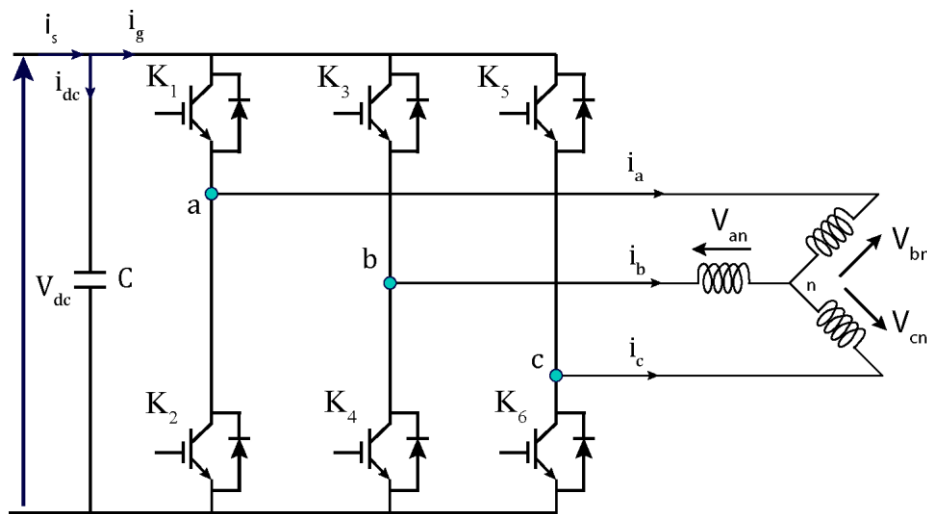


Figure I.7: Schéma d'un onduleur 2 niveaux.

Le modèle de l'onduleur écrite par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (I.27)$$

$S_a, S_b, S_c$  : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

$V_{dc}$  : Tension redressée.

### I.8.2 Onduleur 3 niveaux

L'onduleur **NPC** à trois niveaux est représenté sur la **figure I.8**. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série ( $C_1$  et  $C_2$ ), formant un point milieu noté (n) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut  $V_{dc}$ , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $V_{dc}/2$  à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs

commandés ( $K_{x1}, K_{x2}, K_{x3}$  et  $K_{x4}$  pour le bras a) et deux diodes de clamp ( $D_1$  et  $D_2$ ) de maintien connectées au point milieu du bus continu [19].

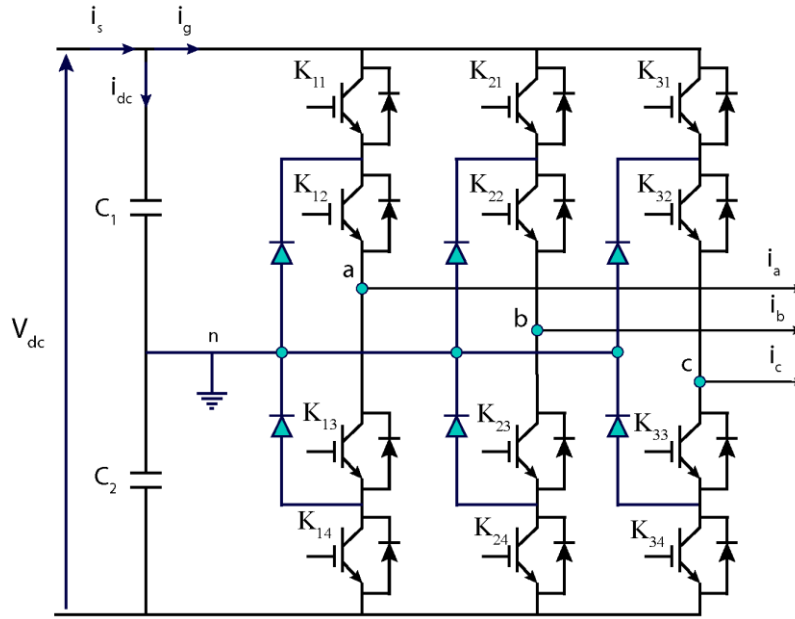


Figure I.8: Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux.

Le modèle de l'onduleur écrite par la forme matricielle suivante [20] :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad (I.28)$$

On définit la fonction de connexion du demi-bras qu'on notera  $F_{KM}^b$  avec :

$K$  : Numéro de bras.

$M = 1$  pour le demi-bras du haut et  $M = 0$  pour le demi-bras du bas.

Pour un bras  $K$ , les fonctions de connexions des demi-bas s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (I.29)$$

$F_{K1}^b$  : Associé au demi-bras du haut (la paire  $F_{K1}$  et  $F_{K2}$ ).

$F_{K0}^b$  : Associé au demi-bras du bas (la paire  $F_{K3}$  et  $F_{K4}$ ).

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (à deux niveaux), ces avantages sont :

- Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux [21].

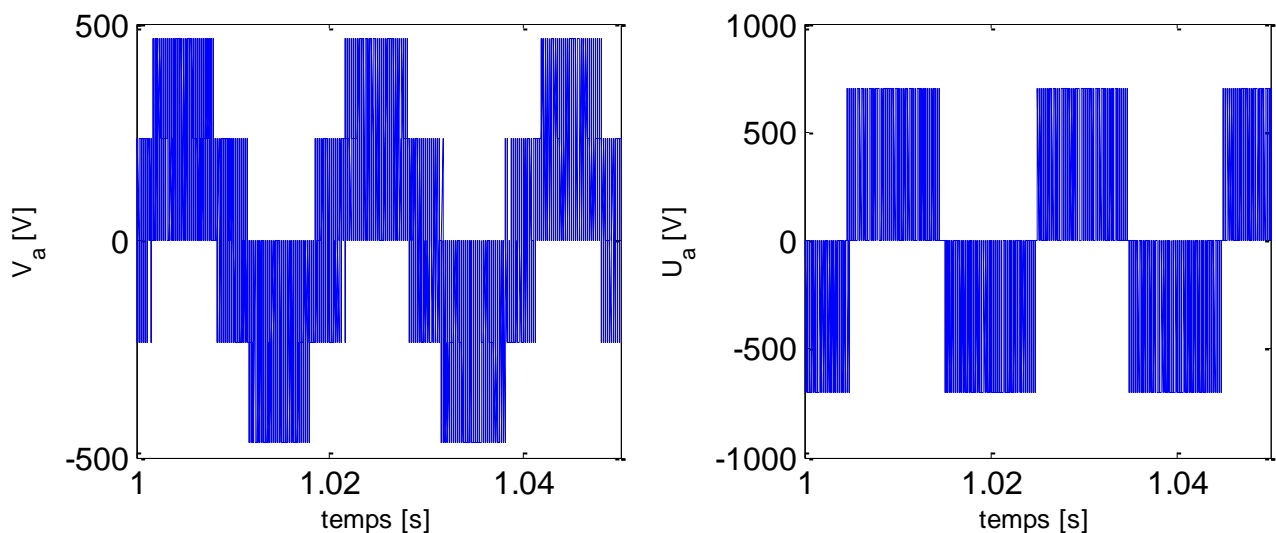
### I.8.3 Commande MLI Sinus-Triangle à l'onduleur 2 et 3 niveaux

La méthode **MLI** permet de réguler la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence en utilisant les signaux de commande des interrupteurs.

La **MLI** sinus-triangle repose sur la comparaison d'une onde modulante de forme sinusoïdale à faible fréquence et d'une autre onde porteuse de forme triangulaire à fréquence plus élevée. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

Le signal de commande de l'interrupteur électronique d'un bras de l'onduleur triphasé est fermé si l'onde de référence est supérieure ou égale à la porteuse triangulaire [22].

Les figures ci-dessous présentent les tensions de sortie simple et composée de l'onduleur à 2 niveaux.



**Figure I.9:** Tension simple et composée du l'onduleur 2 niveaux.

Les figures ci-dessous présentent les tensions de sortie simple et composée de l'onduleur à 3 niveaux.

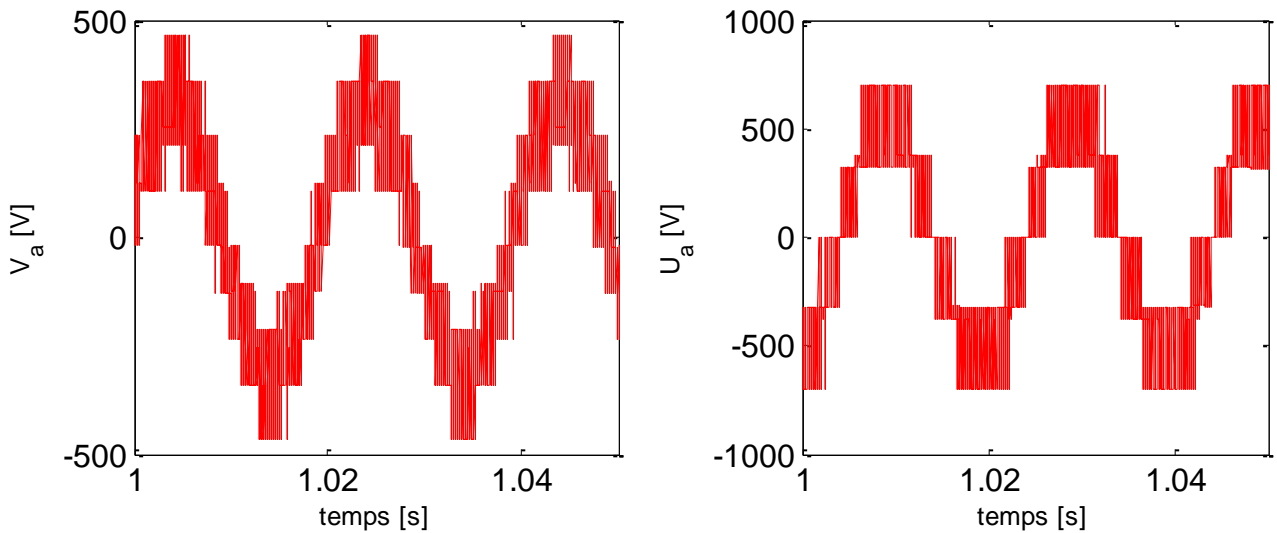


Figure I.10: Tension simple et composée du l'onduleur 3 niveaux.

### I.9 Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines alternatives. C'est une technique qui est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la **GSAP** à une structure équivalant à la machine à courant continu à excitation séparée.

#### I.9.1 Modelé de la machine à commander

La machine étudiée est à pôles lisses ( $L_d = L_q$ ), où le couple ne dépend que de la composante en quadrature  $C_{em} = p\phi_F i_q$ , il est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q. Cela revient à imposer la composante directe du courant nulle, qui a pour effet la diminution des pertes joules [12].

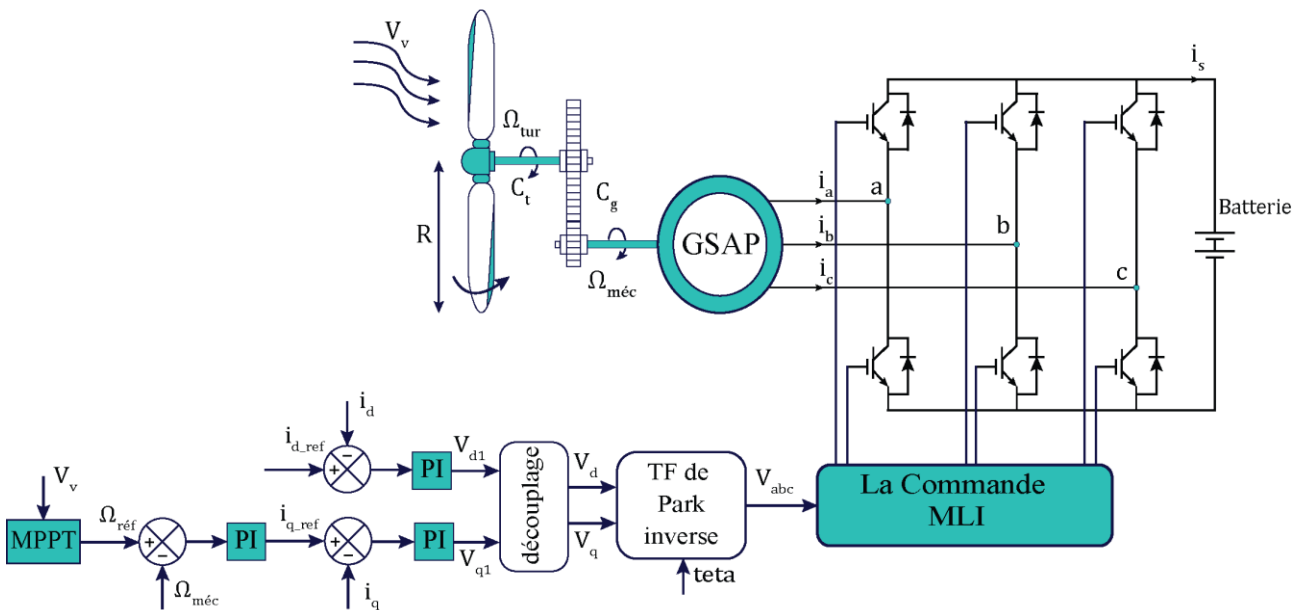


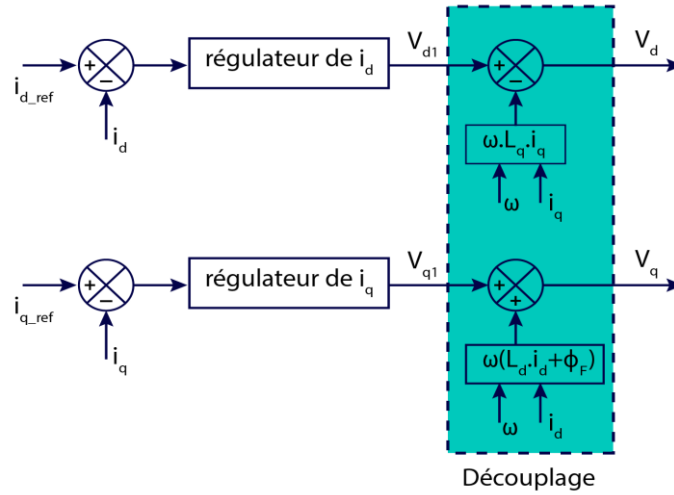
Figure I.11: Structure de la commande Vectorielle de GSAP.

Comme nous l'avons vu, les équations des tensions le repère de Park est donné par l'équation (I.23), le modèle de la **GSAP** dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires  $\omega, i_d$  et  $i_q$ .

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes  $d$  et  $q$  complètement indépendants.

**I.9.2 Découplage par compensation :**

La compensation a pour but de découpler les axes  $d$  et  $q$ . Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.



**Figure I.12:** Découplage par compensation.

Nous définissons les termes de découplage  $e_d$  et  $e_q$  de telle sorte que les tensions résiduelles  $V_d$  et  $V_q$  aient une relation du premier ordre avec les deux composantes des courants statoriques  $i_d$  et  $i_q$  telle que :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \tag{I.30}$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)i_q \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \phi_F) \end{cases}$$

Avec :

$V_{d1}$  : La tension à la sortie de régulateur de courant  $i_d$ .

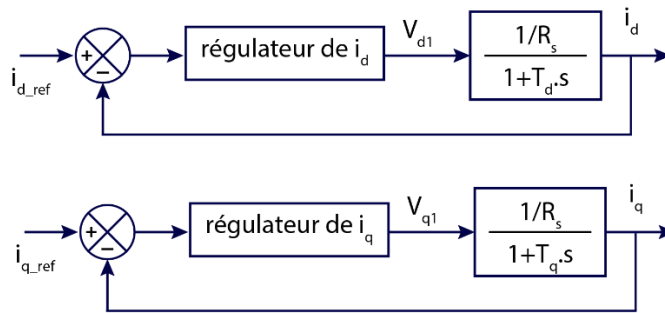
$V_{q1}$  : La tension à la sortie de régulateur de courant  $i_q$ .

Les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont découplés. Le courant  $i_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$  et  $i_q$  ne dépend que de  $V_{q1}$ . On peut écrire l'expression des courants comme suit :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (I.31)$$

### I.9.3 Calcul des régulateurs de courant

Le système présente donc pour la régulation des courants  $i_d$  et  $i_q$  deux schémas blocs selon la Figure suivante :



**Figure I.13:** Commande des courants  $i_d$  et  $i_q$  en deux boucles indépendantes.

Par la méthode de compensation (pôle par un zéro), Les deux fonctions de transfert en boucle ouverte aura :

$$\begin{cases} FTBO_d(s) = \frac{K_{id}}{R_s s} \\ FTBO_q(s) = \frac{K_{iq}}{R_s s} \end{cases} \quad (I.32)$$

Les fonctions de transfert en boucle fermé (FTBF) sont données par :

$$\begin{cases} FTBF_d(s) = \frac{FTBO_d(s)}{FTBO_d(s) + 1} = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{id}} s + 1} \\ FTBF_q(s) = \frac{FTBO_q(s)}{FTBO_q(s) + 1} = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{iq}} s + 1} \end{cases} \quad (I.33)$$

Pour un système de 1<sup>er</sup> ordre, le temps de réponse  $t_r = 3\tau$ , Les gains du régulateur PI pour un temps de réponse donnée seront calculés comme suit [18] :

$$\begin{cases} t_{rd} = 3 \frac{R_s}{K_{id}} \rightarrow K_{id} = 3 \frac{R_s}{t_{rd}} \\ t_{rq} = 3 \frac{R_s}{K_{iq}} \rightarrow K_{iq} = 3 \frac{R_s}{t_{rq}} \end{cases} \quad (I.34)$$

Donc on trouve :

$$\begin{cases} K_{pd} = \frac{K_{id} \cdot L_d}{R_s} = 3 \frac{L_d}{t_{rd}} \\ K_{pq} = \frac{K_{iq} \cdot L_q}{R_s} = 3 \frac{L_q}{t_{rq}} \end{cases} \quad (I.35)$$

#### I.9.4 Calcul du Régulateur de vitesse

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est représenté par la figure ci-dessous :

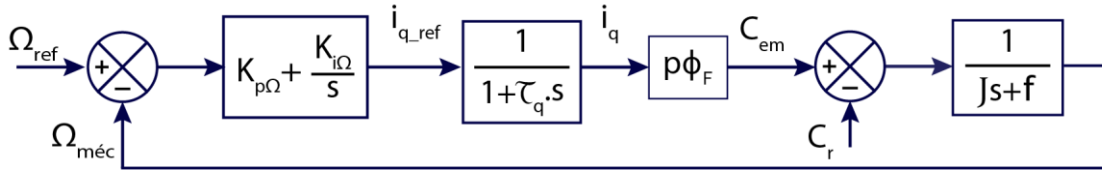


Figure I.14: Boucle de régulateur de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouverte pour  $C_r = 0$ , est donnée par :

$$FTBO_{\Omega}(s) = \left( K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} \right) \left( \frac{p\phi_F}{(\tau_q s + 1)(Js + f)} \right) \quad (I.36)$$

$$FTBF_{\Omega}(s) = \frac{(K_{p\Omega} s + K_{i\Omega}) p\phi_F}{J\tau_q s^3 + (\tau_q f + J)s^2 + (K_{p\Omega} p\phi_F + f)s + K_{i\Omega} p\phi_F} \quad (I.37)$$

Si on néglige  $(J\tau_q)$  et  $(\tau_q f)$  devant  $(J)$ , le polynôme caractéristique de cette fonction devient :

$$P(s) = Js^2 + (K_{p\Omega} p\phi_F + f)s + K_{i\Omega} p\phi_F = \frac{J}{K_{i\Omega} p\phi_F} s^2 + \frac{K_{p\Omega} p\phi_F + f}{K_{i\Omega} p\phi_F} s + 1 \quad (I.38)$$

Par identification de l'équation (I.36) par le système de 2<sup>ème</sup> ordre on déduit les expressions de  $K_{p\Omega}$  et  $K_{i\Omega}$  :

$$\begin{cases} K_{i\Omega} = \frac{J\omega_0^2}{p\phi_F} \\ K_{p\Omega} = \frac{2\xi\omega_0 J - f}{p\phi_F} \end{cases} \quad (I.39)$$

#### I.10 Résultats de simulation et interprétation

Afin de compléter l'étude théorique exposée précédemment, il est nécessaire de réaliser une simulation numérique. On a réalisé la simulation dans logiciel Matlab/Simulink.

Le profil de la variation du vent employé pour les simulations et les paramètres du système sont donnés à l'annexe avec les schémas bloc de simulation.

I.10.1 Résultats de simulation

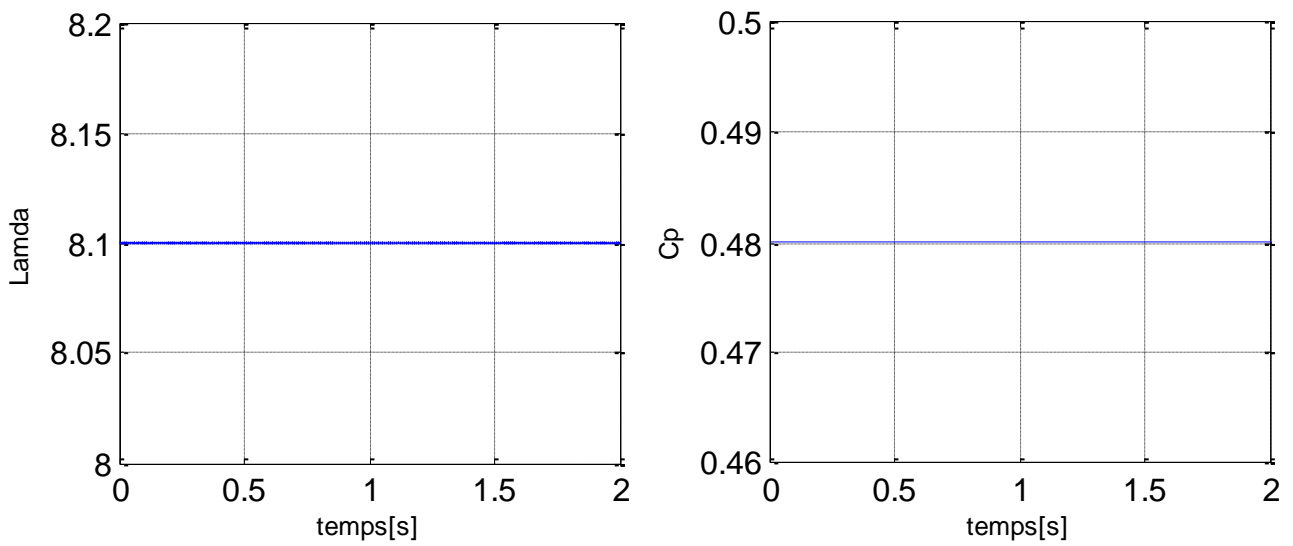


Figure I.15: Coefficient  $C_p$  et le coefficient de vitesse  $\lambda$ .

La commande par asservissement de la vitesse a permis de maintenir la valeur du coefficient de puissance à sa valeur maximale de 0.48 et la vitesse spécifique à sa valeur optimale de 8,1, comme le montrent la **figure I.15**.

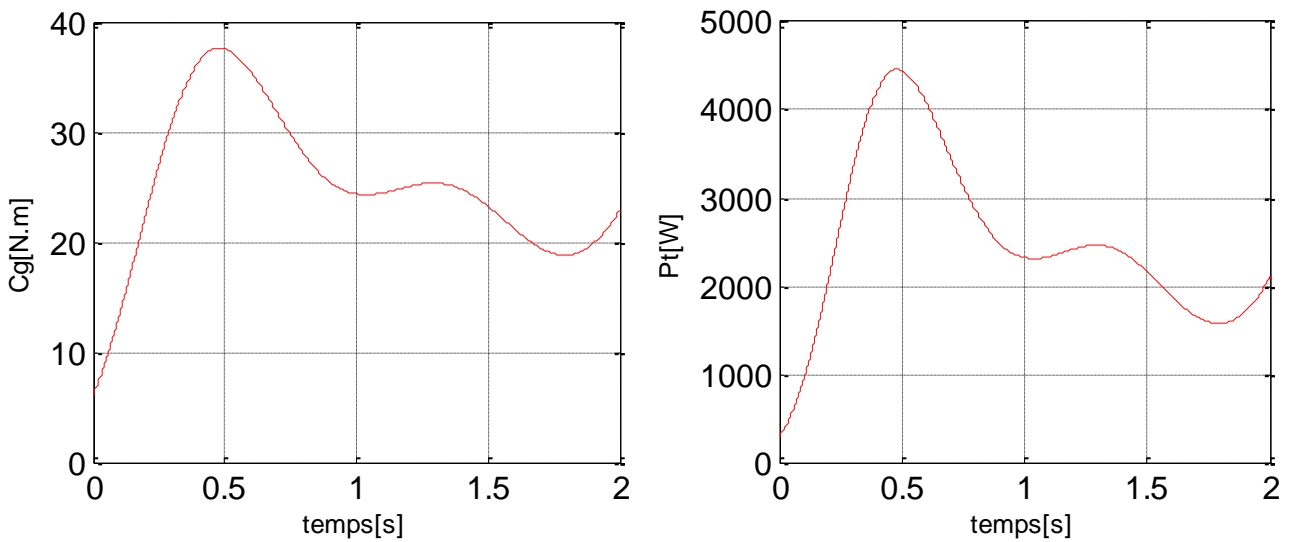


Figure I.16: puissance aérodynamique et le couple du multiplicateur.

La puissance aérodynamique et le couple calculé par le multiplicateur sont présentés dans la **figure I.16**, les valeurs sont variables en fonction de la vitesse du vent.



### I.10.2 Résultats d'onduleur deux et trois niveaux

Nous exposerons les résultats des simulations réalisées sur un système d'éolienne isolée dans cette section. Ces simulations ont été réalisées dans le but d'évaluer le fonctionnement global du système pour les deux topologies d'onduleurs, à savoir les onduleurs à deux niveaux à gauche et à trois niveaux à droite.

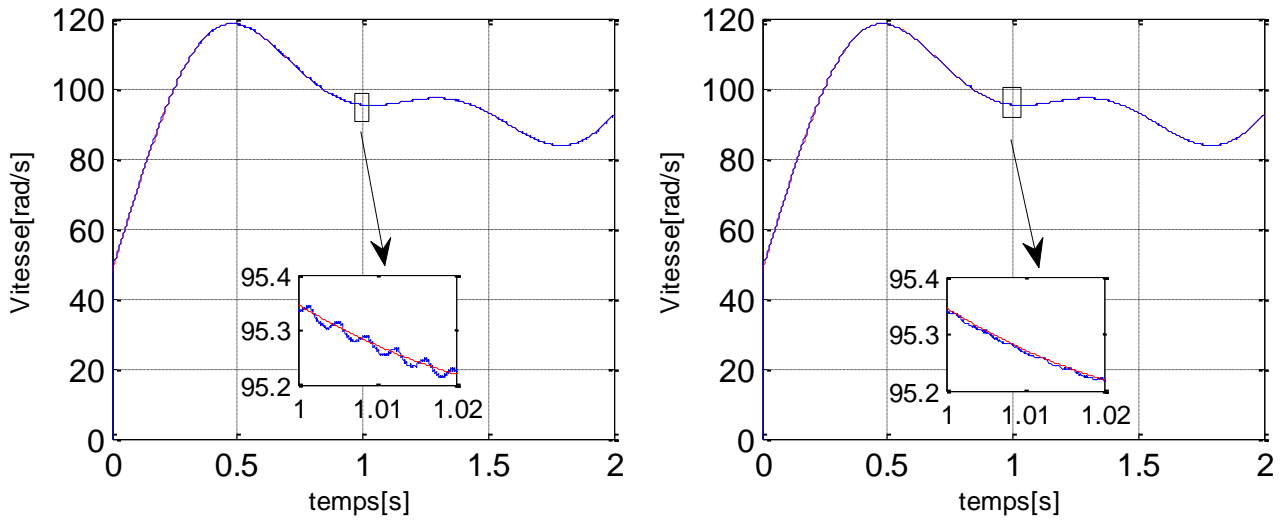


Figure I.17: Vitesse de rotation de la GSAP.

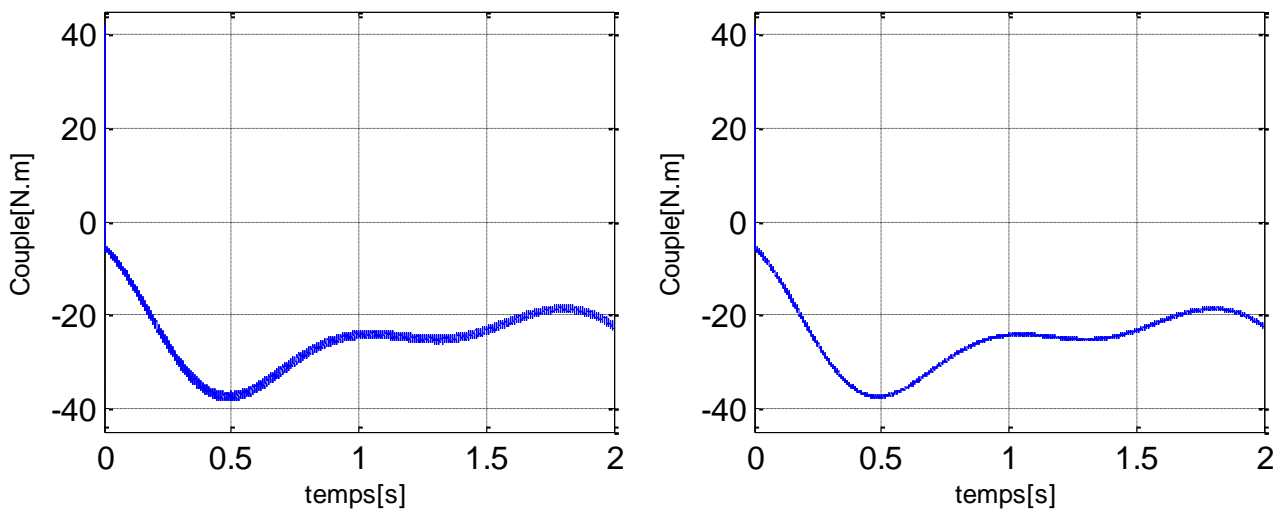


Figure I.18: Couple électromagnétique de la GSAP.

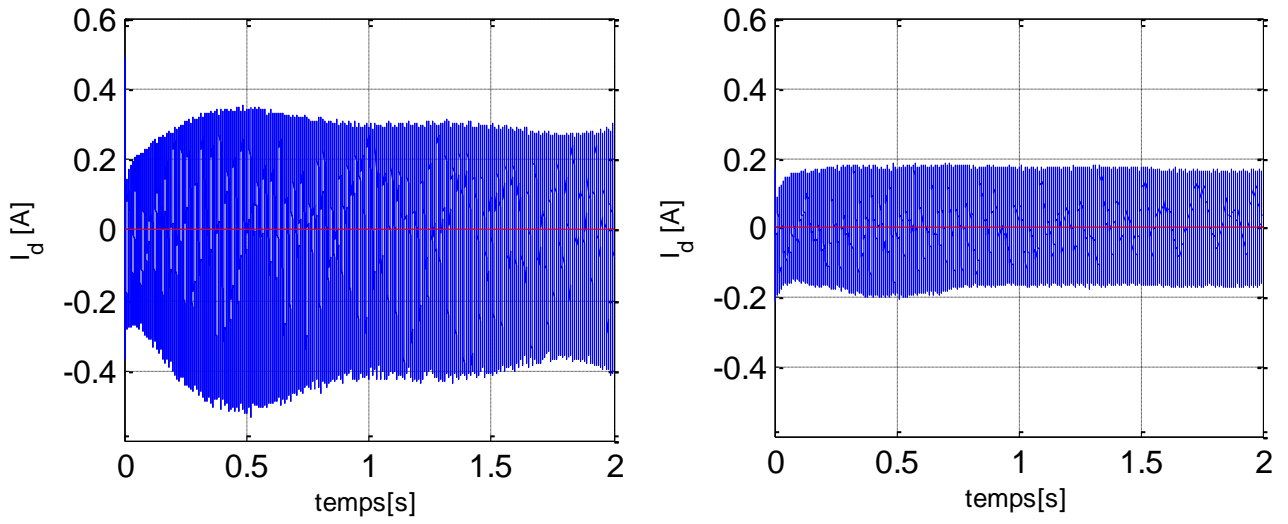


Figure I.19: Courant directe de la GSAP.

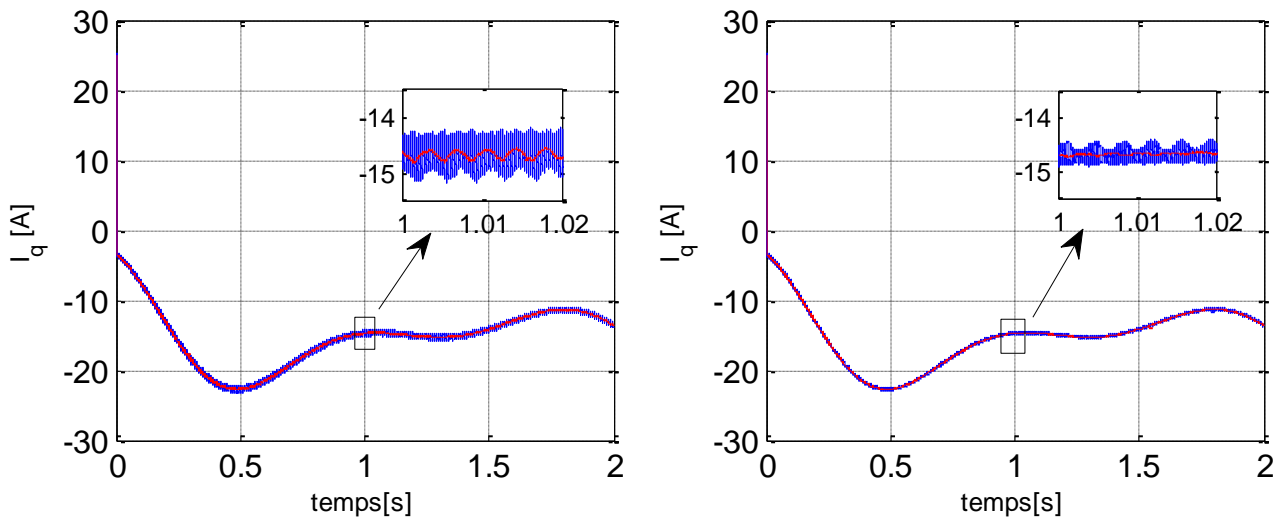


Figure I.20: Courant quadratique de la GSAP.

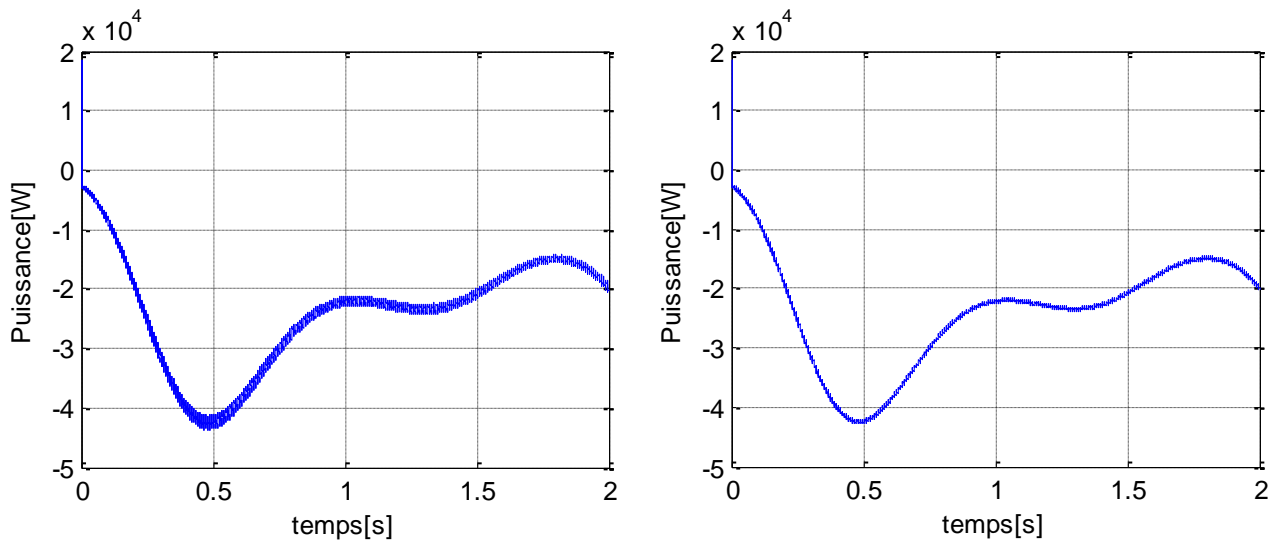


Figure I.21: Puissance électromécanique de la GSAP.

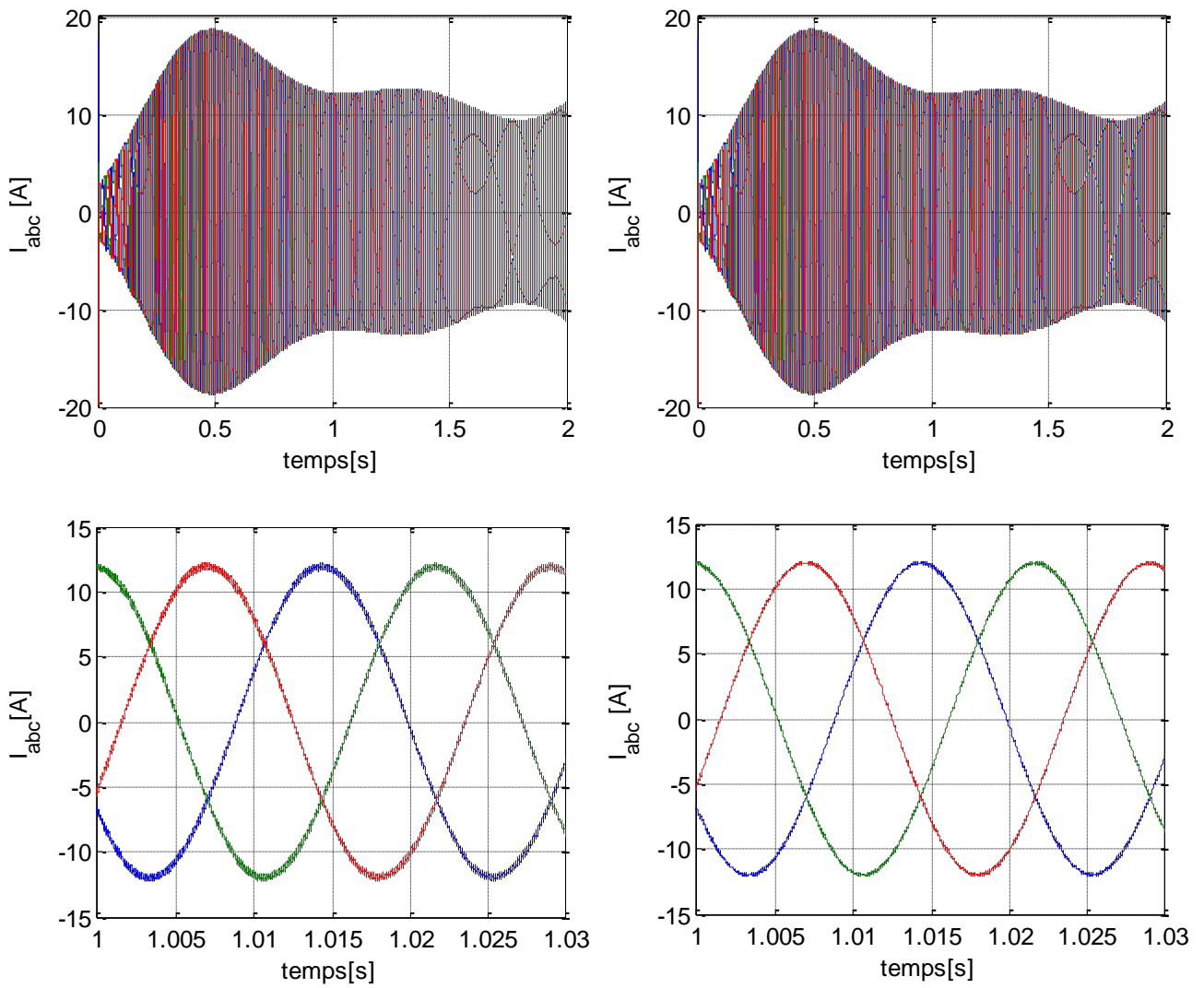


Figure I.22: Courant statorique de la GSAP.

### **I.10.3 Interprétation**

Les résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable sont exposés dans cette partie afin d'évaluer le fonctionnement global de la chaîne. Le résultat du contrôle de la vitesse de rotation de la **GSAP** illustré dans la **figure I.17** et du couple électromagnétique est illustré dans la **figure I.18**, Cela démontre que l'éolienne est parfaitement adaptée aux variations du vent, grâce à la méthode de contrôle **MPPT** suggérée. En appliquant la commande vectorielle à la **GSAP**, un découplage et synthèse des régulateurs **PI** qui donne la réponse des deux composantes un courant direct (nulle) et quadratique (l'image du couple), les courants  $i_d$  et  $i_q$  respectent parfaitement leurs références (**Figure I.19** et **I.20**).

Les figures **Figure I.21** et **I.22** présentant les résultats de simulation de puissance électromécanique et des courant  $I_{s_{abc}}$  du système sont sinusoïdaux.

Les signaux de sortie des onduleurs à trois niveaux sont lisses (avec des performances plus élevées), ce qui pourrait diminuer les perturbations électromagnétiques et améliorer la qualité du signal, tout en réduisant les harmoniques dans le courant triphasé.

### **I.11 Conclusion**

Ce chapitre se concentre sur la modélisation des composants de base d'un système éolienne, le générateur synchrone à aimants permanents (**GSAP**), la turbine avec la commande globale du système, ce système est contrôlé par la commande vectorielle qui nous permet de faire un découplage entre le couple et le flux pour assurer une commande efficace.

En utilisant les deux topologies d'onduleurs, à savoir à deux et à trois niveaux. Par la suite, nous avons reçu les résultats de nos simulations qui ont prouvé notre aptitude à exploiter pleinement l'énergie.

Finalement, nous avons comparé les deux types d'onduleurs.

## *Références bibliographiques*

- [1] Mirecki, Adam, « Etude Comparative De Chaînes De Conversion D'énergie Dédiées A Une Eolienne De Petite Puissance », Thèse De Doctorat, l'institut national polytechnique- Toulouse, 2005.
- [2] Nejjari, Hamid, And Mohamed El Hachemi Benbouzid. "Monitoring And Diagnosis Of Induction Motors Electrical Faults Using A Current Park's Vector Pattern Learning Approach." IEEE Transactions On Industry Applications 36.3, pp 730-735 ,2000.
- [3] Mohamed Adjoudj Et Al ,« Commande Par Mode Glissant D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation Montée Dans Une Eolienne », Revue Nature Et Technologie 2, N° 1, pp 27-34,2010.
- [4] Brice Beltran, « Contribution A La Commande Robuste Des Eoliennes A Base De Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique Au Mode Glissant d'Ordre Supérieur »,Thèse Doctorat ,Université De Bretagne Occidentale-Brest, 2010.
- [5] Manwell, James F., Jon G. MCGowan, and Anthony L. Rogers, « Wind Energy Explained: Theory, Design and Application », University Of Massachusetts-USA, 2010.
- [6] Cherif Bennour, « Simulation De La Commande Vectorielle Par Régulateurs A Mode Glissant D'une Chaîne Éolienne A Base D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation », Mémoire Master, Université Mohamed Khider -Biskra, 2012.
- [7] Guy, Cunty. «Eoliennes Et Aérogénérateurs, Guide De L'énergie Eolienne»,Edisud, Ed., France, p37, 2001.
- [8] Ghedamsi Kaci ,« Contribution A La Modélisation Et La Commande D'un Convertisseur Direct De Fréquence : Application A La Conduite De La Machine Asynchrone », Thèse De Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [9] Messaoud Mayouf, « Etude Comparative Des Architectures Et Strategies De Controle D'un Aerogenerateur Synchrone A Aimants Permanents » ,Thèse De Doctorat, Université De Batna-2, 2014.
- [10] Abbes, Hanen, Et Al, «Etude Comparative De Cinq Algorithmes De Commande MPPT Pour Un Système Photovoltaïque." Journal Of Renewable Energies 17.3, pp 435-445, 2014.
- [11] Abd El Karim Chaouech, « Contrôle D'un Aérogénérateur », Mémoire Master, Université Mohamed Khider-Biskra 2019.
- [12] S. Denis, « Commande Vectorielle De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire Master, Université Saad Dahlab- Blida, 2016.

## *Références bibliographique*

---

- [13] A. K. Sekouane, « Amélioration De La Qualité D'énergie A L'aide D'un Filtre Actif Appliqué Dans Une Chaîne De Production Eolienne Connecté Au Réseau Electrique », Thèse De Doctorat, Université Ibn Khaldoun -Tiaret, 2018.
- [14] M. Camara, M. B. Camara, B. Dakyo, Et H. Gualous, « Modélisation Et Commande D'une Génératrice Synchrones A Aimant Permanent Pour La Production Et L'injection De L'énergie Offshore Dans Un Réseau », Sge2014, Ens Cachan 8.10, 2014.
- [15] S. Belaid, Promotrice, F. Ouatmani, Et N. Touahria, « Contrôle D'un Système Eolien Connecté Au Réseau », Mémoire Master, Université Abderahmane Mira-Bejaia, 2020.
- [16] H. Abdelhadi Et A. Bakki, « Commande D'un Système Eolien Basé Sur GSAP Alimentée Par Un Convertisseur Multicellulaire. », Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun –Tiaret, 2020.
- [17] M. M. Nadjib Et H. C. Eddine, « Modélisation Et Simulation D'un Système Photovoltaïque En Fonctionnement Autonome Et Connecté Au Réseau », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2013.
- [18] Assam Azzeddine Mdm Ben Smail.SBoukermaRedouane « Optimisation Et Commande D'une Chaîne De Conversion Eolienne Par La Logique Floue Adaptative », Mémoire Master, Université De Bouira, 2018/2019.
- [19] C. Benzazah, M. A. Lafkih, Et L. Lazrak, « Etude Comparative Entre Deux Topologies D'onduleurs Triphasés, Classique A 2-Niveaux Et NPC A 3-Niveaux Avec Deux Différentes Méthodes De Commande MLI-ST Et SWM », International Journal Of Innovation And Applied Studies 9.2, pp 841-852, 2014.
- [20] Djafri, Fatima, et Habiba Kouachi. Commande par Mode Glissant Super-Twisting d'une GSAP utilisée dans une chaîne éolienne alimentée par convertisseurs Multi-niveaux. Mémoire Master Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2020.
- [21] H. Brighen Et S. Halaimia, « Etude Et Analyse De La Commande Des Onduleurs Multi-Niveaux Par MLI Sinusoïdale », Mémoire Master, Université Larbi Tebssi-Tebessa, 2016.
- [22] Khaled, Saidoun, and Si Moussi Mourad. «Commande MLI d'un onduleur multi-niveaux. », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, 2015.

# **Chapitre II : Commande d'une chaîne éolienne connecté au réseau**



## II.1 Introduction

Afin de pouvoir étudier et modéliser le système de conversion d'énergie éolienne isolée, et de tester l'algorithme de commande **MPPT** sur une plateforme de simulation, il est essentiel d'injectée au réseau électrique la puissance extraite par éolienne pour une production d'énergie plus propre et renouvelable.

La **GSAP** est reliée au réseau à travers deux convertisseurs redresseur et onduleur, comme illustré dans la figure suivante. La vitesse de rotation de l'éolienne et le couple sont contrôlés par le convertisseur côté machine (**CCM**), tandis que le convertisseur côté réseau (**CCR**) gère la puissance et la tension du bus continu. Cette interface permet de séparer les commandes requise soit du côté réseau ou côté génératrice. Dans ce chapitre, nous allons examiner la commande de **CCR** [1].

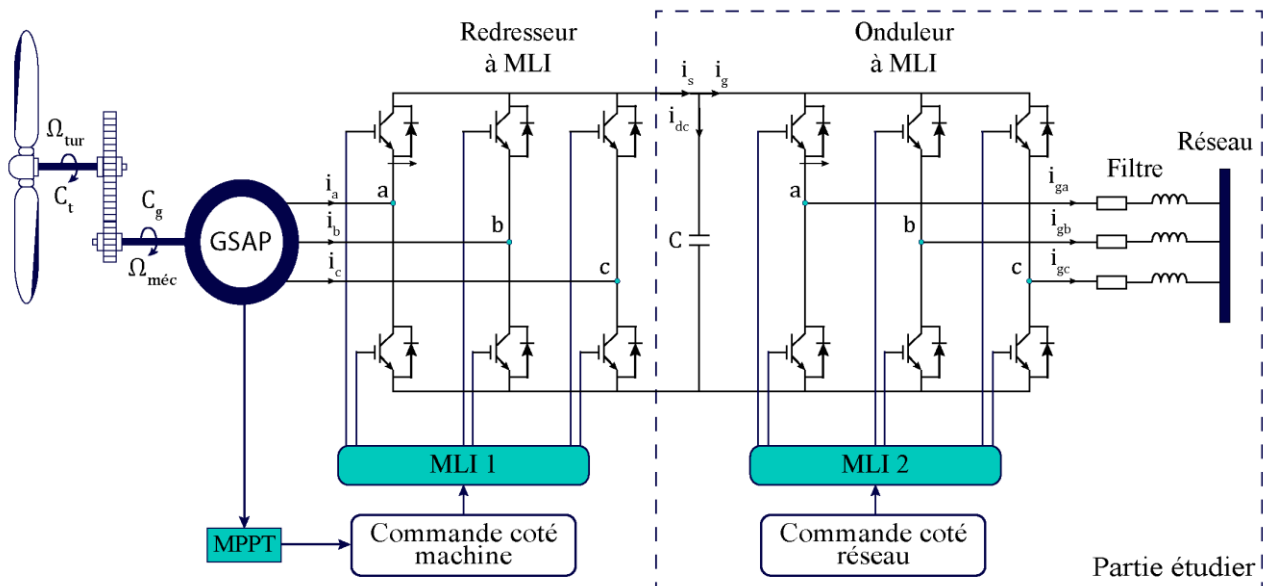


Figure II.1: architecture de commande du système éolien.

## II.2 Modélisation des éléments du réseau

### II.2.1 Modélisation de bus continu

Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure ci-dessous nous montre que le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur.

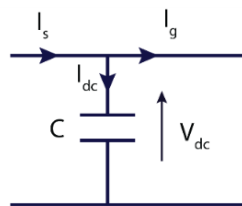


Figure II.2: Schéma électrique du bus continu.

Avec :

$i_s$  : Le courant du bus continu du coté générateur.

$i_g$  : Le courant du bus continu du coté réseau.

$C$  : La capacité du condensateur de bus continue.

On peut représenter le bus continu en utilisant la tension aux bornes du condensateur, qui est obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante [2] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} \quad (II.1)$$

### **II.2.2 Modélisation du convertisseur coté réseau**

La fonction de l'onduleur est de convertir un signal d'entrée continu (**DC**) en un signal de sortie alternatif (**AC**). Grâce à la régulation des états passant et bloqué des transistors, il est possible d'obtenir une tension alternative qui se distingue par la fréquence requise pour alimenter la charge. La commande **MLI** fournit le signal de commande de ces derniers.

La machine est alimentée à différentes fréquences grâce à un convertisseur statique, généralement continu-alternatif, qui joue un rôle crucial dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il est possible que la source d'entrée soit une source de courant ou une source de tension, ce qui entraîne la création d'une onde de tension avec des caractéristiques particulières en termes d'amplitude de fréquence et de contenu harmonique. Ainsi, un onduleur est une source de tension qui peut être régulée en termes d'ampleur et de fréquence.

Les onduleurs de tension sont devenus des convertisseurs d'interface de ligne **AC/DC/AC** dans les énergies renouvelables, c'est un élément essentiel dans les systèmes électriques connecté au réseau, lui donne les caractéristiques clés suivantes :

- Courant de sortie presque sinusoïdal.
- Faible distorsion harmonique du courant de ligne ( $\text{THD} \leq 5\%$ ).
- Flux de puissance bidirectionnel [2] [3].

### **II.2.3 Modélisation du filtre**

Ce filtre passif série triphasé ( $R_f$  et  $L_f$ ) est connecté entre le convertisseur de puissance et le réseau électrique (**Figure II.3**) afin de réduire la propagation des harmoniques dans le réseau [4].

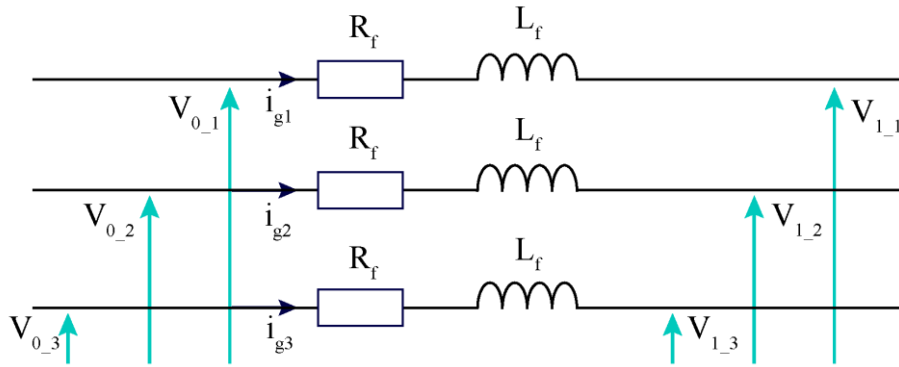


Figure II.3: Schéma électrique du filtre de liaison au réseau.

$V_0$  et  $V_1$  représentent respectivement la tension du côté onduleur et du côté réseau.

Dans le repère triphasé, les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{bmatrix} V_{0,1} \\ V_{0,2} \\ V_{0,3} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{1,1} \\ V_{1,2} \\ V_{1,3} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

### II.2.4 Modélisation du réseau

Un circuit triphasé reçoit trois tensions sinusoïdales de même fréquence et déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres. Le système triphasé est dit équilibré lorsqu'il est formé de trois grandeurs ayant la même valeur efficace (ou la même amplitude). Les tensions triphasées du réseau électrique sont écrites comme suit : [5]

$$\begin{cases} V_a = V_{eff} \sqrt{2} (\omega t) \\ V_b = V_{eff} \sqrt{2} (\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_{eff} \sqrt{2} (\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.4)$$

### II.3 Régulateur de la tension de bus continue

La stratégie de contrôle de la tension du bus continue est illustrée sur la figure II.4 : [6]

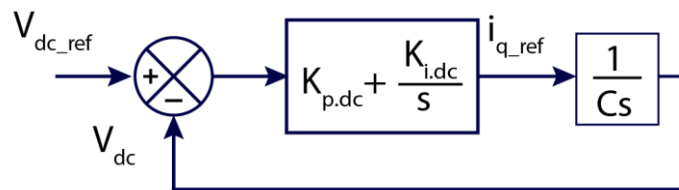


Figure II.4: Boucle de régulation de la tension de bus continu.

$$FTBO_{dc}(s) = (K_{p,dc} + \frac{K_{i,dc}}{s}) \cdot \frac{1}{Cs} \quad (II.5)$$

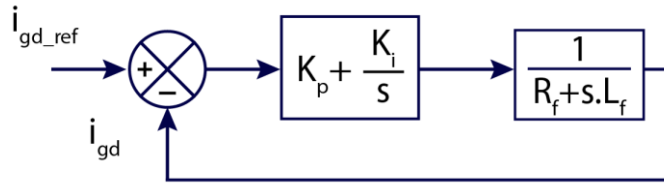
$$FTBF_{dc}(s) = \frac{K_{p\_dc}s + K_{i\_dc}}{Cs^2 + K_{p\_dc}s + K_{i\_dc}} = \frac{\frac{1}{C}(K_{p\_dc}s + K_{i\_dc})}{s^2 + \frac{K_{p\_dc}}{C}s + \frac{K_{i\_dc}}{C}} \quad (II.6)$$

Par identification de l'équation (II.6) à la forme canonique du 2<sup>ème</sup> ordre, on trouve :

$$\begin{cases} K_{p\_dc} = 2\xi\omega_0 C \\ K_{i\_dc} = \omega_0^2 C \end{cases} \quad (II.7)$$

#### II.4 Synthèse du régulateur des courants du filtre

Le schéma bloc de la boucle de régulation du courant direct du filtre est illustré par la **figure II.5** en supposant que le découplage par compensation est correctement effectué [7] [6].



**Figure II.5:** Boucle de régulation de la tension de bus continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par:

$$FTBO_{Filtre}(s) = \left(K_{p\_f} + \frac{K_{i\_f}}{s}\right) \cdot \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (II.8)$$

On peut écrire la fonction par l'expression suivante :

$$FTBO_{Filtre}(s) = \frac{K_{i\_f}}{s} \left(1 + \frac{K_{p\_f}}{K_{i\_f}} s\right) \cdot \frac{1}{R_f} \cdot \frac{1}{1 + \tau} \quad (II.9)$$

Avec :  $\tau = \frac{L_f}{R_f}$

Par la méthode de la compensation pôle-zéro en boucle ouverte, la constante de temps est égale à :

$$\tau = \frac{K_{p\_f}}{K_{i\_f}} \quad (II.10)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient:

$$FTBO_{Filtre}(s) = \frac{K_{i\_f}}{R_f \cdot s} \quad (II.11)$$

La fonction de transfert en boucle fermée devient:

$$FTBF_{Filtre}(s) = \frac{\frac{K_{i\_f}}{R_f \cdot s}}{1 + \frac{K_{i\_f}}{R_f \cdot s}} = \frac{K_{i\_f}}{R_f \cdot s + K_{i\_f}} = \frac{1}{\frac{R_f}{K_{i\_f}} s + 1} = \frac{1}{\tau_f \cdot s + 1} \quad (II.12)$$

Avec la constant du temps  $\tau_f$  en boucle fermée :  $\tau_f = \frac{R_f}{K_{i_f}}$

Alors on trouve:

$$\begin{cases} K_{i_f} = \frac{R_f}{\tau_f} \\ K_{p_f} = \tau \cdot K_{i_f} \end{cases} \quad (II.13)$$

## II.5 Synchronisation du courant de l'onduleur avec la tension du réseau

Il est essentiel de synchroniser le courant généré à la sortie de l'onduleur avec la tension du réseau pour connecter le système éolien au réseau électrique. Pour cela, on utilise une boucle de contrôle à verrouillage de phase (**PLL**), comme illustré dans la **figure II.6**. L'objectif de cette boucle est d'évaluer la phase de tension instantanée du réseau en éliminant la composante en quadrature de la tension du réseau  $V_q$ . Ainsi la phase estimée est en accord avec la composante directe de la tension  $V_d$ . Cette méthode comporte quelques inconvénients en cas de déséquilibre de tension ou de défauts sur le réseau. Dans le cadre de cette étude, nous considérons que le réseau est en bon état de fonctionnement.

Le raccordement aux réseaux électriques nécessite la prise en compte des conditions de couplage pour injecter l'énergie électrique produite par l'éolienne. Ces conditions de couplage sont résumées comme suit :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces.
- L'égalité de fréquences.
- Un déphasage nul entre elles.
- En triphasé, même succession des phases [8] [9].

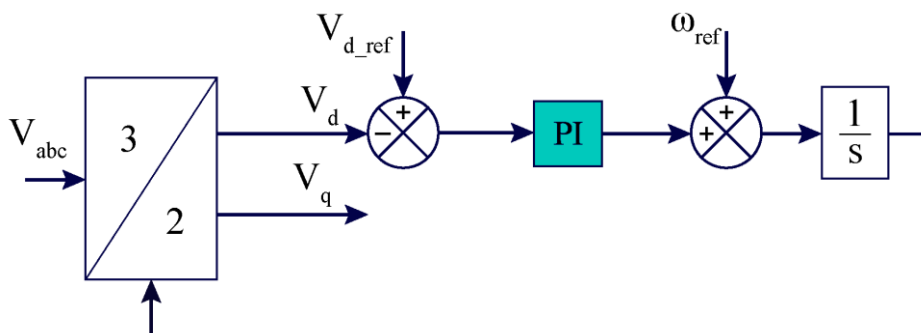


Figure II.6: Schéma fonctionnel de la boucle verrouillage de la phase.

## II.6 Stratégie de commande des puissances injectées au réseau

L'injection de la puissance électromagnétique extraite du vent est assistée par l'onduleur de tension triphasé qui assure la phase d'injection par les deux tâches suivantes :

- La synchronisation du système, qui permet d'éliminer certains harmoniques et d'équilibrer le réseau électrique.
- Commander les interrupteurs statiques afin d'injecter la puissance de référence au réseau, avec un facteur de puissance plus proche de l'unité [6].

Un convertisseur **MLI** et un filtre triphasé sont utilisés pour connecter cette énergie extraite du vent au réseau triphasé. Le rôle du convertisseur est de maintenir la tension du bus continu constante, peu importe l'amplitude et le sens de la puissance, en générant le courant de charge nécessaire au condensateur, en particulier lors de la phase de démarrage, en contrôlant les courants qui traversent le réseau via le filtre [10].

### **II.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau par la commande vectorielle**

Dans la commande vectorielle des courants, dans le repère de Park, en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau. Le convertisseur est commandé de manière à imposer des références aux tensions simples à partir de la mesure de la tension du bus continu.

La commande se trouve simplifiée parce que le vecteur de courant est fixe dans l'espace de référence en rotation  $dq$ . Les contrôleurs de type **PI** agissent sur des signaux continus plutôt que sur des signaux sinusoïdaux.

Les deux contrôleurs de courant vont permettre de contrôler indépendamment la puissance active et réactive fournie au réseau, pour la composante  $d$  est imposée à zéro. Ceci oblige le vecteur spatial de courant à être exclusivement dans la direction  $q$  (assure que la puissance réactive est minimisée ou annulée). Puisque seulement la composante  $q$  du courant transporte de la puissance active, ceci maximise le facteur de puissance. Le contrôleur **PI** qui opère sur la composante de courant  $q$  prend comme entrée le courant de référence. Ceci oblige la composante  $q$  à suivre le courant sinusoïdal de référence [11].

Le système de commande doit répondre aux objectifs suivants:

- Maintenir une tension constante du bus continu.
- assurer un contrôle indépendant et précis des puissances active et réactive circulant entre le convertisseur et le réseau.
- Minimisation de la puissance réactive et améliorée le facteur de puissance
- Avoir des courants sinusoïdaux au côté réseau, d'amplitude et fréquence définies [10] [12].

## II.7 Résultats de simulation et interprétation

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulations effectuées sur le système d'éolienne connecté au réseau. La simulation nous a permis de vérifier et de tester la commande de **CCR** (pour les deux topologies d'onduleur deux et trois niveaux) et l'injection de puissance extraite par le système éolienne au réseau électrique après le filtrage.

Les paramètres du système sont donnés à l'annexe avec les schémas bloc de simulation.

### II.7.1 Résultats d'onduleur deux et trois niveaux

Nous exposerons les résultats des simulations réalisées sur un système d'éolienne connecté au réseau dans cette section. Ces simulations ont été réalisées dans le but d'évaluer le fonctionnement global du système pour les deux topologies d'onduleurs, à savoir les onduleurs à deux niveaux (à gauche) et à trois niveaux (à droite).

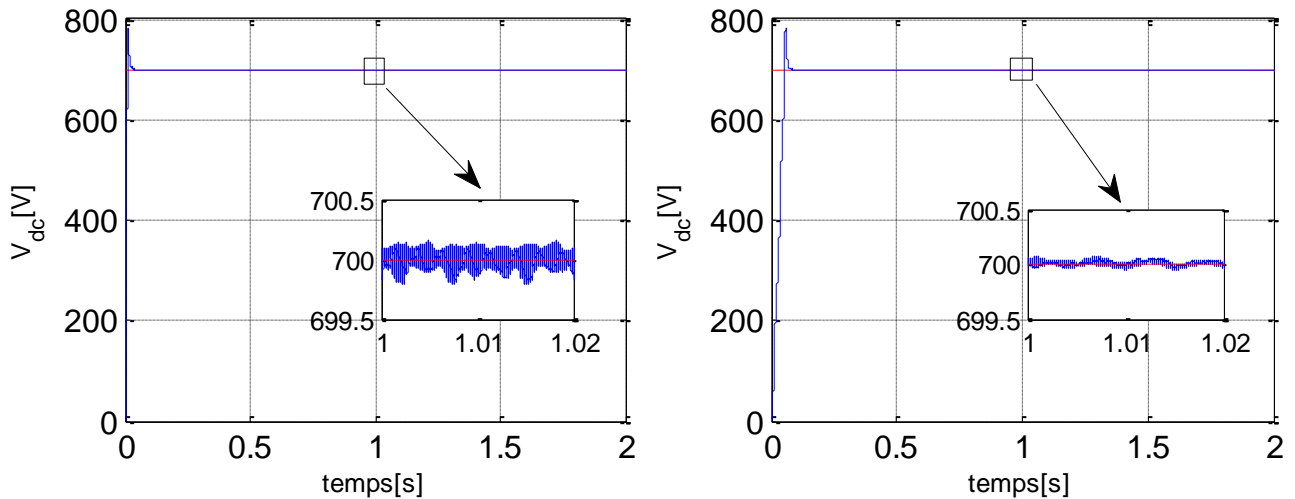
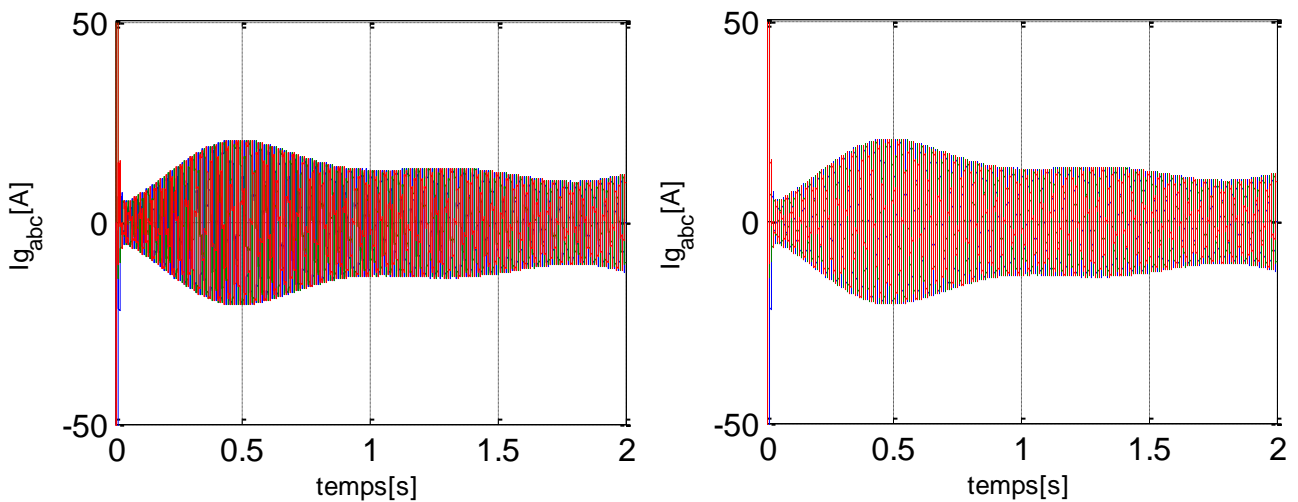


Figure II.7: Tension de bus continu  $V_{dc}$ .



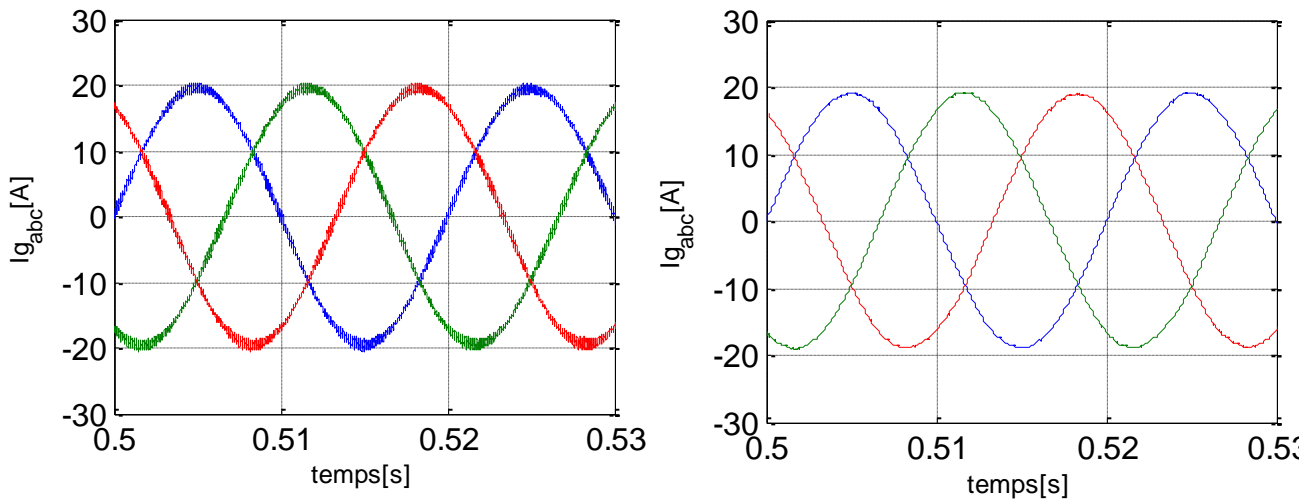


Figure II.8: Courant triphasée injecté au réseau.

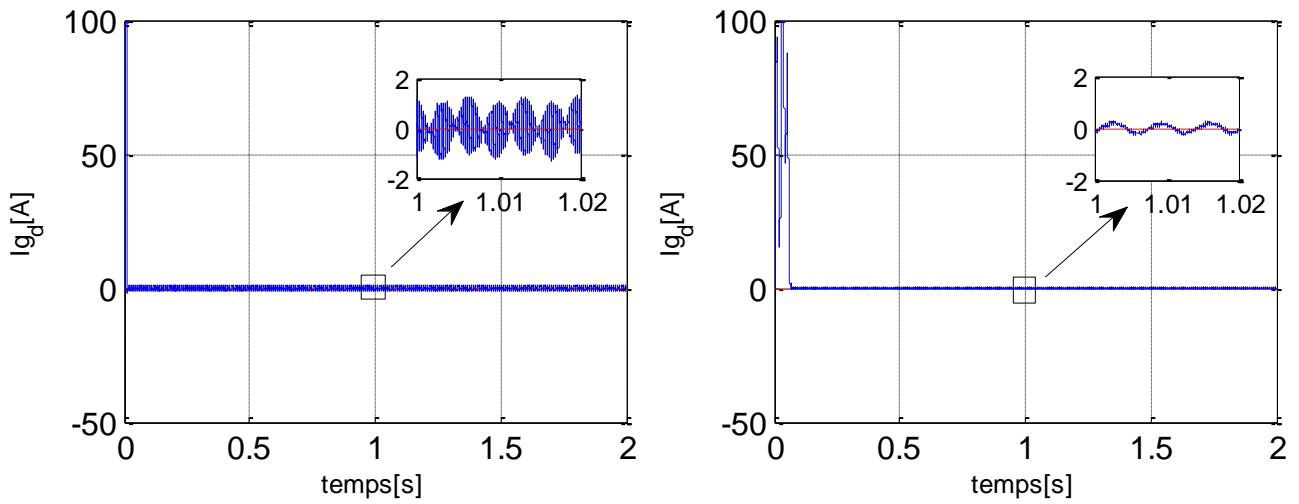


Figure II.9: Courant direct injecté au réseau.

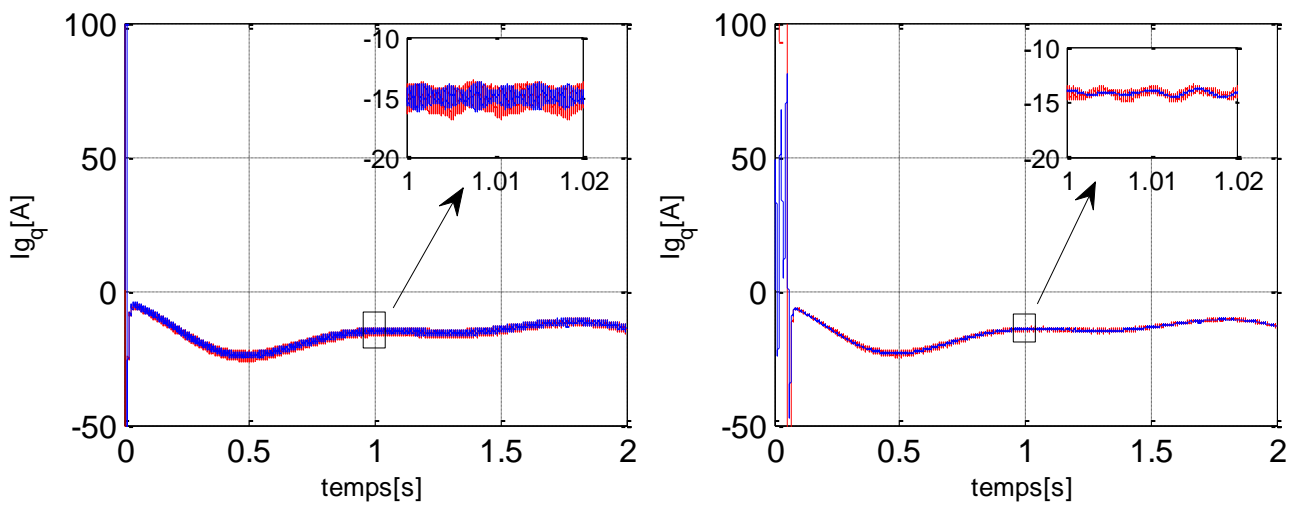


Figure II.10: Courant quadratique injecté au réseau.



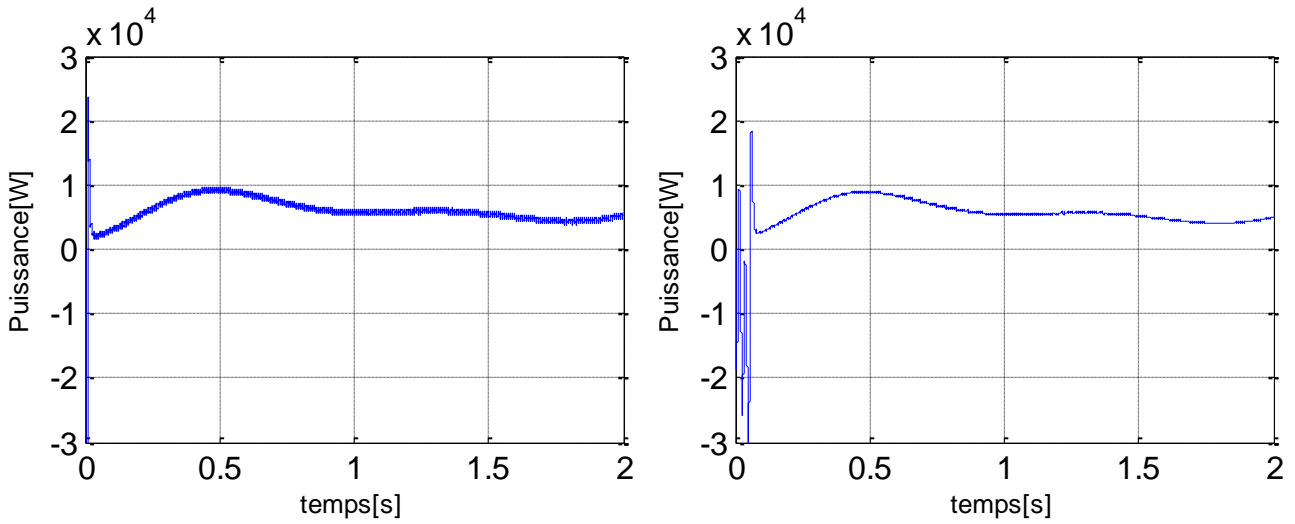


Figure II.11: Puissance active injecté au réseau.

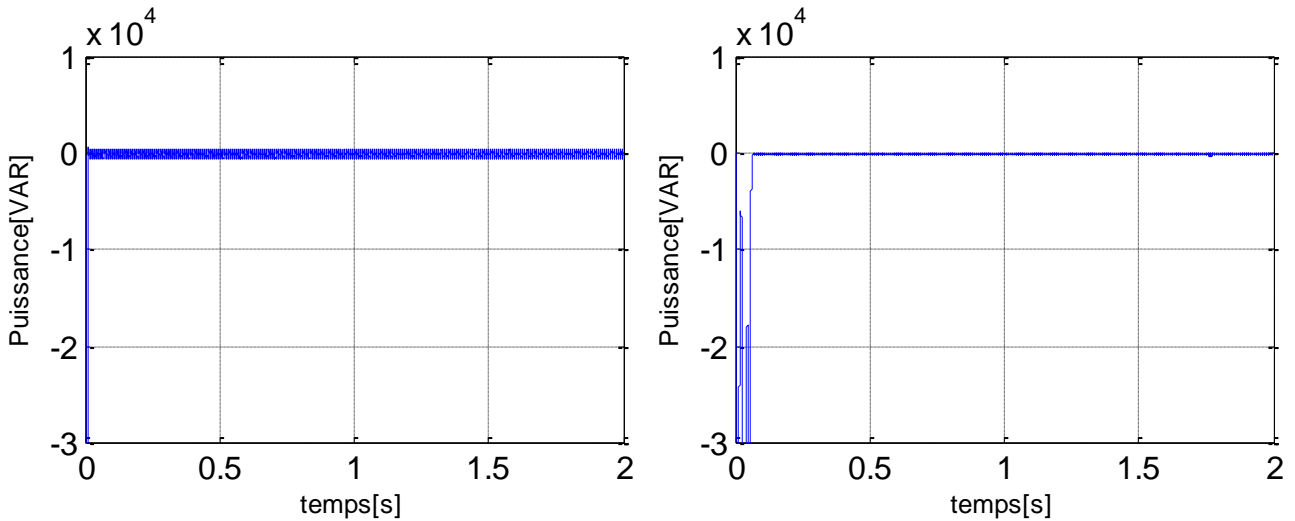


Figure II.12: Puissance réactive injectés au réseau.

### II.7.2 Interprétation

La tension de bus continu  $V_{dc}$  reste constante à une valeur de référence 700 V, avec faible oscillations causées par la variation de la vitesse de vent (**figure II.7**), elle est visiblement conforme à sa référence et n'est pas influencée par les fluctuations de la vitesse du générateur.

Les **figures II.8** donne l'évolution des courants injectés au réseau, ces courants sont sinusoïdaux et en phase avec la tension du réseau de fréquence de 50 Hz, on remarque que l'onduleur trois niveau donne des bonnes résultats par rapport au l'onduleur deux niveaux, ce qui montre que les onduleurs 3 niveaux en général , ils proposent des résultats plus performants en ce qui concerne la qualité de l'onde de sortie, la réduction des harmoniques et parfois l'efficacité énergétique par rapport aux onduleurs à 2 niveaux.

À partir des figures II.9 et II.10, la synthèse des régulateurs PI donnent la réponse des deux composantes du courant direct et quadratique, Les courants suivent parfaitement leurs références en appliquant le découplage coté réseau par la commande vectorielle.

L'évaluation de la puissance réactive absorbée par le système ou transmise au réseau est illustrée dans la figure II.12. La puissance réactive est clairement en accord avec sa référence ( $Q = 0$ ). La forme de la puissance active reflète la vitesse du vent et la puissance générée par la turbine (figure II.11).

### II.7.3 Comparaison entre l'onduleur à deux et à trois niveaux

Dans les figures ci-dessous, L'analyse spectrale du signal de courant  $I_{gabc}$  injecté au réseau par l'onduleur deux et trois niveaux à vitesse du vent fixe nous à permet de calculer le taux d'harmoniques THD, 1.21 % pour l'onduleur NPC à trois niveaux a permis d'améliorer la qualité d'onde et de réduire les harmoniques dans le courant du réseau par contre 4.72 % pour l'onduleur classique à deux niveaux.

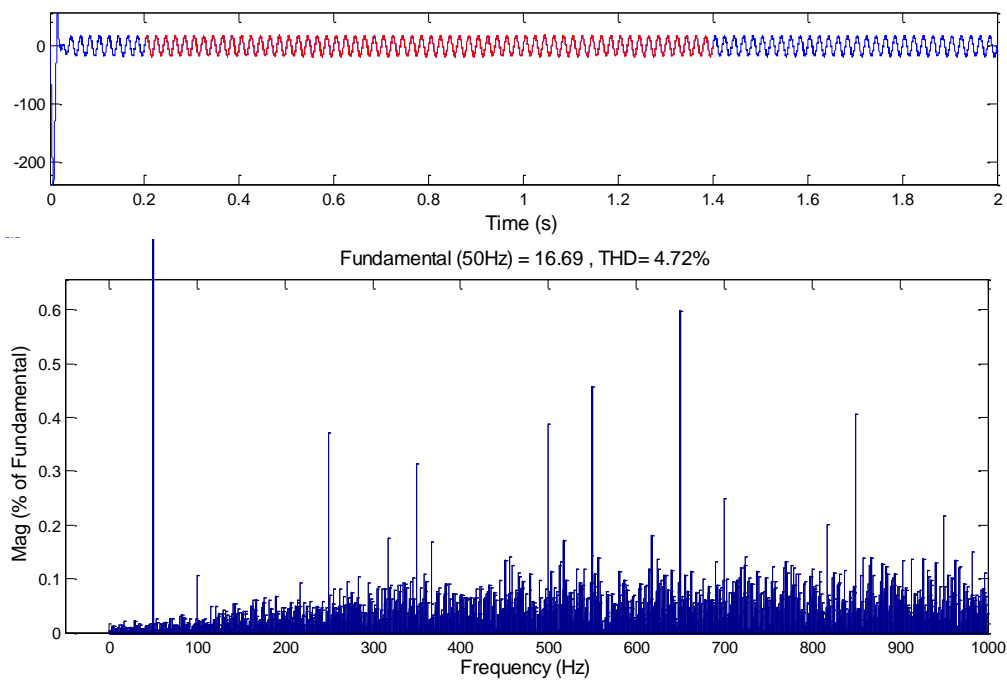


Figure II.13: THD du signal de courant de l'onduleur à deux niveaux.

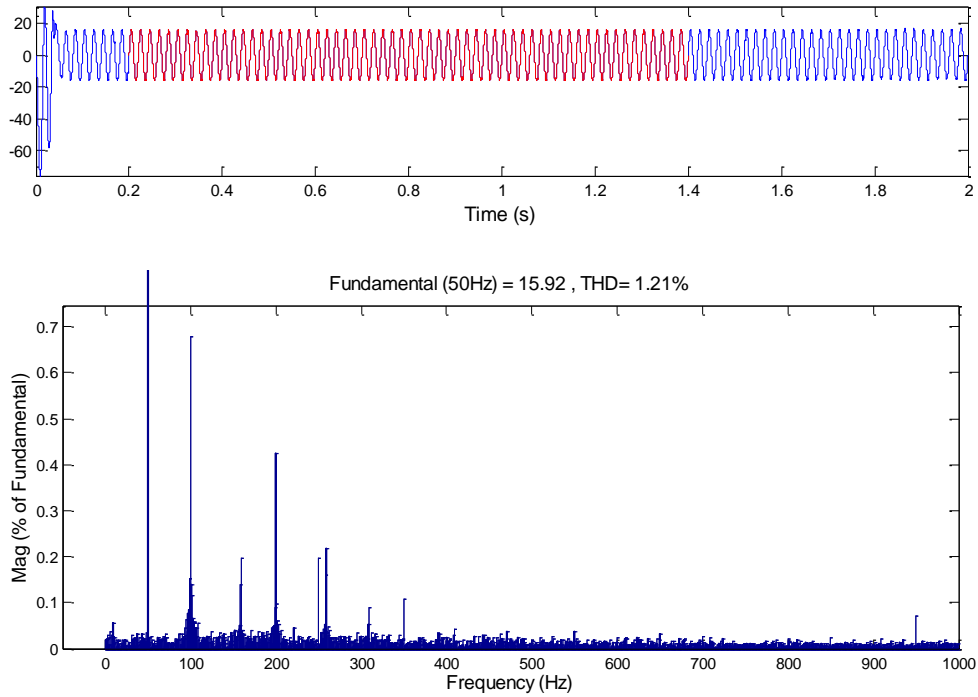


Figure II.14: THD du signal de courant de l'onduleur à trois niveaux.

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudiés la commande d'un onduleur à deux et à trois niveaux puis on a développé la commande à tension orientée pour l'onduleur connecté au réseau électrique.

Ensuite nous avons présentés une étude sur les onduleurs à deux et à trois niveaux, pour constater ces avantages et l'influence de l'augmentation du nombre des interrupteurs, pour le cas où l'onduleur est connecté au réseau, en a remarqué que le bus continu d'entrée à l'onduleur est bien commander

Nous avons effectué une simulation des deux topologies de convertisseurs, ce qui nous a permis de constater que la forme d'onde approche de la sinusoïdale avec l'augmentation des niveaux de tension de l'onduleur, et qu'aussi la réduction du taux d'harmoniques, on nous a démontré aussi comment exploiter pleinement l'énergie du vent.

Finalement, nous avons comparés les deux topologies d'onduleurs.

## *Références bibliographiques*

- [1] Camara, Morlaye, M.B. Camara, Brayima Dakyo, et Hamid Gualous. « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau » Université Le Havre, Le Havre, France, 9 juin 2014.
- [2] Sekouane, Asmaa Khoulood. « Amélioration de la qualité d'énergie à l'aide d'un filtre actif appliqué dans une chaîne de production éolienne connecté au réseau électrique ». Mémoire De Master, Université Ibn Khaldoun -Tiaret- 2018.
- [3] Mahammedi Fares. « Commandes directes de puissance d'un système PV connecté au réseau électrique à base d'un onduleur NPC à trois niveaux ». Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah -Ouargla- 2022.
- [4] Belaid, S promotrice, Fouad Ouatmani, et Nadir Touahria. « Contrôle d'un système éolien connecté au réseau ». Mémoire De Master, Université Abderahmane MIRA de Bejaia, 2020.
- [5] Nadjib, Mechalikh Med, et HAMADA Charaf Eddine. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Mémoire De Master, Université Kasdi Merbah-Ouargla- 2013.
- [6] Abdelhadi Hakim, Bakki Abdelmadjid, « Commande d'un système éolien basé sur un GSAP alimentée par un convertisseur multicellulaire », Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret-2020.
- [7] S. Oguiba et M. Herouala, « Contrôle et Diagnostic du convertisseur DC/AC d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une GSAP connectée au réseau », Mémoire De Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2022.
- [8] Abdelhafid, M Baydi, M Gherbi Ahmed, M Hemsas Kamel Eddine, et M Hachemi Mabrouk. « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas -Setif- 2012.
- [9] Benhalima, Seghir. « Modélisation et contrôle des systèmes éoliens-solaire intégrés au réseau VSC-HVDC » thèse doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, 2019.
- [10] Ahmed, Tahri. « Contribution à l'identification et à la commande robuste des génératrices synchrones à aimants permanents associées aux générateurs éoliens » Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun -Tiaret- 2018.
- [11] Thibault, Robert. « Contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdal Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, 2006.

## *Références bibliographique*

---

[12] Berhails, Abdelkader. « Commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2020.

# **Chapitre III : Diagnostic des Défaits des Convertisseurs**

### **III.1 Introduction**

L'électronique de puissance offre une diversité significative grâce à ses convertisseurs statiques, qui sont largement utilisés dans divers secteurs industriels pour optimiser la conversion d'énergie. Ces convertisseurs se divisent généralement en deux catégories : les redresseurs non commandables, comprenant les diodes, et les redresseurs commandables, tels que les thyristors, les triacs et les transistors.

L'étude des pannes des onduleurs à deux et trois niveaux côté réseau, en particulier les défauts de circuit ouvert, est essentielle pour améliorer la fiabilité et la performance des systèmes de conversion d'énergie. Cette analyse permet d'identifier les causes des défaillances et de développer des stratégies de maintenance et de prévention adaptées.

Les commandes appropriées sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement d'un onduleur, comme la commande **MLI**, mais ce fonctionnement peut rencontrer des problèmes en raison du défaut des composants de puissance (semi-conducteur) lui-même ou de la commande. Ces imperfections peuvent être évitées grâce à des analyses et à un diagnostic approprié en utilisant différentes techniques. Ces dernières ont été créées dans le but de détecter les défauts, d'isoler l'élément défectueux et de garantir la continuité de l'utilisation. L'évolution de l'outil informatique a facilité l'utilisation de ces techniques [1].

### **III.2 L'IGBT**

L'**IGBT** est un transistor de puissance qui est activé par une tension appliquée à une électrode qui est isolée du circuit de puissance, appelée grille. Ce composant requiert de faibles énergies pour faire circuler des courants considérables. Actuellement, il s'agit du composant utilisé comme interrupteur tout ou rien dans la plupart des convertisseurs de fréquence, allant jusqu'à des puissances élevées [2].

### **III.3 Le défaut circuit ouvert d'un interrupteur IGBT**

Un des **IGBT** (supérieur ou inférieur) d'une cellule de commutation d'un bras peut rester ouvert en permanence (défaut de type circuit ouvert). Ce genre de problème est principalement causé par une panne de la commande rapprochée (comme un problème thermique du moteur ou une perte d'alimentation par exemple). En fonction de l'emplacement du défaut dans la cellule, il sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur **IGBT** supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut sur **IGBT** basse). Si le défaut est visible, la signature se manifeste par le changement d'un rapport cyclique  $\alpha$  à 0 ou à 1, mais seulement sur la cellule endommagée. La cellule défaillante se

retrouve alors en surtension, ce qui nécessite un arrêt du convertisseur afin d'éviter une propagation du défaut [3].

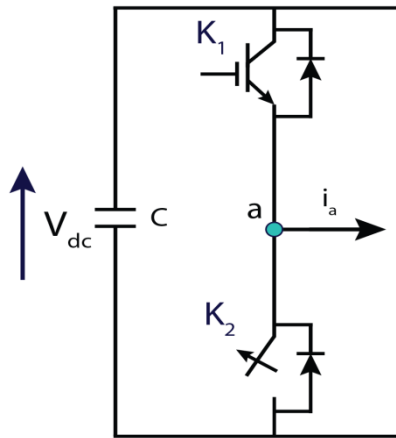


Figure III.1: Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras.

### III.4 Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert

#### III.4.1 Onduleur deux niveaux

La figure ci-dessous présente l'onduleur à deux niveaux ainsi que les abréviations des interrupteurs utilisés pour détecter les défauts.

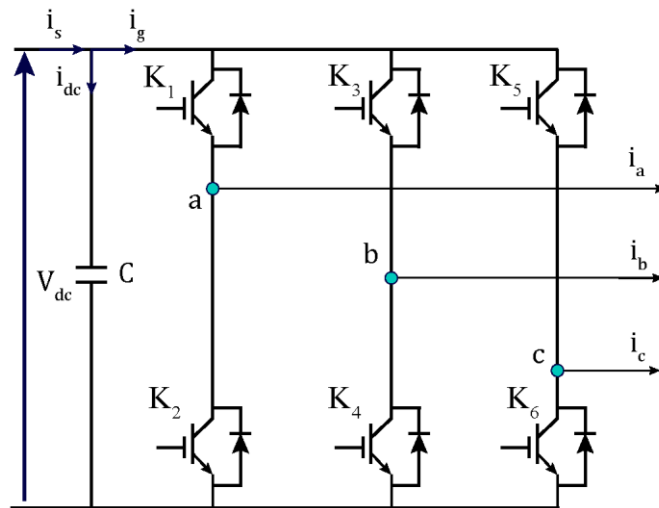
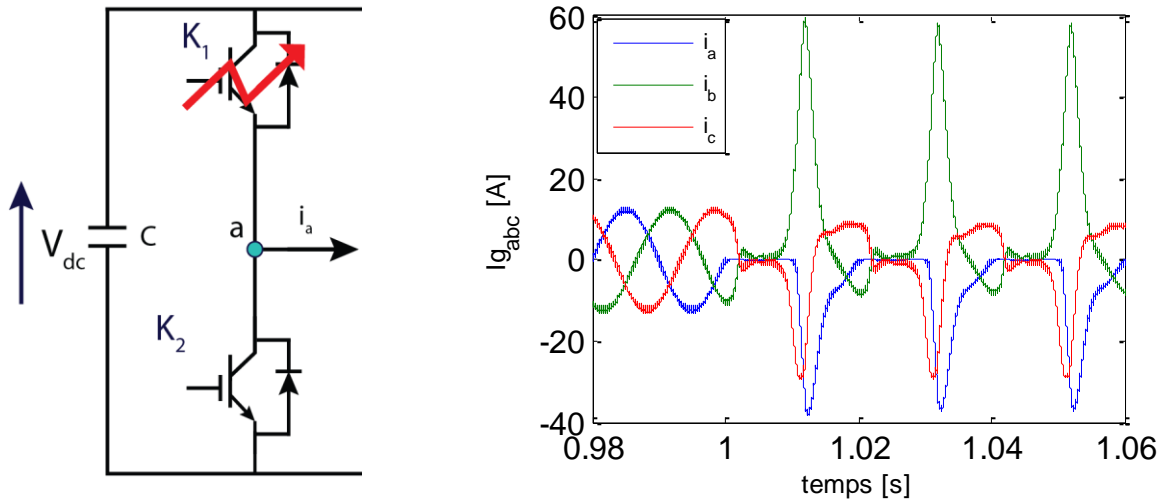


Figure III.2: Onduleur à deux niveaux.

Les résultats obtenus lors de la simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert pour un onduleur à deux niveaux dans les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  dû à l'instant  $t=1s$ , sont illustrés dans les figures suivantes.





**Figure III.3:** Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur  $K_1$ .

En mode normal de fonctionnement, les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  commutent complémentaires afin de produire une tension alternative à partir de la tension continue  $V_{dc}$ . La somme est un courant triphasé sinusoïdal et équilibré entre les trois phases.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (III.1)$$

Si l'interrupteur  $K_1$  du bras supérieur de la phase 1 présente un défaut de circuit ouvert, les conséquences suivantes se produisent :

Provoque des impulsions de courant positives élevées sur la phase 1 lorsque  $K_1$  est ouvert, avec des décharges négatives quand  $K_2$  se ferme.

L'onduleur ne peut plus produire un courant positif à la phase 1. Par conséquent, la sortie de l'onduleur sera limitée à un courant négatif (éliminera l'alternance positive de courant  $i_a$ ), ce qui signifie que la forme d'onde de sortie ne sera pas équilibrée.

$$i_a + i_b + i_c \neq 0 \quad (III.2)$$

Les courants des phases 2 et 3 sont perturbés par ces impulsions de courant élevées sur la phase 1, entraînant des déformations périodiques de leur forme d'onde.

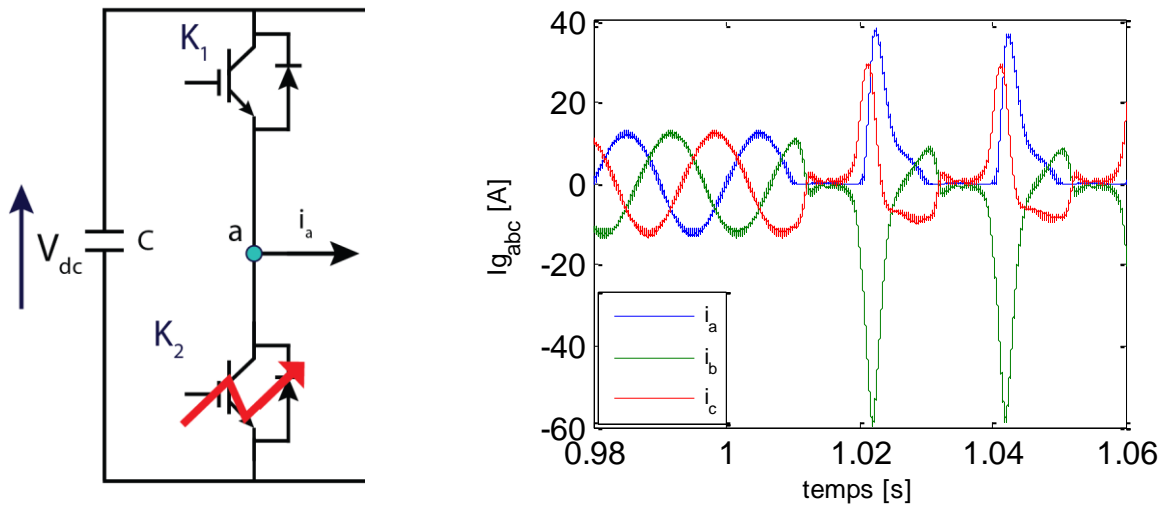


Figure III.4: Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur  $K_2$ .

Si l'interrupteur  $K_2$  du bras supérieur de la phase 1 présente un défaut de circuit ouvert, les conséquences suivantes se produisent :

L'onduleur ne peut plus produire un courant négatif à la phase 1. Par conséquent, la sortie de l'onduleur sera limitée à un courant positif (éliminera l'alternance négative de courant  $i_a$ ), Ce qui signifie que la forme d'onde de sortie ne sera pas équilibrée autour de zéro.

Entraîne des impulsions de courant négatives élevées sur la phase 1 lorsque  $K_2$  est ouvert, avec des décharges négatives quand  $K_1$  se ferme.

### III.4.2 Onduleur trois niveaux

La figure ci-dessous présente l'onduleur à trois niveaux ainsi que les abréviations des interrupteurs utilisés pour détecter les défauts.

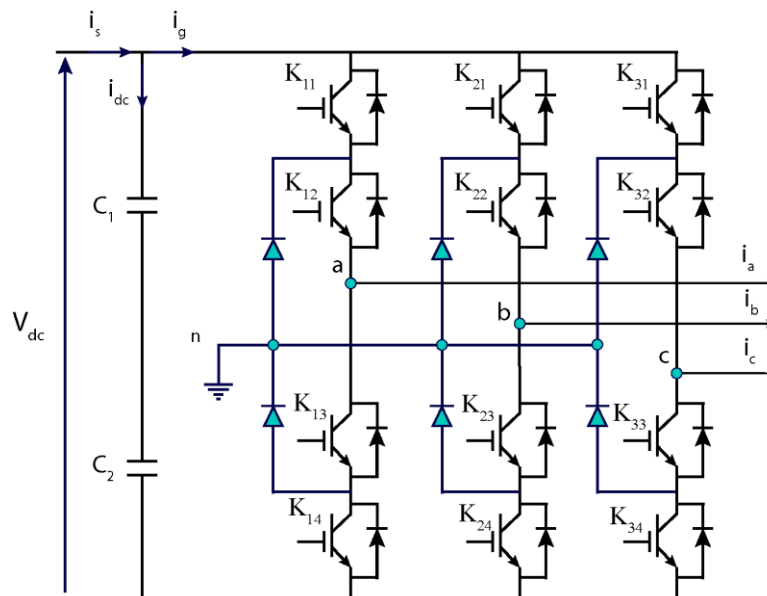


Figure III.5: Onduleur à trois niveaux

Les résultats obtenus lors de la simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec un défaut de circuit ouvert pour un onduleur à trois niveaux dans l'interrupteur  $K_{11}$  et  $K_{13}$  dû à l'instant  $t=1s$ , sont illustrés dans les figures suivantes.

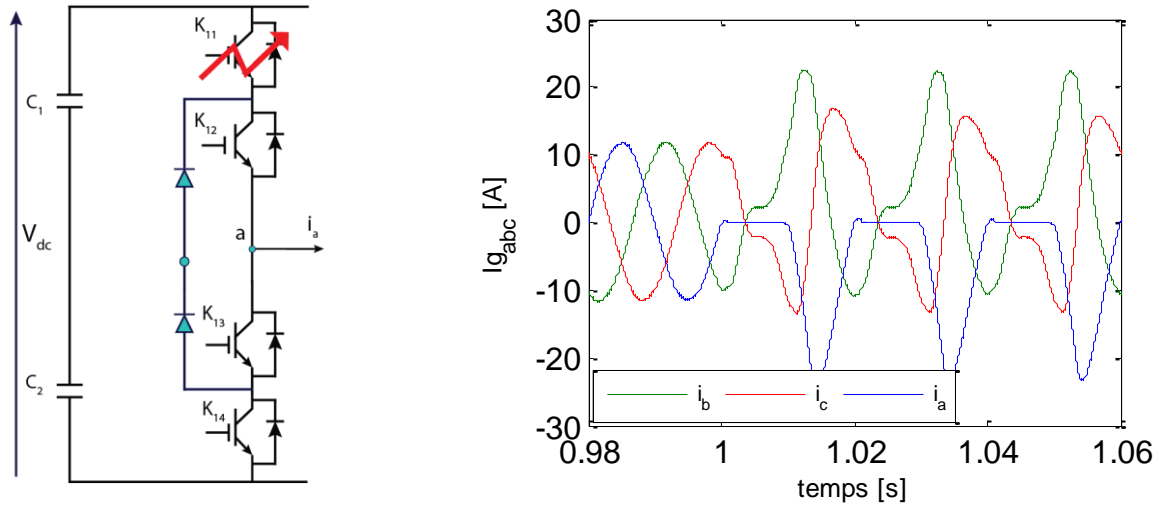


Figure III.6: Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur  $K_{11}$ .

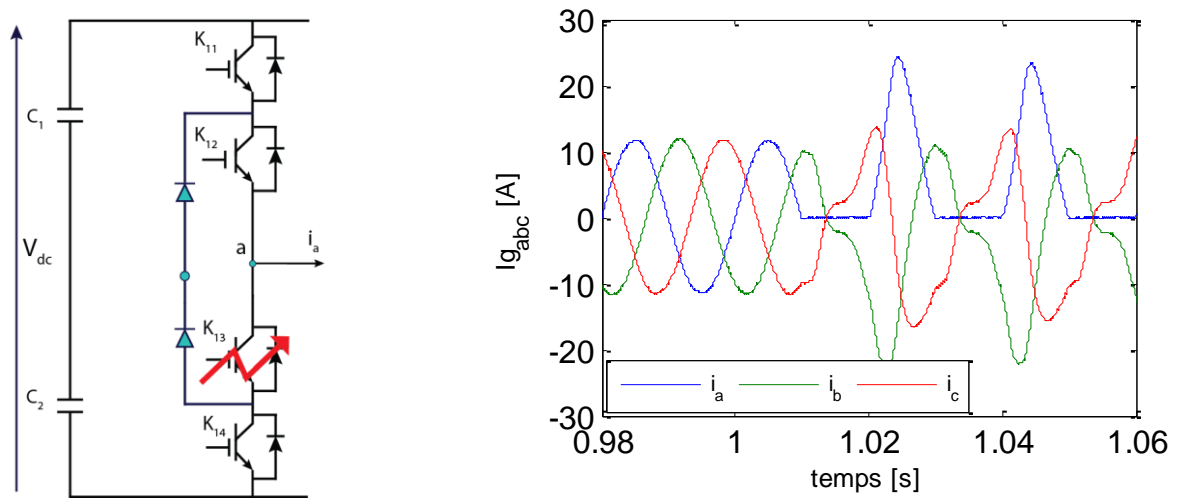


Figure III.7: Courant triphasé injecté au réseau dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur  $K_{13}$ .

Lorsqu'un interrupteur d'un demi-bas haut est en défaut, le courant de l'alternance positive ne s'annule pas que l'onduleur 2 à niveaux, Ce qui signifie que la forme d'onde de sortie ne sera pas équilibrée autour de zéro.

Si un défaut survient sur l'un des bras d'un onduleur à deux niveaux, il ne peut plus produire les deux niveaux de tension positive et négative. Il ne parvient donc plus à générer une tension alternative équilibrée.

Cependant, les onduleurs à 3 niveaux NPC répondent mieux aux défauts de circuit ouvert. La complexité de leur structure permet de maintenir leur fonctionnement, même si une partie du circuit est ouverte, en réorganisant le flux du courant à travers les composants restants.

Il est donc observé que dans les défauts analysés, les amplitudes des courants injectés sont habituellement plus faibles pour l'onduleur à 3 niveaux que pour l'onduleur à 2 niveaux.

### III.5 Détection des défauts de circuit ouvert

#### III.5.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen

L'approche ACPV a été appliquée dans les investisseurs à deux niveaux : avec cette technique de diagnostic ACPV, on peut détecter le défaut de circuit ouvert et localiser la paire d'interrupteurs défaillante. Ces opérations sont réalisées en examinant la magnitude et la position du vecteur de Park de la valeur moyenne de chaque courant de ligne de sortie d'inverseur [4].

Tout d'abord, on calcule la valeur moyenne de chacun des trois courants triphasés de sortie du convertisseur en utilisant la relation suivante :

$$i_{x_{moy}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_x[k] \quad x \in \{A, B, C\} \quad (III.3)$$

L'indice N correspond au nombre d'échantillons et les indices A, B, C représentent chacune des trois phases.

$$\begin{cases} i_A[k] = I_m \cdot \cos(\omega \cdot T_s \cdot k) \\ i_B[k] = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot T_s \cdot k - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C[k] = I_m \cdot \cos\left(\omega \cdot T_s \cdot k + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (III.4)$$

Les courants de repère de Park

$$\begin{cases} i_{d_{moy}}[k] = \frac{2}{3} i_{A_{moy}}[k] - \frac{1}{3} (i_{B_{moy}}[k] + i_{C_{moy}}[k]) \\ i_{q_{moy}}[k] = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B_{moy}}[k] - i_{C_{moy}}[k]) \end{cases} \quad (III.5)$$

L'amplitude et la phase s'expriment à travers ces équations

$$i_{s_{moy}}[k] = i_{d_{moy}}[k] + j \cdot i_{q_{moy}}[k] = |i_{s_{moy}}[k]| < \theta_{s_{moy}} \quad (III.6)$$

$$|i_{s_{moy}}[k]| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (III.7)$$

Alors

$$|i_{s_{moy}}[k]| = \frac{|i_{s_{moy}}[k]|}{|i_s[k]|} \quad (III.8)$$

Dans un état de fonctionnement normal, les courants de ligne ont des valeurs moyennes proches de zéro.

Le module normalisé et l'angle de phase de l'ACPV nous permettent de détecter un défaut et de localiser le nombre de paires de défauts IGBT, respectivement.

Une fois que la paire IGBT défectueuse est identifiée, on peut identifier l'interrupteur défaillant en utilisant la valeur moyenne normalisée de chaque courant de ligne moteur, qui est divisé en deux parties, On utilise le composant associé à la valeur moyenne normalisée des valeurs instantanées positives afin de détecter l'IGBT défectueux qui fait partie d'une paire IGBT étrange. Grâce à la variable associée à la valeur moyenne normalisée des valeurs instantanées négatives, nous pouvons repérer le défectueux IGBT qui fait partie d'une paire égale de numéros IGBT [4].

### III.5.1.1 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur deux niveaux

Lorsque se produit un défaut de type circuit ouvert avec un onduleur de type 2 niveaux, la valeur de cette norme augmente et dépasse un seuil préétabli dans l'algorithme de diagnostic.

Après plusieurs essais on a trouvé que le module et L'angle du vecteur de Park moyen est utilisé pour d'identifier l'interrupteur défectueux.

**Tableau III.1:** Diagnostic du défaut d'ouverture d'IGBT utilisant le vecteur de Park.

IGBT	Module du vecteur de Park	L'angle du vecteur de Park
K <sub>1</sub>	Supérieur au seuil	120° < θ < 180°
K <sub>2</sub>	Supérieur au seuil	-60° < θ < 0°
K <sub>3</sub>	Supérieur au seuil	-120° < θ < -60°
K <sub>4</sub>	Supérieur au seuil	60° < θ < 120°
K <sub>5</sub>	Supérieur au seuil	0° < θ < 60°
K <sub>6</sub>	Supérieur au seuil	-180° < θ < -120°

La figure III.8 illustre le système de localisation d'interrupteur défectueux suivant les équations (III.3 a III.8).

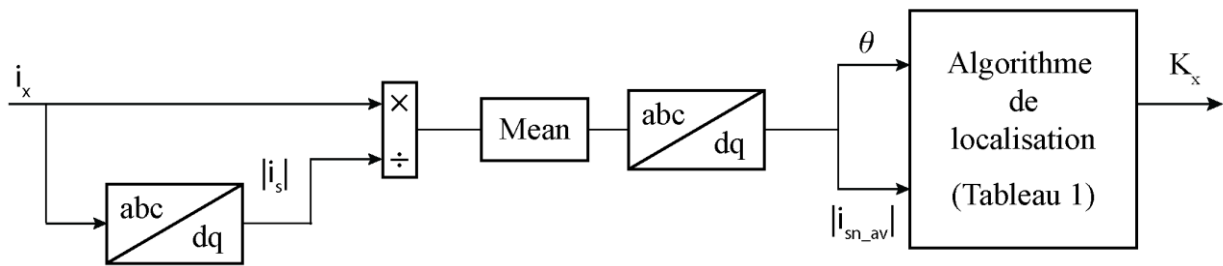


Figure III.8: Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.

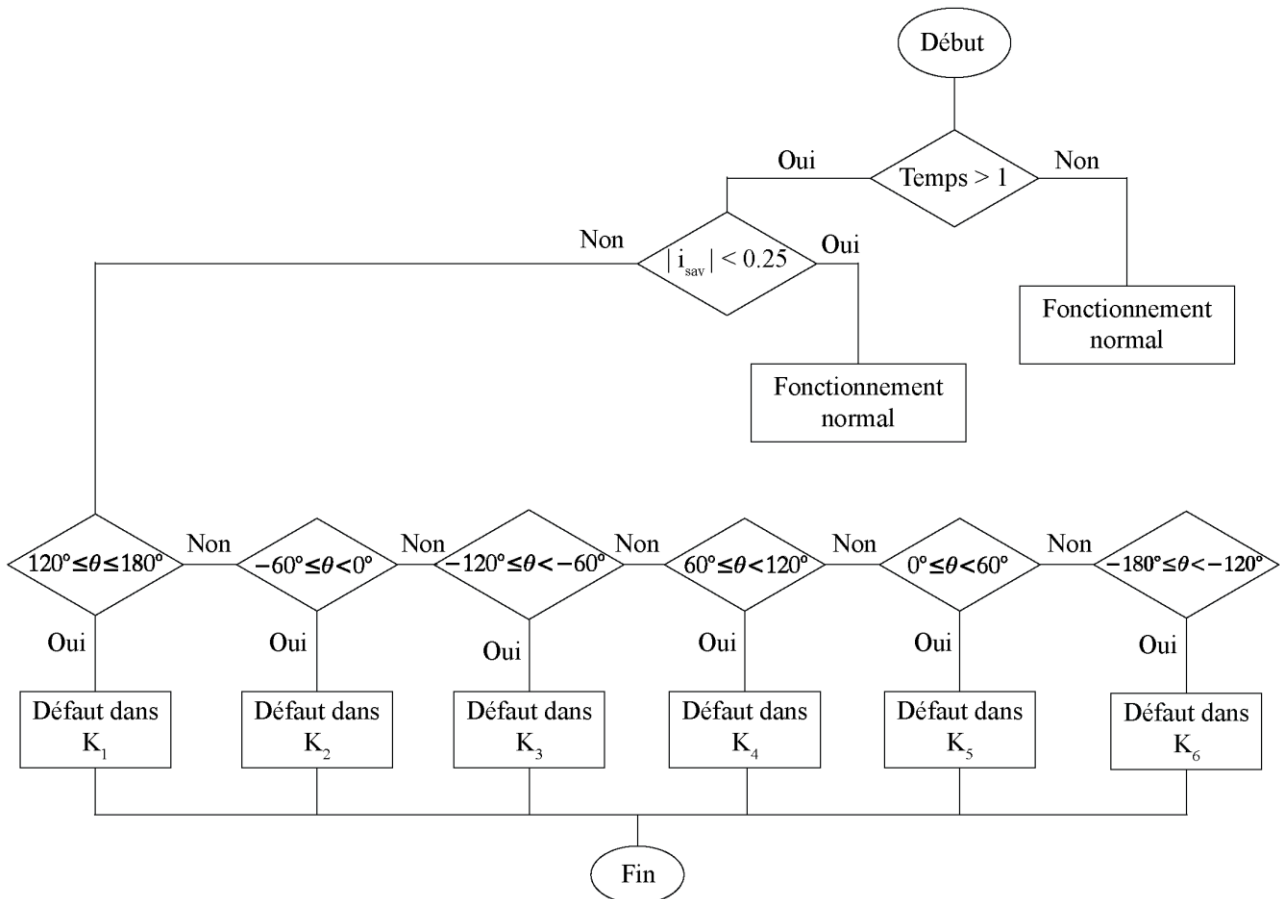
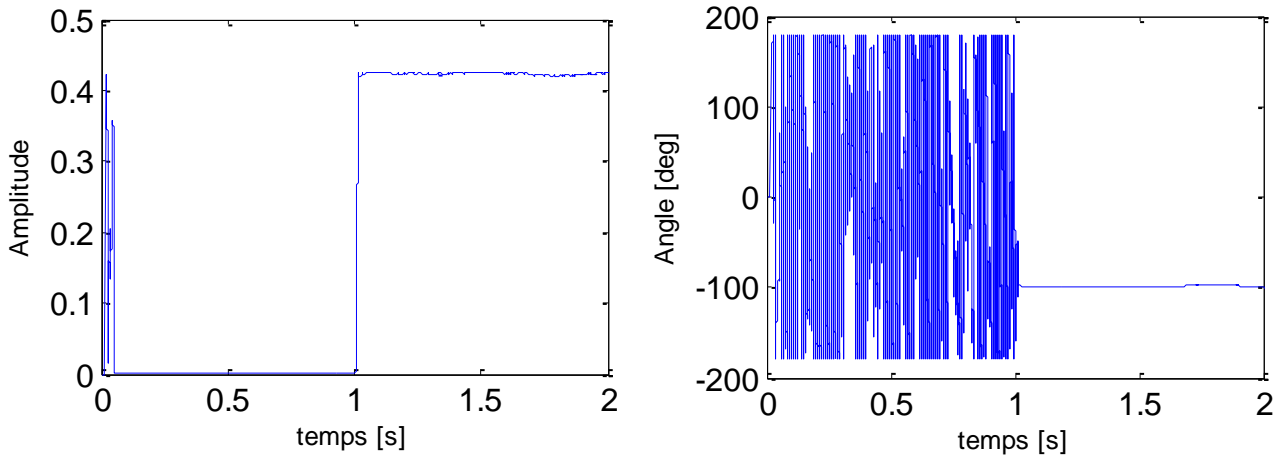


Figure III.9: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

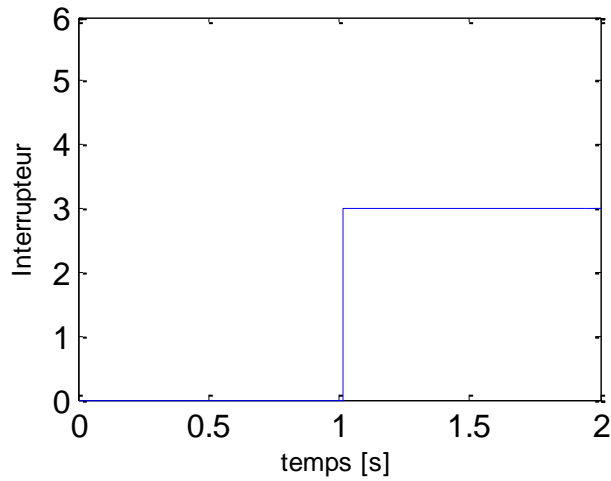
### III.5.1.2 Exemple de détection des défauts avec onduleur deux niveaux

Les résultats de simulation de la détection de défaut d'un convertisseur de circuit ouvert à l'instant  $t=1s$  au niveau de l'interrupteur  $K_3$  sont illustrés dans les figures III.10 et III.11.

La valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est plus élevée que **0.25** et l'angle du vecteur de Park est de **-98.92°** entre  $-120°$  et  $-60°$ , ce qui signifie que le défaut se trouve dans l'interrupteur  $K_3$ .



**Figure III.10:** Amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.



**Figure III.11:** Interrupteur en défaut.

Les résultats de simulation de la détection de défaut d'un convertisseur de circuit ouvert à l'instant  $t=1$  s au niveau de l'interrupteur  $K_6$  sont illustrés dans les figures **III.12** et **III.13**.

La valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est plus élevée que **0.25** et l'angle du vecteur de Park est de **-159.2°** entre  $-180^\circ$  et  $-120^\circ$ , ce qui signifie que le défaut se trouve dans l'interrupteur  $K_6$ .

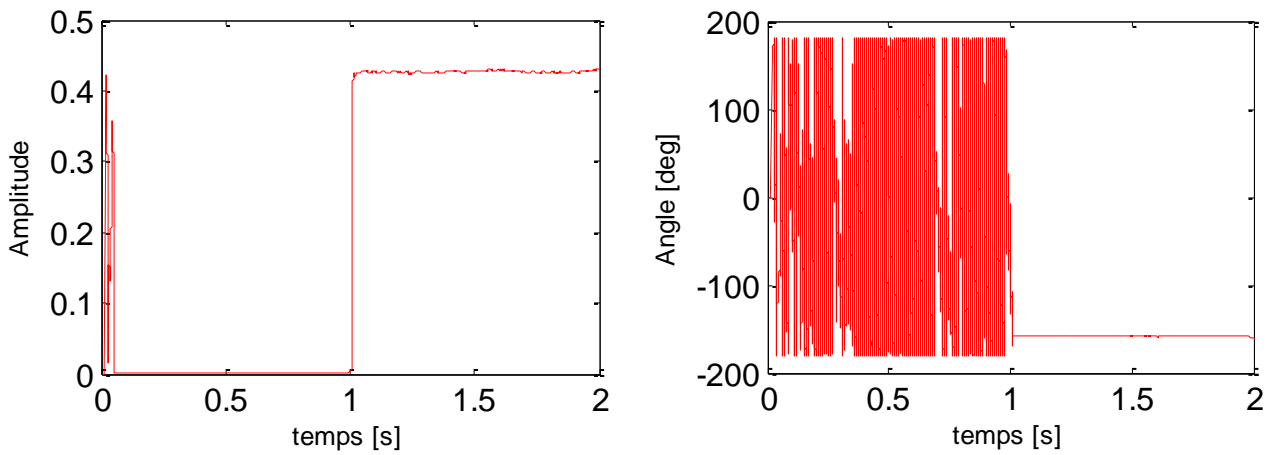


Figure III.12: Amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

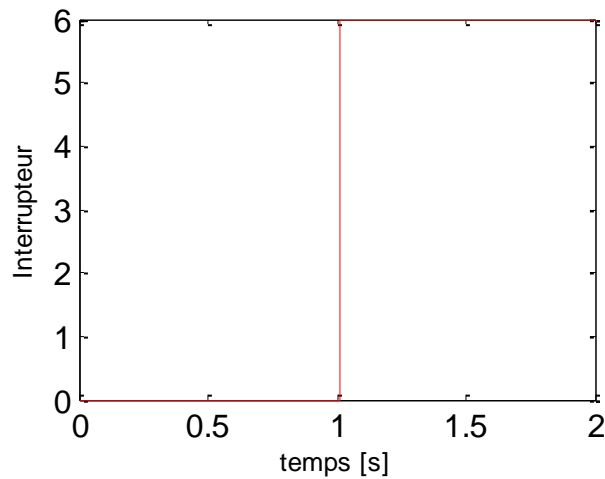


Figure III.13: Interrupteur en défaut.

### III.5.1.3 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur trois niveaux

Pour diagnostiquer la panne d'un onduleur à trois niveaux, il est nécessaire de suivre plusieurs étapes :

La 1<sup>ère</sup> étape essentielle pour détecter la paire et de transistors d'IGBT défectueux par l'algorithme au **figure III.14**.

La 2<sup>ème</sup> étape localiser l'interrupteur défectueux  $K_x$  par le système de la **figure III.15**, à partir des valeurs moyennes de  $D_x, E_x, F_x$  et le Pair.



Tableau III.2: Diagnostic du défaut d'ouverture d'IGBT de l'onduleur trois niveaux utilisant le vecteur de Park.

Pair	IGBT	Module du vecteur de Park	L'angle du vecteur de Park
1	$K_{11}$ ou $K_{12}$	Supérieur au seuil	$120^\circ < \theta < 180^\circ$
2	$K_{13}$ ou $K_{14}$	Supérieur au seuil	$-60^\circ < \theta < 0^\circ$
3	$K_{21}$ ou $K_{22}$	Supérieur au seuil	$-120^\circ < \theta < -60^\circ$
4	$K_{23}$ ou $K_{24}$	Supérieur au seuil	$60^\circ < \theta < 120^\circ$
5	$K_{31}$ ou $K_{32}$	Supérieur au seuil	$0^\circ < \theta < 60^\circ$
6	$K_{33}$ ou $K_{34}$	Supérieur au seuil	$-180^\circ < \theta < -120^\circ$

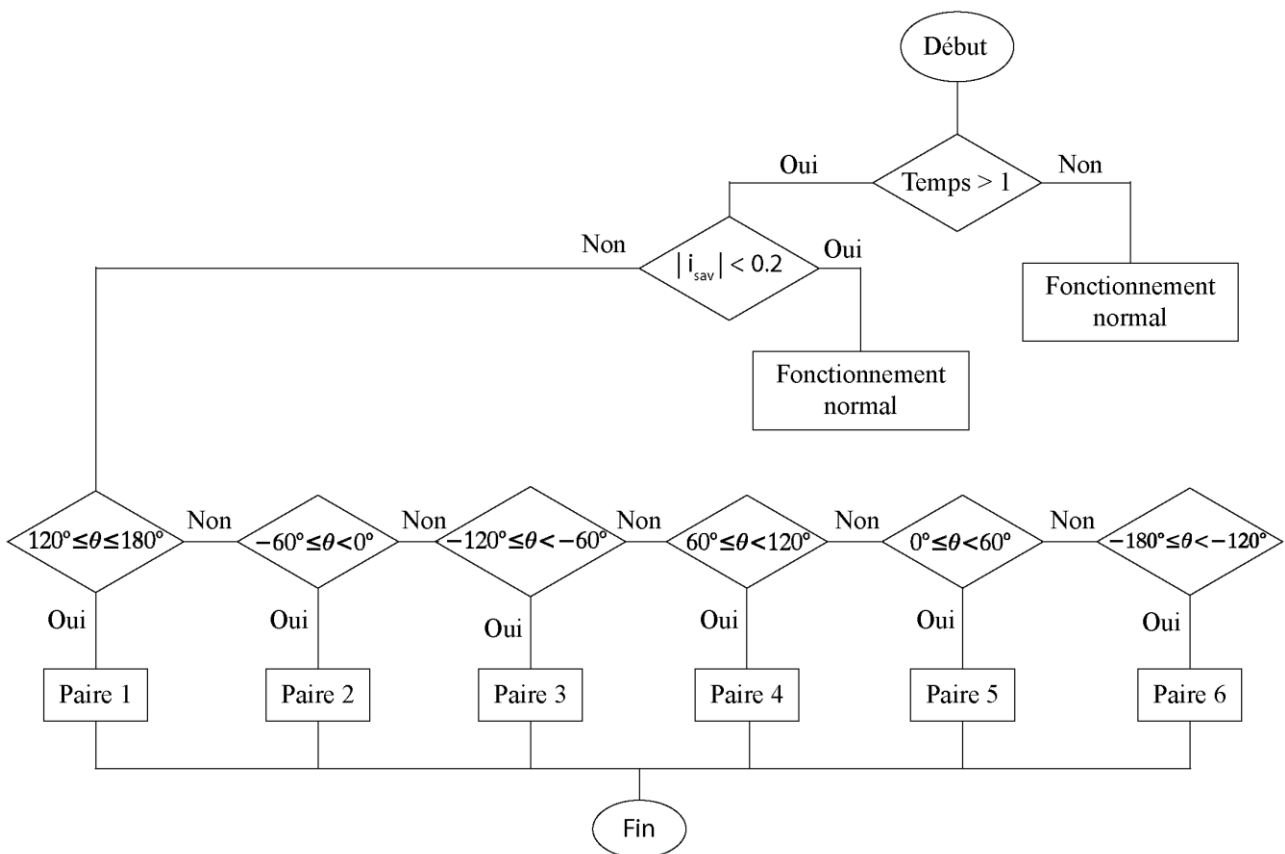


Figure III.14: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

La division du courant normalisé  $i_{x_n}[k]$  par ce système se fait en parties positives ( $i_{x_{npos}}[k]$ ) et négatives ( $i_{x_{nnég}}[k]$ ) qui sont obtenues en utilisant les équations (III.9) et (III.10). Les valeurs moyennes sont normalisées  $i_{x_{nposmoy}}[k]$  et  $i_{x_{nnégmoy}}[k]$ , ensuite sont calculées à l'aide des équations (III.11) et (III.12), en prenant en compte le nombre total d'échantillons (N), l'indice de l'échantillon (k) et l'indice de la branche de l'onduleur (x).

$$i_{x_{npos}}[k] = \begin{cases} i_{x_n}[k], & i_{x_n}[k] > 0 \\ 0, & i_{x_n}[k] \leq 0 \end{cases}, x \in \{A, B, C\} \quad (III.9)$$

$$i_{x_{nnég}}[k] = \begin{cases} 0, & i_{x_n}[k] \geq 0 \\ i_{x_n}[k], & i_{x_n}[k] < 0 \end{cases}, x \in \{A, B, C\} \quad (III.10)$$

$$i_{x_{nposmoy}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{x_{npos}}[k], x \in \{A, B, C\} \quad (III.11)$$

$$i_{x_{nnégmoy}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{x_{nnég}}[k], x \in \{A, B, C\} \quad (III.12)$$

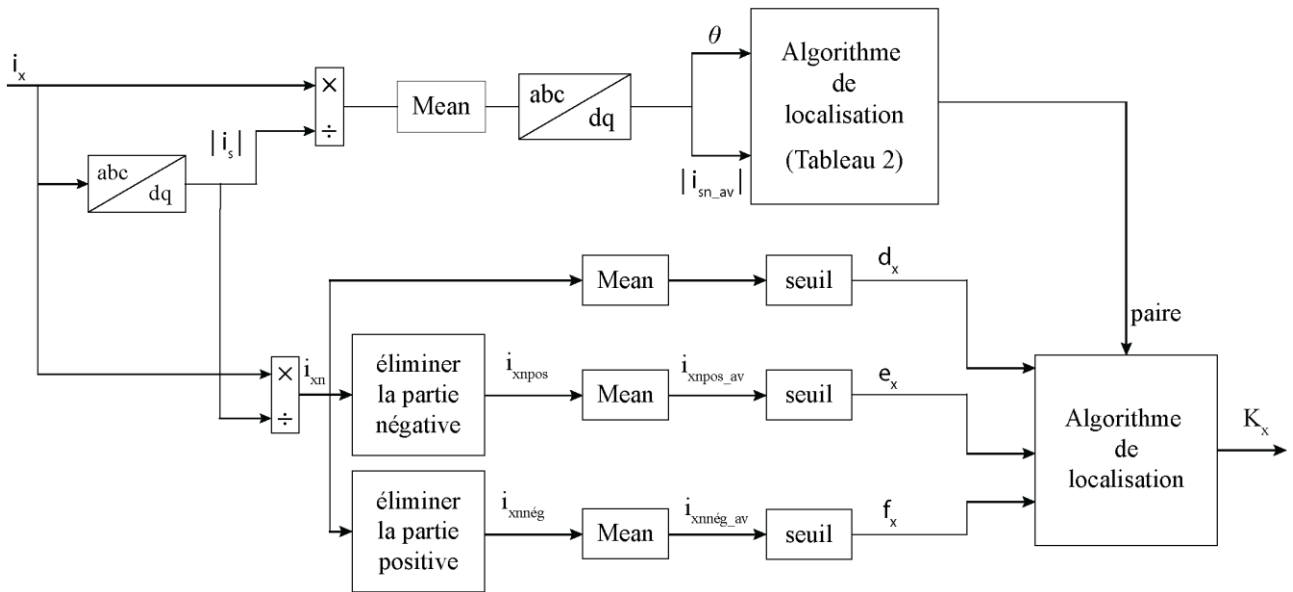


Figure III.15: Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.

Les figures suivantes illustrent la comparaison entre les courants  $D_x, E_x$  et  $F_x$  de chaque demi-bras pour les trois phases pour identifier le seuil.

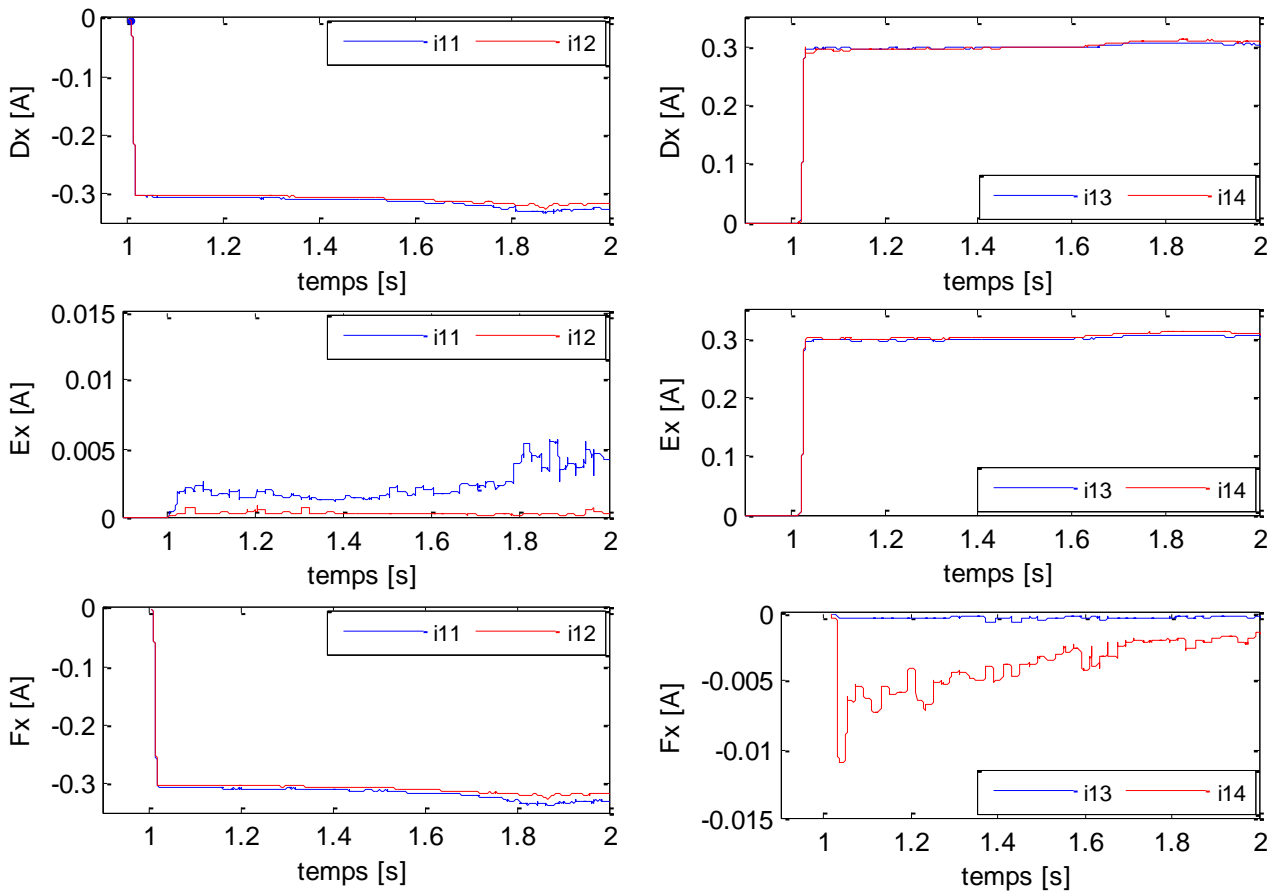
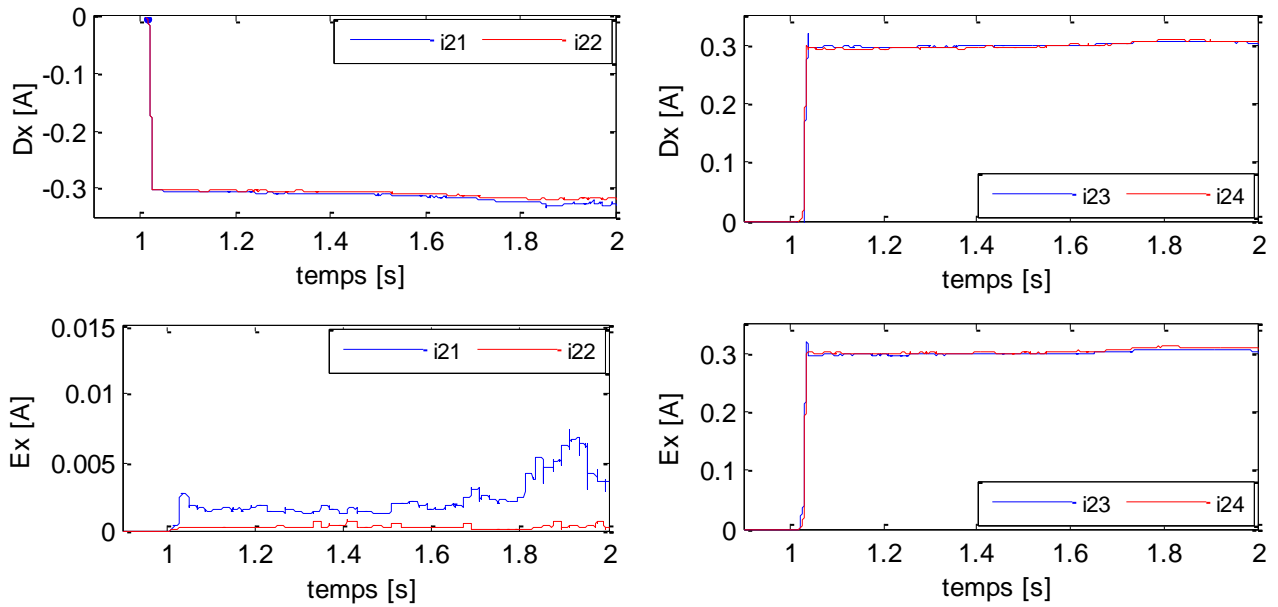


Figure III.16: valeur moyenne des courants du premier bras.



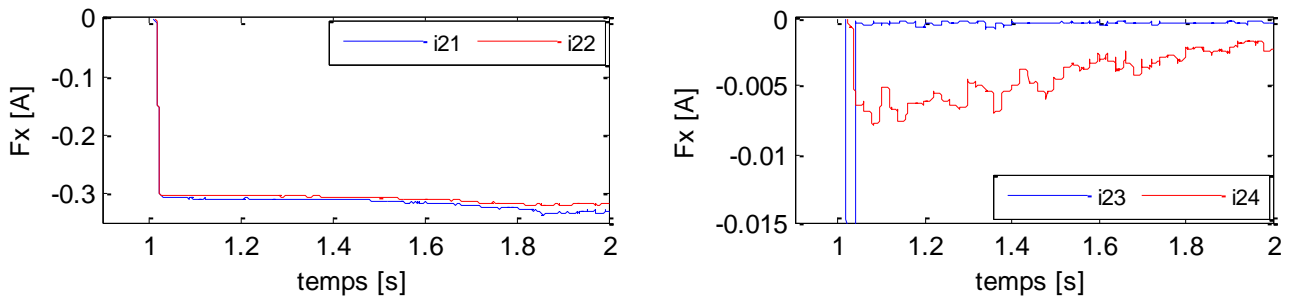


Figure III.17: valeur moyenne des courants du deuxième bras

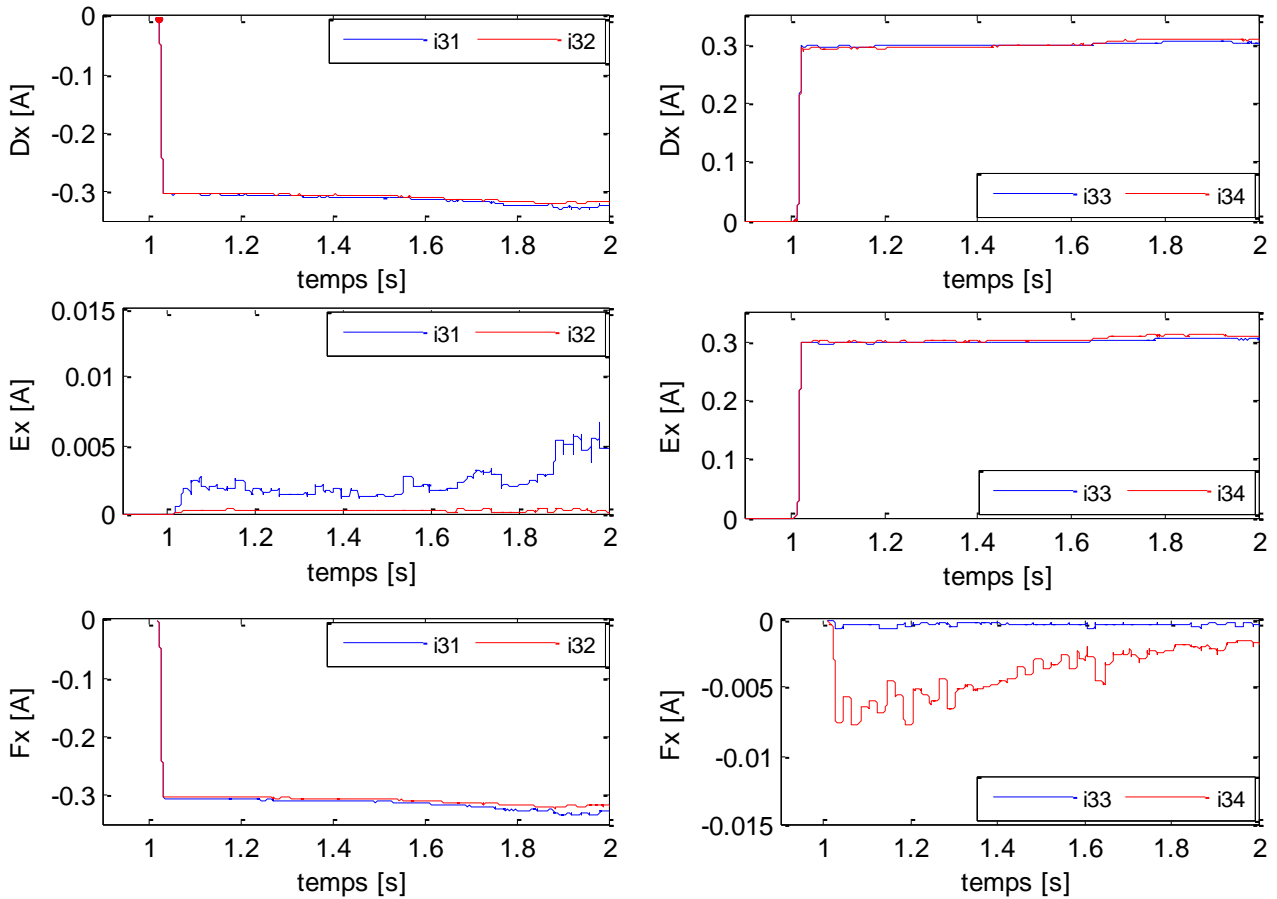


Figure III.18: valeur moyenne des courants du troisième bras.

La figure suivante illustre l’algorithme de détection l’interrupteur défectueux dans un bras après la détection de défaut dans la paire. On observe que les valeurs moyennes des courants  $i_{xn}$ ,  $i_{xn\_pos}$  et  $i_{xn\_nég}$  sont les mêmes pour les trois bras d’onduleur, donc nous pouvons établir l’algorithme suivante :

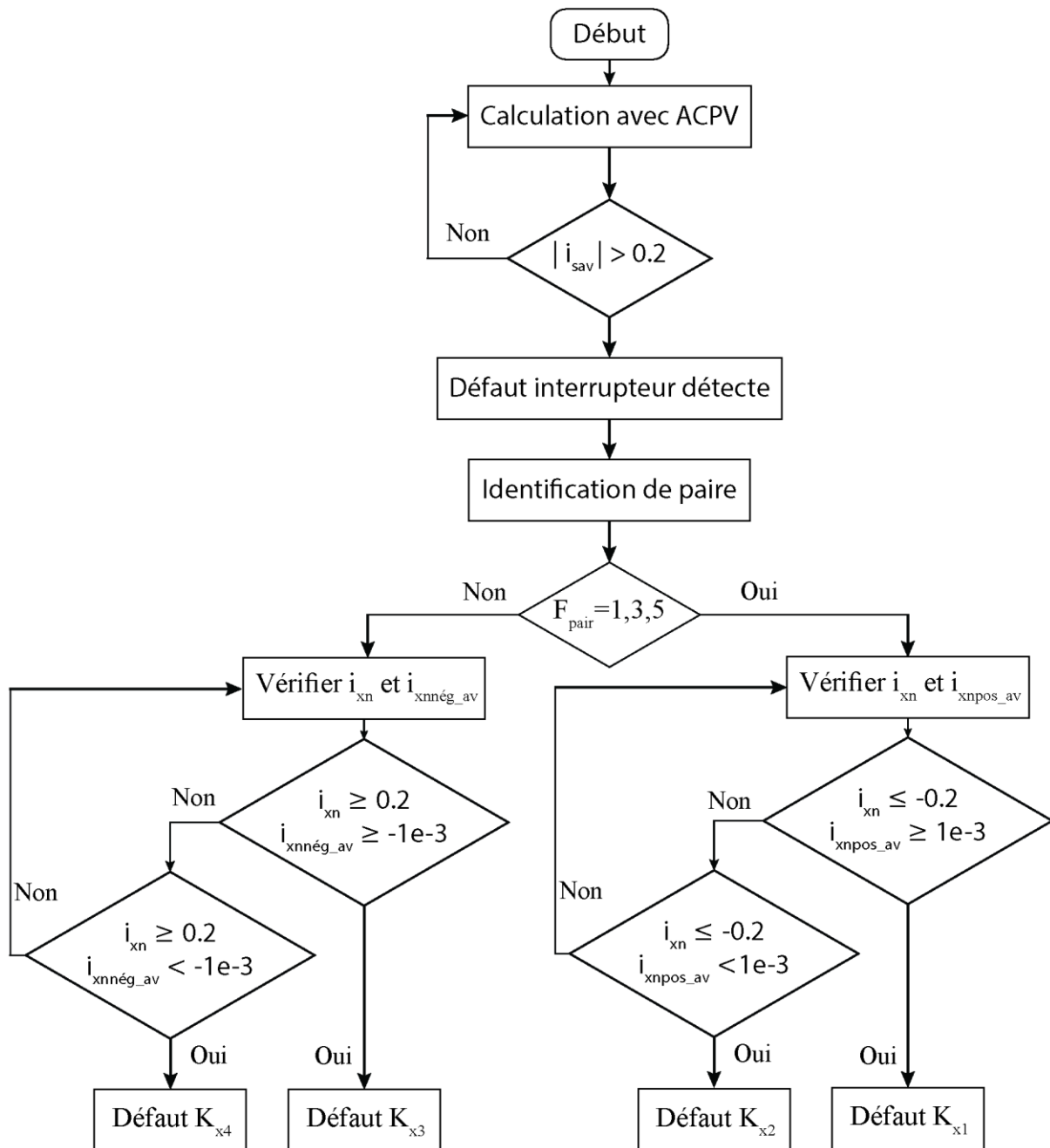


Figure III.19: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

### III.5.1.4 Exemple de détection des défauts

Les figures III.20, III.21 et III.22 présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant  $t=1s$  au niveau de l'interrupteur  $K_{22}$ .

On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est plus élevée que 0.2 et l'angle du vecteur de Park est  $-84.7^\circ$  de entre  $-120^\circ$  et  $-60^\circ$ , ce qui signifie que le défaut se trouve dans le pair 3 selon la figure III.14, On a trouvé que la valeur moyen  $i_{xn} \leq -0.2$  et  $i_{xn\_pos} < 10^{-3}$ , donc le défaut est présent dans l'interrupteur  $K_{22}$  d'après l'algorithme de la figure III.19.

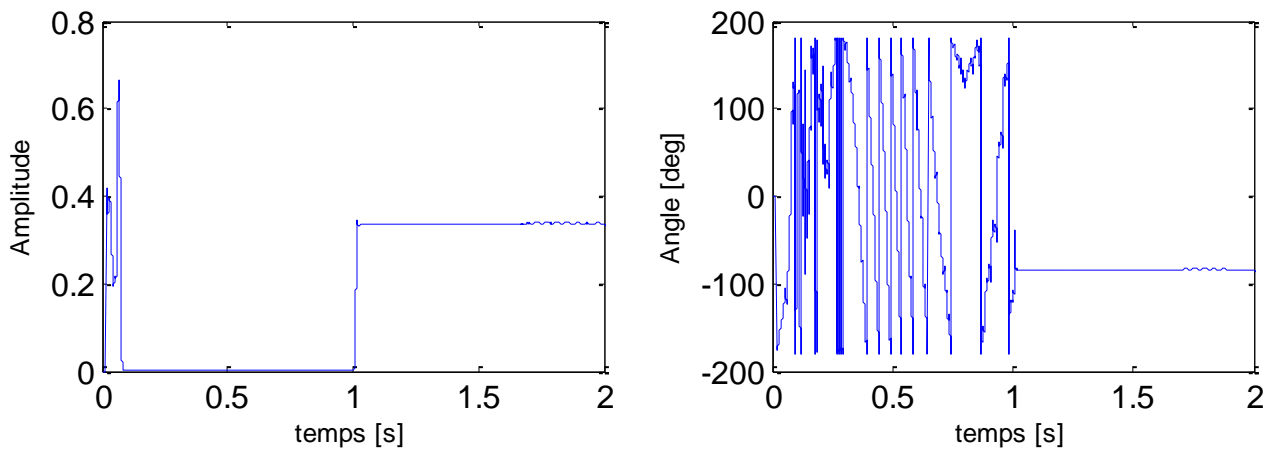


Figure III.20: amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

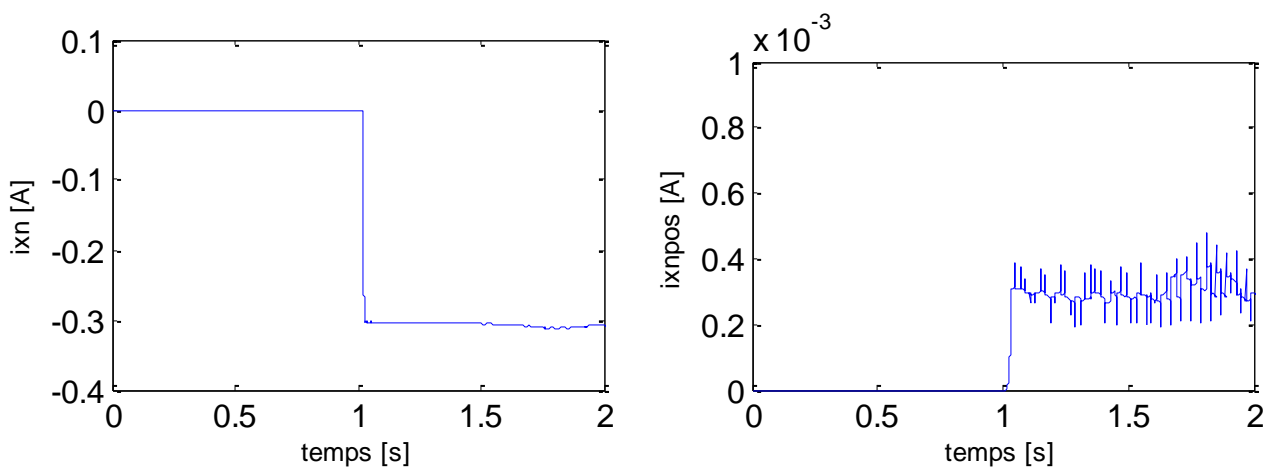


Figure III.21: Les courants moyennes  $i_{xn}$  et  $i_{xn\_pos}$ .

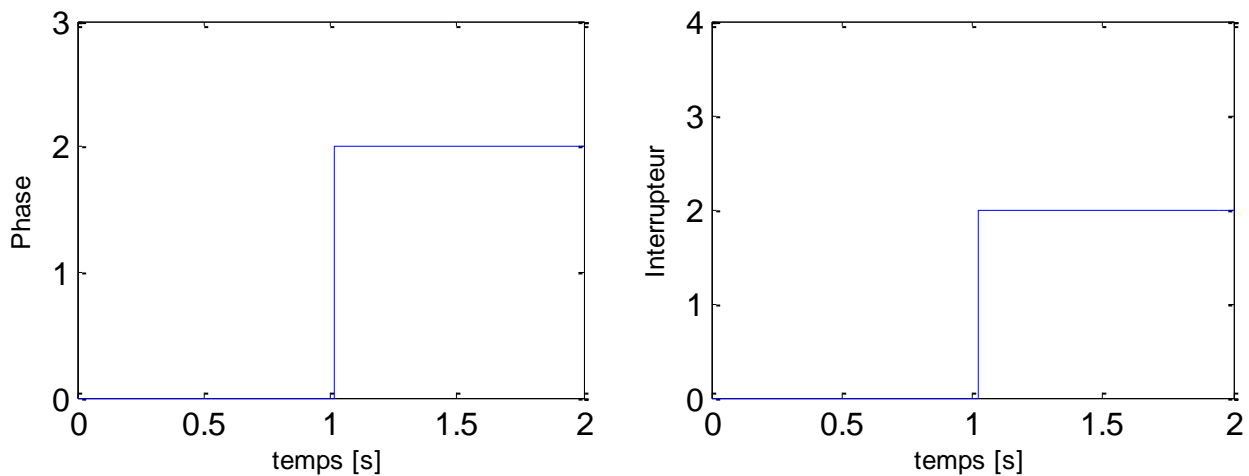


Figure III.22: Phase et Interrupteur en défaut.

Les figures III.23, III.24 et III.25 présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant  $t=1s$  au niveau de l'interrupteur  $K_{23}$ .

On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est plus élevée que 0.2 et l'angle du vecteur de Park  $95.68^\circ$  est de entre  $60^\circ$  et  $120^\circ$ , ce qui signifie que le défaut se trouve dans le pair 4 selon la figure III.14, On a trouvé que la valeur moyen  $i_{xn} \geq 0.2$  et  $i_{xn,nég} \geq -10^{-3}$ , donc le défaut est présent dans l'interrupteur  $K_{23}$  d'après l'algorithme de la figure III.19.

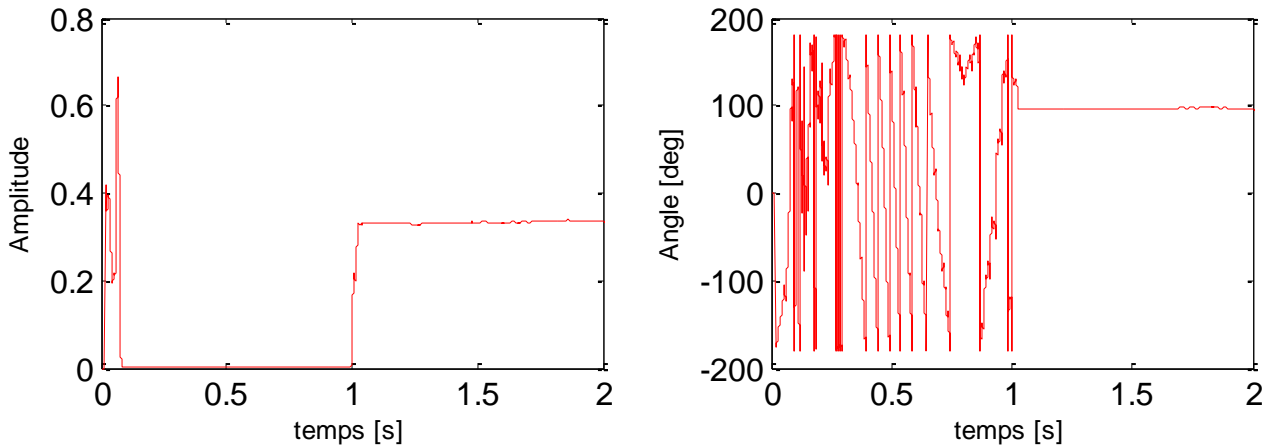


Figure III.23: amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

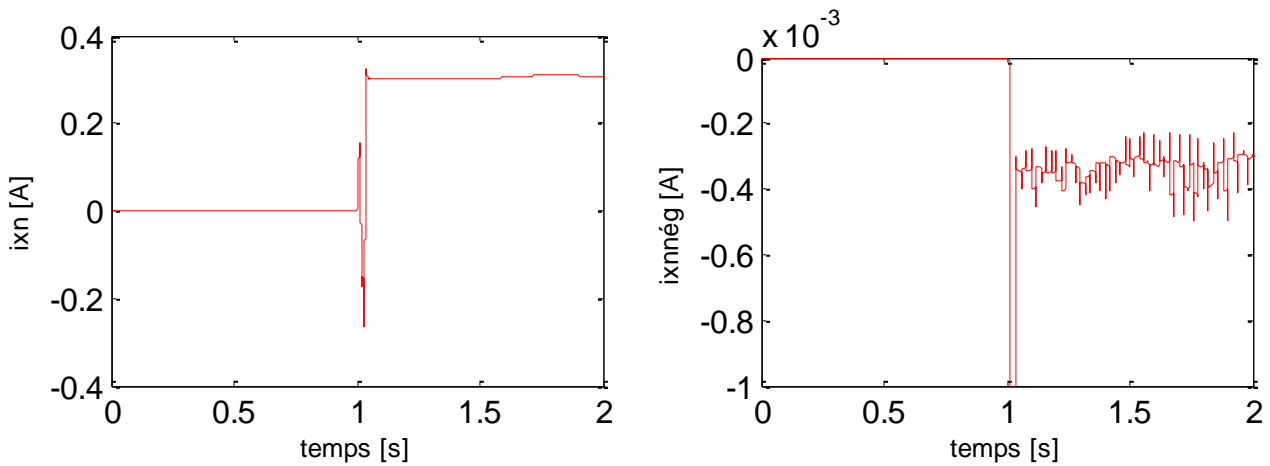


Figure III.24: Les courants moyennes  $i_{xn}$  et  $i_{xn,nég}$ .

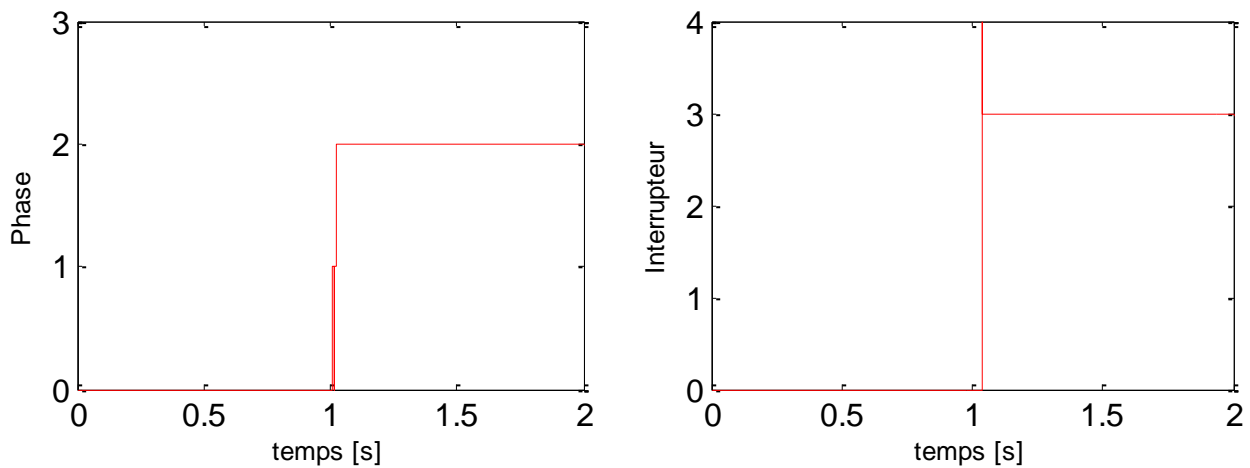


Figure III.25: Phase et Interrupteur en défaut.

### III.5.2 Diagnostic par réseau de neurones artificiels

Le **RNA** (Un réseau de neurones artificiels), peut être décrit comme un ensemble de neurones élémentaires généralement connectés dans des architectures d'inspiration biologique et organisés en plusieurs couches.

L'apprentissage d'un **RNA** consiste à générer une réponse en fonction des données entrées en ajustant les poids des nœuds. Ainsi, il nous faut un ensemble de données appelé ensemble de données d'apprentissage, qui sert à entraîner le réseau neuronal.

Le détecteur de défaut **RNA** est efficace lorsque ses mesures sont précises et que les données d'apprentissage sont efficaces. Il est essentiel d'assurer une gestion adéquate des données d'entraînement, de les filtrer et de les mesurer afin de faciliter l'utilisation de méthodes intelligentes comme le **RNA** [5].

#### III.5.2.1 Apprentissage du RNA utilisée dans l'onduleur 02 niveaux

##### III.5.2.1.1 Entrées du réseau

Dans la première étape, qui est la phase de détection de défaut, le réseau prend deux entrées à la fois, qui sont l'amplitude et l'angle par la déclaration d'un vecteur qui varie parallèlement avec la simulation.

##### III.5.2.1.2 Sorties du réseau

Quand une erreur est repérée, le réseau présente une sortie qui indique l'interrupteur défectueux par la nécessité de **20** couches cachés. La figure suivante montre le schéma bloc de notre système.



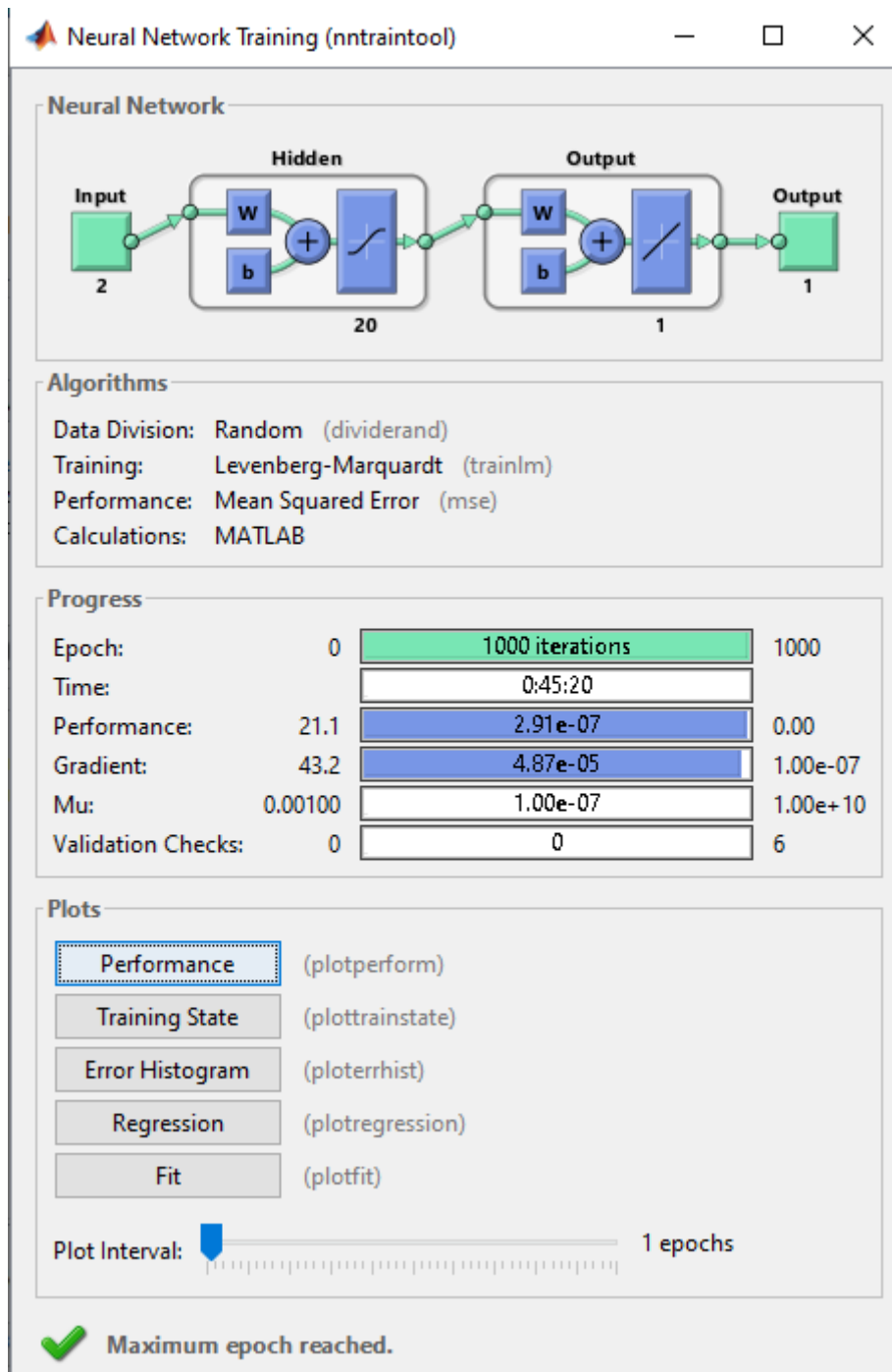


Figure III.26: Vue générale d'ensemble du RNA.

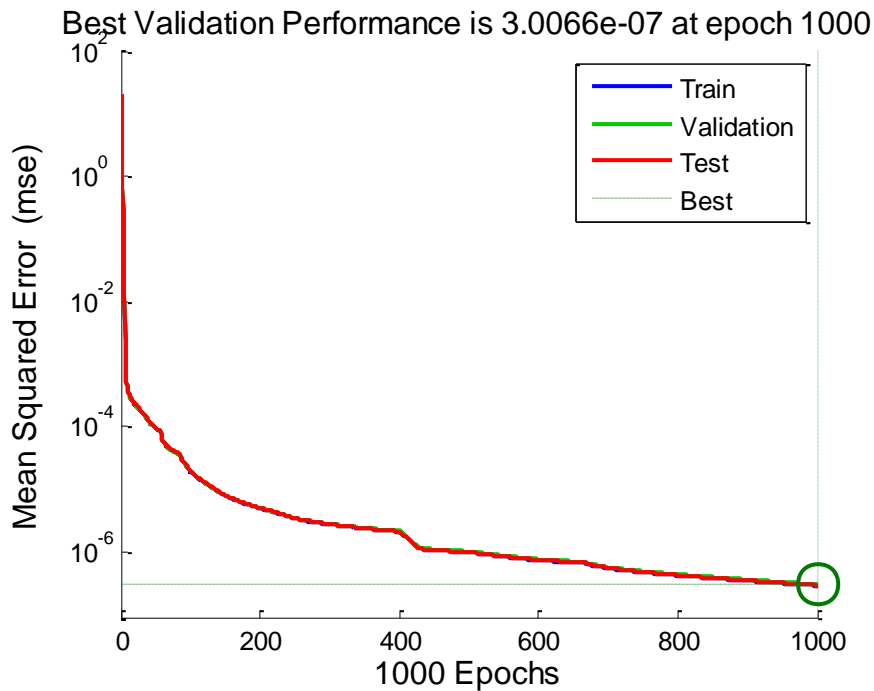
L'apprentissage se compose d'environ 07 ensembles d'entrées (un pour le cas sans défaut, 06 pour chaque défaut dans un seul interrupteur).

La fonction d'apprentissage la plus rapide est généralement « **trainlm** », De plus, elle est plus performant sur les problèmes d'ajustement de fonctions (régression non linéaire) que sur les problèmes de reconnaissance de formes, c'est pourquoi cette méthode est utilisée pour ce projet de recherche [5].

Après de nombreux apprentissages, on a obtenu des performances satisfaisantes sont affichés et le meilleur neurone réseau a été décrit plus en détail.

### III.5.2.1.3 Analyse de performance

La **figure III.27** présente les courbes d'évolution de performance du réseau lors des trois étapes d'apprentissage (entraînement, validation et test). Elle indique aussi l'erreur atteinte pendant la meilleure performance de validation. Après avoir réduit l'erreur quadratique moyenne à la fin du processus d'apprentissage, il est possible de constater que la meilleure performance pour l'étape de validation par ce réseau neurologique est de  $3.0066 \cdot 10^{-7}$  après **1000** itérations par **1000**.



**Figure III.27:** Courbe de performance du détecteur neuronal.

### III.5.2.1.4 Analyse de régression

La **figure III.28**, illustre la meilleure régression linéaire appropriée pour les trois étapes d'apprentissage (instruction, test et validation) du réseau neurologique. Le coefficient de corrélation est de 1, ce qui témoigne d'une corrélation élevée presque tous les points sont situés le long de la diagonale, et les sorties du réseau de neurones sont en corrélation avec les valeurs envisagées, ce qui explique le choix du détecteur neuronal utilisé.

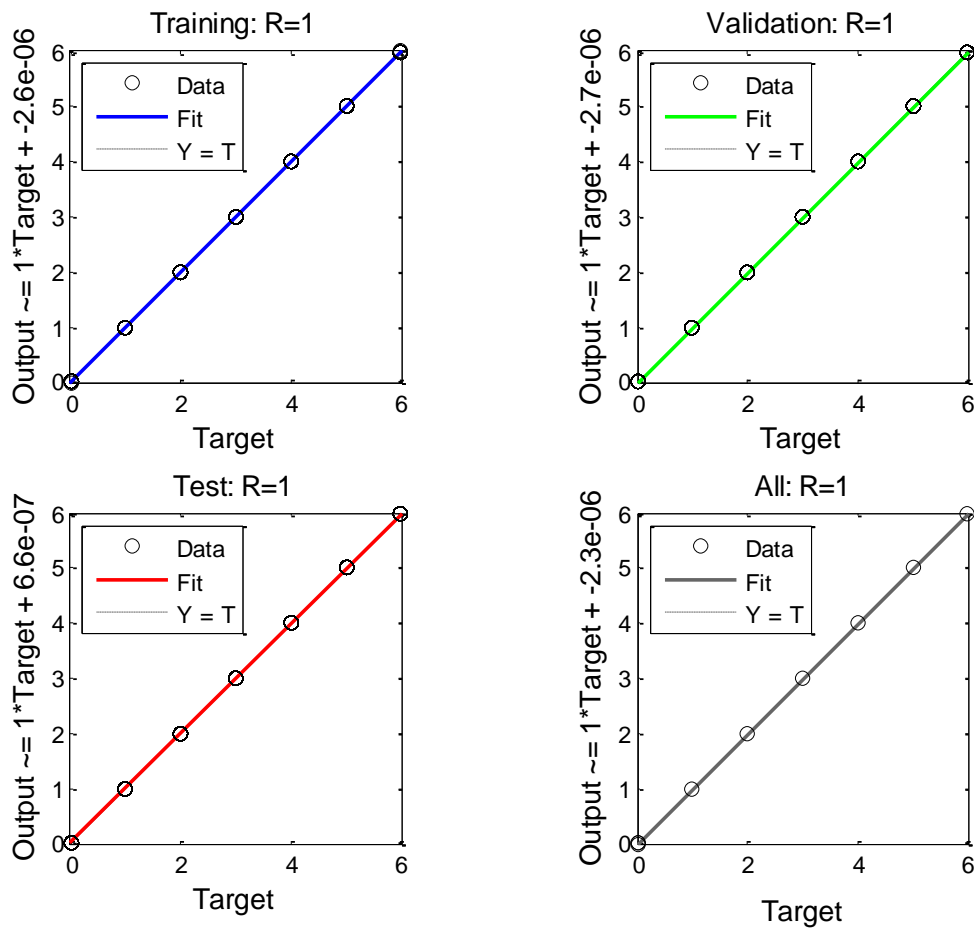


Figure III.28: Graphe de régression pour le détecteur neuronal.

### III.5.2.1.5 Résultats de simulation et interprétations

Dans le but de réaliser les trois étapes de diagnostic (détection, classification et localisation), nous avons créé un programme utilisant Matlab/Simulink, qui repose sur la méthode des **RNA**.

Nous avons effectué des tests pour de nombreux types d'opérations, et les résultats sont affichés aux **Figures III.29, 30 et 31**. Une fois que l'**RNA** a été établie et que notre apprentissage a atteint un niveau acceptable, nous avons effectué des tests pour différents types d'opérations

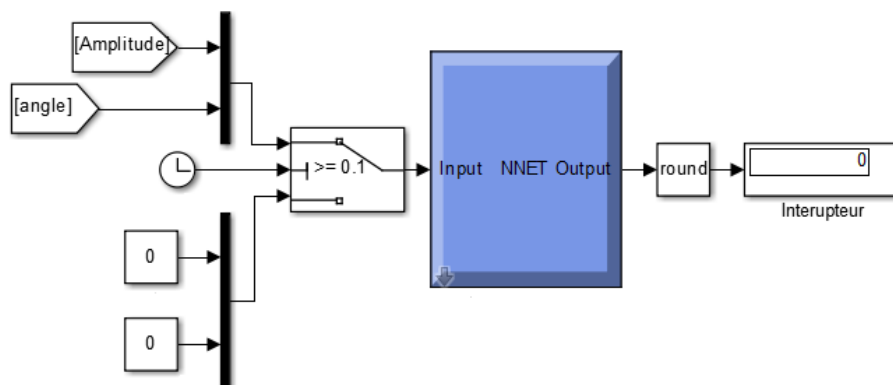


Figure III.29: Test RNA dans le cas sans défaut.

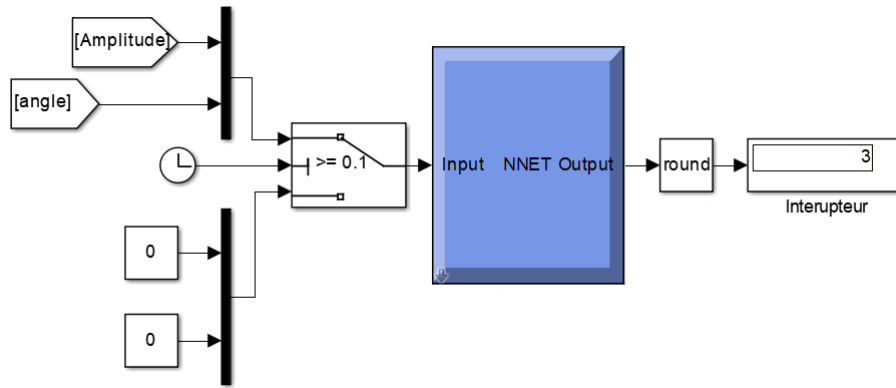


Figure III.30: Test RNA dans le cas de défaut  $K_3$ .

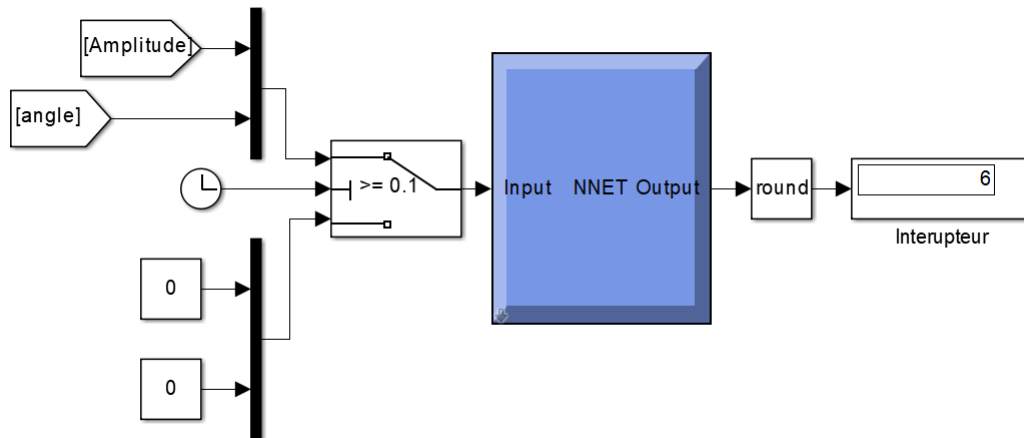


Figure III.32: Test RNA dans le cas de défaut  $K_6$ .

### III.5.2.2 Apprentissage du RNA utilisée dans l'onduleur 03 niveaux

L'apprentissage se compose d'environ **13** ensembles d'entrées-sorties (un pour le cas sans défaut, **12** pour chaque défaut dans un seul interrupteur), par la nécessité de **20** couches cachés.

Après de nombreux apprentissages, on a obtenu des performances satisfaisantes sont affichés et le meilleur neurone réseau a été décrit plus en détail.

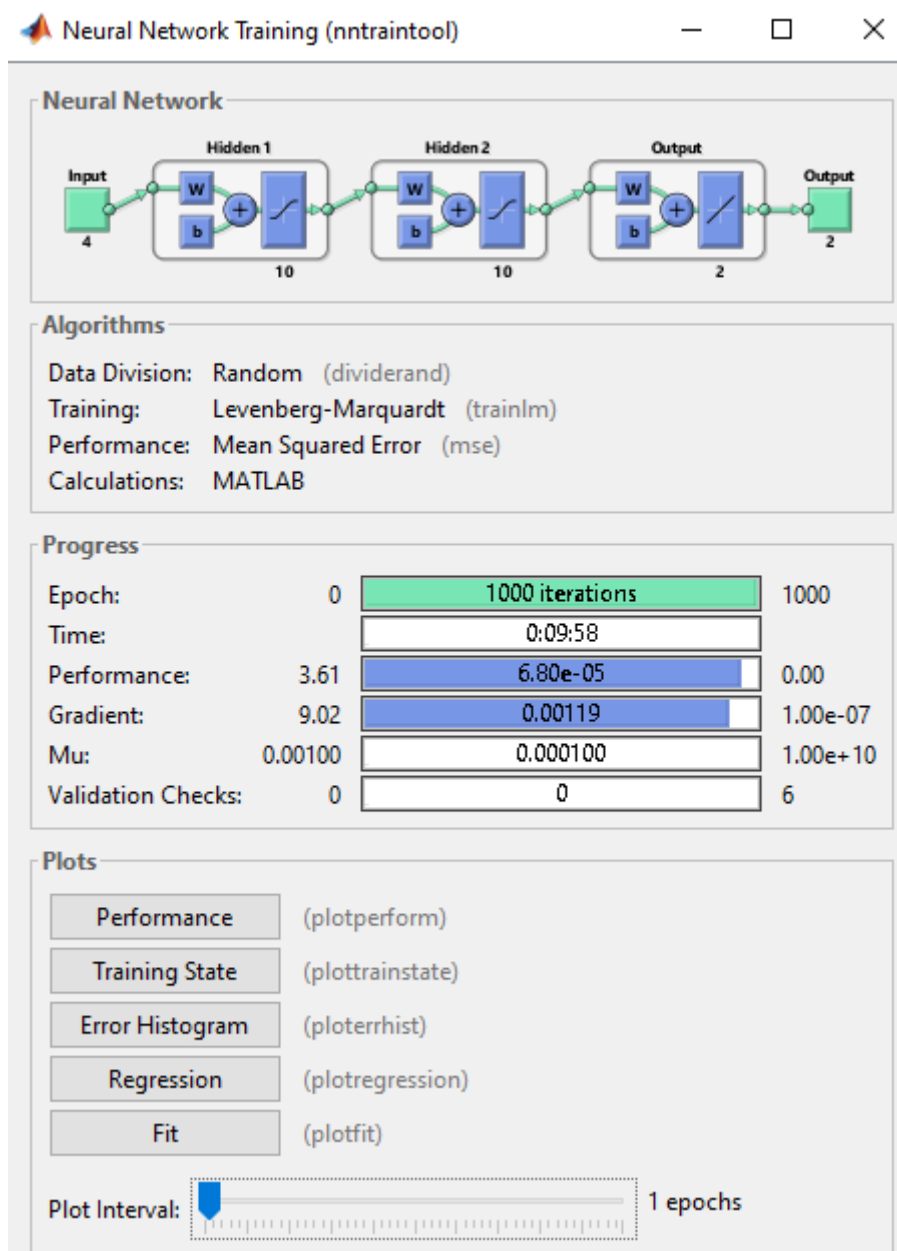


Figure III.33: Vue générale d'ensemble du RNA.

### III.5.2.2.1 Analyse de performance

La figure III.34 présente les courbes d'évolution de performance du réseau lors des trois étapes d'apprentissage (entraînement, validation et test). Elle indique aussi l'erreur atteinte pendant la meilleure performance de validation. Après avoir réduit l'erreur quadratique moyenne à la fin du processus d'apprentissage, il est possible de constater que la meilleure performance pour l'étape de validation par ce réseau neurologique est de  $5.6937 \cdot 10^{-5}$  après 1000 itérations par 1000.

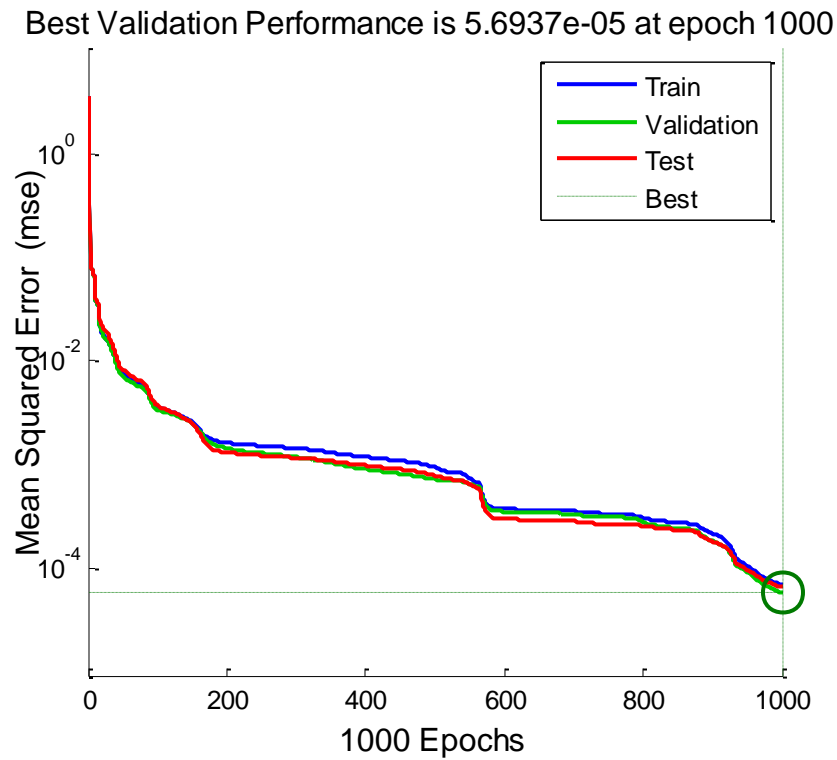


Figure III.34: Courbe de performance du détecteur neuronal.

### III.5.2.2.2 Analyse de régression

La figure III.35, illustre une régression linéaire appropriée pour les trois étapes d'apprentissage (instruction, test et validation) du réseau neurologique. Le coefficient de corrélation est proche de 1, ce qui témoigne d'une corrélation élevée presque tous les points sont situés le long de la diagonale, et les sorties du réseau de neurones sont en corrélation avec les valeurs envisagées, ce qui explique le choix du détecteur neuronal utilisé.

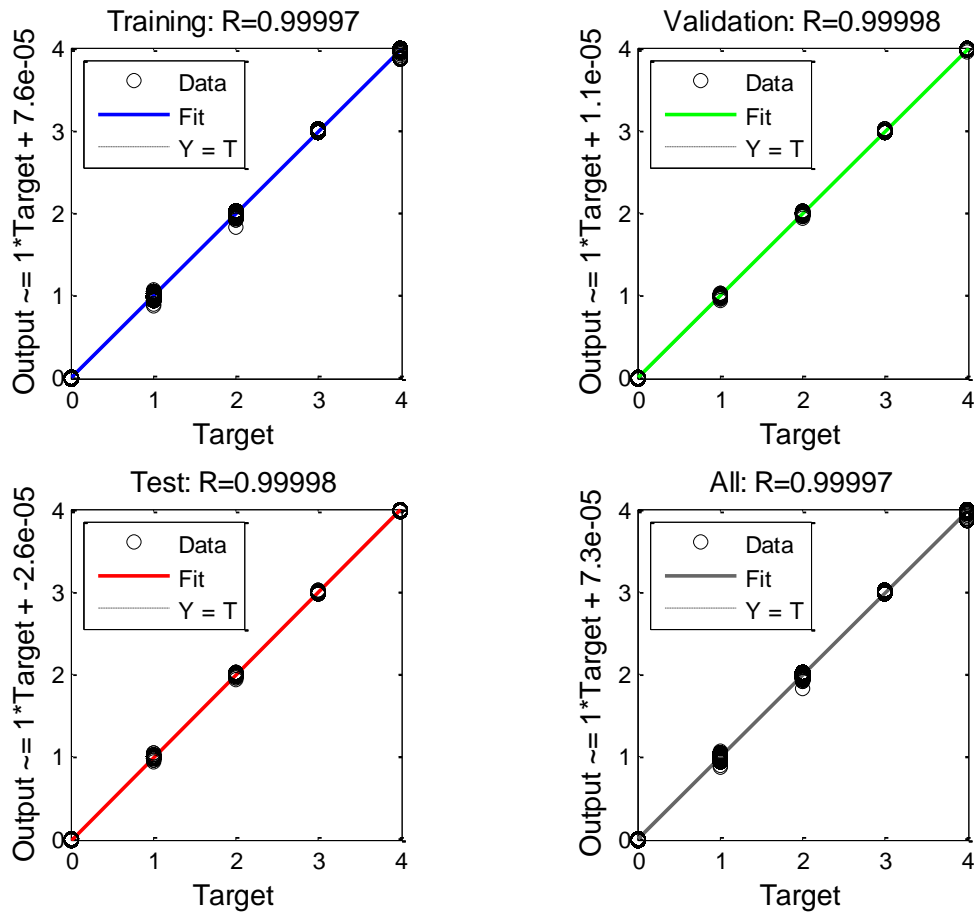


Figure III.35: Graphe de régression pour le détecteur neuronal.

### III.5.2.2.3 Résultats de simulation et interprétations

Dans le but de réaliser les trois étapes de diagnostic (détection, classification et localisation), nous avons créé un programme utilisant Matlab/Simulink, qui repose sur la méthode des RNA.

Nous avons effectué des tests pour de nombreux types d'opérations, et les résultats sont affichés aux Figure III.36, 37 et 38. Une fois que l'RNA a été établie et que notre apprentissage a atteint un niveau acceptable, nous avons effectué des tests pour différents types d'opérations

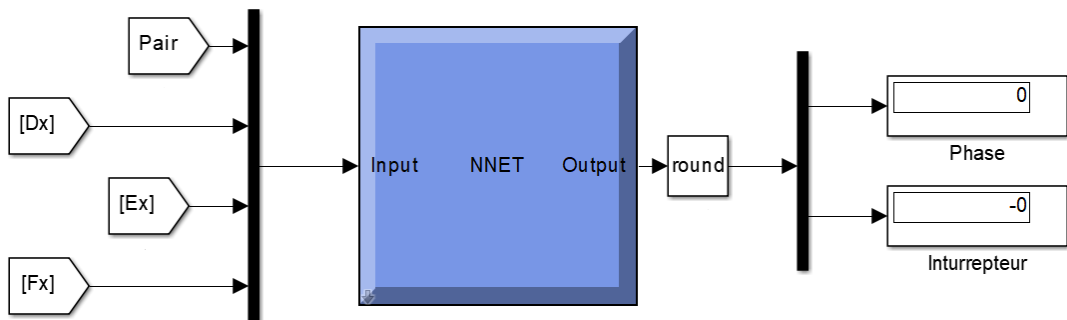


Figure III.36: Test RNA dans le cas sans défaut.

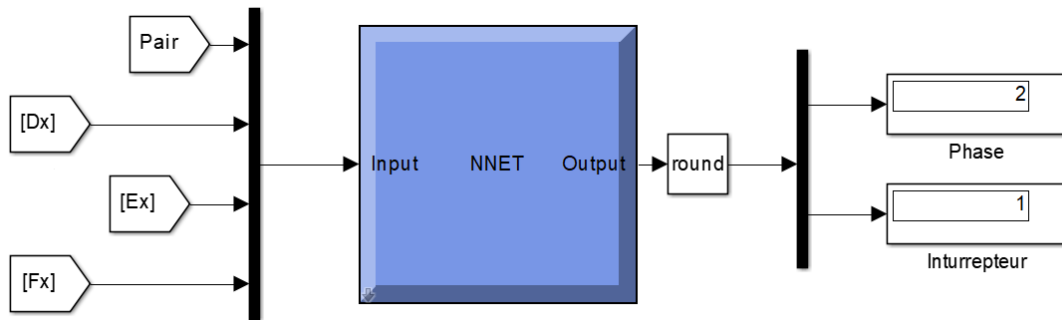


Figure III.37: Test RNA dans le cas de défaut  $K_{21}$ .

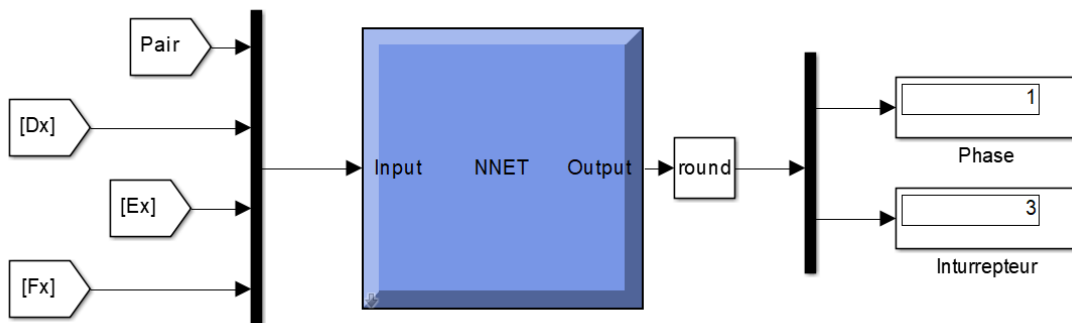


Figure III.38: Test RNA dans le cas de défaut  $K_{13}$ .

### III.6 La comparaison entre ACPV et RNA

L'analyse de l'Approche de Vecteur de Park (ACPV) et des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) peut être résumée de manière efficace dans le tableau III.3 qui met en évidence les principales caractéristiques, avantages et limites de chaque méthode.



Tableau III.3: Comparaison entre ACPV et RNA.

Critère	Réseau Neuronal Artificiel (RNA)	Approche de l'Angle du Vecteur de Park (ACPV)
<b>Principe de fonctionnement</b>	Apprentissage basé sur l'ajustement des poids des connexions entre les neurones.	Transformation de l'espace de coordonnées triphasé en espace de coordonnées biphasé pour simplifier les calculs.
<b>Adaptabilité</b>	Très adaptable, peut apprendre à détecter de nouveaux types de défauts avec de nouvelles données.	Limité par les modèles mathématiques préétablis.
<b>Précision</b>	Peut être très précis avec suffisamment de données et d'entraînement adéquat.	Précis mais dépend de la fidélité des transformations et des modèles utilisés.
<b>Maintenance</b>	Nécessite une mise à jour régulière avec de nouvelles données pour maintenir la précision.	Moins de maintenance nécessaire une fois implémenté, mais les modèles peuvent devenir obsolètes.
<b>Coût de mise en œuvre</b>	Potentiellement élevé en raison des besoins en calcul et en données.	Modéré, principalement basé sur des calculs mathématiques et des capteurs.
<b>Avantages</b>	Capacité d'apprentissage et de généralisation à partir de données complexes.	Simplification des calculs pour le contrôle vectoriel des machines électriques.
<b>Inconvénients</b>	Besoin de grandes quantités de données et de puissance de calcul pour l'entraînement.	Limité principalement aux applications de commande des systèmes électriques.

Par l'analyse et les résultats obtenus, on trouve que l'ACPV offre une solution rapide et efficace pour des applications spécifiques et bien définies, tandis que les RNA offrent une grande flexibilité et adaptabilité, particulièrement utile pour traiter des données complexes et variées.

Le choix entre ACPV et RNA dépendra des exigences particulières de l'application envisagée, telles que la complexité des données, les performances souhaitées et la flexibilité nécessaire.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons entamé la détection et la localisation des défauts de circuit ouvert au d'interrupteur de puissance dans les convertisseurs **DC/AC** à deux et trois niveaux par deux méthodes.

La première méthode concerne le module et l'angle du vecteur de Park moyen basé sur la transformation de Park, qui convertit les variables de courant triphasées en un référentiel biphasé (d,q). En analysant les variations de l'amplitude et de l'angle moyen de ce vecteur, un changement significatif peut indiquer un défaut, car un tel défaut affecte les équilibres de courant dans le système. Cette méthode représente une méthode simple et efficace pour un interrupteur défectueux.

La deuxième méthode concerne le diagnostic par les réseaux de neurones artificiels, qui sont une approche avancée basée sur l'apprentissage et l'entraînement préalable des données. Une fois entraînés, ils offrent une grande précision et une adaptabilité aux variations des conditions de fonctionnement, ils sont capables de détecter l'interrupteur défectueux.

Les outils présentés dans ce chapitre permettent de repérer, classer et localiser le défaut du circuit ouvert qui peut survenir dans l'onduleur côté réseau.

## *Références bibliographiques*

- [1] Betta Zohra Et Charef Nacira, «Diagnostic Des Défauts Dans Les Convertisseurs Statiques», Thèse De Doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2016.
- [2] Ghefsi Yassine, « Détection Des Défauts Dans L'association Convertisseur Machine A Induction», Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [3] Ondel, Olivier, « Diagnostic Par Reconnaissance Des Formes: Application A Un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone», Thèse De Doctorat. Ecole Centrale- Lyon, 2006.
- [4] Mendes, Andre M. Santos, Mohsen Bandar Abadi, et Sérgio Manuel A. Cruz, «Fault Diagnostic Algorithm For Three-Level Neutral Point Clamped Ac Motor Drives, Based On The Average Current Park's Vector », IET Power Electronics journal 7.5, pp 1127-1137 ,2014.
- [5] Sahraoui, Khaled, Et Al, « Un Système Intelligent De Diagnostic Des Défauts Basé Sur Les Réseaux De Neurones Artificiels Pour La Ligne De Transport Ouargla – Hassi Massaoud Hm1 A 220 Kv», Thèse De Doctorat, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2021.

## **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

---

Pour notre mémoire de Master, notre concentration s'est portée sur la production et la conversion de l'énergie éolienne en utilisant la **GSAP** connectée au réseau. Nous avons également examiné la classification des éoliennes, discutées de quelques concepts théoriques liés au système éolien et présenté une représentation mathématique de la chaîne éolienne reliée au **GSAP**.

L'étude réalisée sur le contrôle et le diagnostic des convertisseurs **DC/AC** à deux et trois niveaux dans une chaîne éolienne basée sur un générateur synchrone à aimants permanents (**GSAP**) connecté au réseau a permis de mettre en lumière plusieurs avancées significatives. La modélisation précise et la simulation des convertisseurs ont révélé que les convertisseurs à trois niveaux présentent des avantages supérieurs en termes de réduction des harmoniques et d'efficacité énergétique comparés aux convertisseurs à deux niveaux.

Dans le Chapitre I, nous avons examiné en détail le contrôle d'une chaîne de conversion éolienne isolée. Nous avons analysé les différentes étapes de la conversion de l'énergie éolienne, mettant en lumière les principaux composants du système qui est contrôlé par la commande vectorielle, notamment le générateur synchrone à aimants permanents (**GSAP**), par l'utilisation des deux topologies d'onduleurs. Nous avons reçu les résultats de nos simulations, qui ont démontré de manière concluante notre aptitude à exploiter pleinement l'énergie disponible. En parallèle, nous avons procédé à une comparaison détaillée des deux topologies d'onduleurs utilisés dans notre étude et les résultats ont montré des différences significatives en termes de performance et de fiabilité entre les deux onduleurs.

Dans le Chapitre II, notre attention s'est portée sur la commande d'un onduleur à deux et trois niveaux connecté au réseau électrique. Nous avons examiné le contrôle d'un onduleur à trois niveaux, en mettant en évidence les différences fondamentales par rapport à l'onduleur à deux niveaux et en discutant des aspects spécifiques de la commande dans ce cas. Après avoir simulé les deux topologies de convertisseurs, nous avons observé que la forme d'onde se rapproche de la sinusoïdale lorsque les niveaux de tension de l'onduleur augmentent. De plus, la réduction du taux d'harmoniques nous a montré comment exploiter pleinement l'énergie du vent.

Dans le Chapitre III, nous avons abordé le diagnostic des défauts des convertisseurs **DC/AC** à deux et trois niveaux par deux méthodes. Nous avons présenté la première méthode basée sur l'approche vecteur de Park à courant moyen (Average Current Park's Vector approach **ACPV**) et la deuxième sur les **RNA** (réseaux de neurones artificiels) pour détecter et diagnostiquer les éventuels dysfonctionnements dans ces convertisseurs. Nous avons discuté des principes de fonctionnement de ces techniques de diagnostic et de leur application spécifique aux systèmes éoliens basés sur les

## *Conclusion générale*

---

résultats de plusieurs simulations. Cela concerne le diagnostic à l'aide de réseaux de neurones artificiels, qui sont une méthode avancée qui repose sur l'apprentissage et l'entraînement spécifique des données. Lorsqu'ils sont entraînés, ils sont capables de détecter avec une grande précision les interrupteurs défectueux et de s'adapter aux variations des conditions de fonctionnement par rapport aux autres. La méthode de l'ACPV offre une solution simple et efficace pour résoudre un problème d'interrupteur.

En résumé, nous suggérons de poursuivre nos recherches en examinant les points de vue suivants afin d'améliorer les études à venir :

- La détection et le diagnostic des défauts pour les onduleurs à plusieurs niveaux, en particulier les cinq et sept niveaux, doivent être approfondis.
- Analyser l'application de méthodes basées sur les réseaux neuronaux pour repérer et diagnostiquer les imperfections.

# **Annexes**

On a effectué les différentes simulations en utilisant le logiciel Matlab /Simulink, les conditions mises en place lors des simulations sont :

- Version de Matlab : **2014a**
- La méthode : **Ode4 (Runge-Kutta)**.
- Le temps de calcul : **0.6  $\mu$ S**.
- Fixed step.

Les paramètres utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Elément de la chaîne	Paramètres	Valeurs	Désignations, Unités
Turbine éolienne	$R$	<b>3</b>	Diamètre d'une pale [m].
	$G$	<b>5.4</b>	Gain du multiplicateur.
	$J_{turb}$	<b>0.042</b>	Moment d'inertie de la turbine [ $Kg \cdot m^2$ ].
	$F_{turb}$	<b>0.017</b>	Coefficient de frottement [ $N \cdot m \cdot S^{-1}$ ].
	$\rho$	<b>1.225</b>	Densité de l'air [ $Kg/m^3$ ].
	$\lambda_{opt}$	<b>8.1</b>	Vitesse spécifique optimale.
	$Beta$	<b>0</b>	Angle d'orientation [degré].
GSAP	$F_{sn}$	<b>50</b>	Fréquence de la tension d'alimentation [Hz].
	$P$	<b>3</b>	Nombre de pair de pôle.
	$L_s$	<b>0.0075</b>	Inductance statorique [H].
	$R_s$	<b>0.45</b>	Résistance statorique [ $\Omega$ ].
	$\varphi_f$	<b>0.52</b>	Flux de l'aimant permanent [Wb].
	$J_g$	<b>0.00208</b>	Moment d'inertie de la génératrice [ $Kg \cdot m^2$ ].
	$F_g$	<b>0.00017</b>	Coefficient de frottement [ $N \cdot m \cdot S^{-1}$ ].
Bus continu	$V_{dc}$	<b>700</b>	Tension du bus continu [V].
	$C$	<b>2000e – 6</b>	Capacité [ $mF$ ].
	$L_f$	<b>0.025</b>	Inductance [ $mH$ ].
	$R_f$	<b>0.15</b>	Résistance [ $\Omega$ ].
Réseau	$V$	<b>220</b>	Tension du réseau [V].
	$F$	<b>50</b>	Fréquence de la tension du réseau [HZ].



Les coefficients de la turbine sont présentés dans le tableau ci-après :

Coefficient	Valeur
$C_1$	0.5176
$C_2$	116
$C_3$	0.4
$C_4$	5
$C_5$	21
$C_6$	0.0068

La simulation du système éolien utilise un profil de vent variable et composé de plusieurs fonctions, comme le montre l'équation suivante :

$$V_p(t) = 8 + 2 \sin\left(1.5t - \frac{\pi}{5}\right) + 2 \sin(4t - 3) + 1.5 \sin\left(5.4t + \frac{\pi}{12}\right) + 0.5 \sin\left(2.5t + \frac{\pi}{5}\right)$$

Les différents éléments de la chaîne éolienne sont illustrés à l'aide de schémas blocs sous Matlab/Simulink.

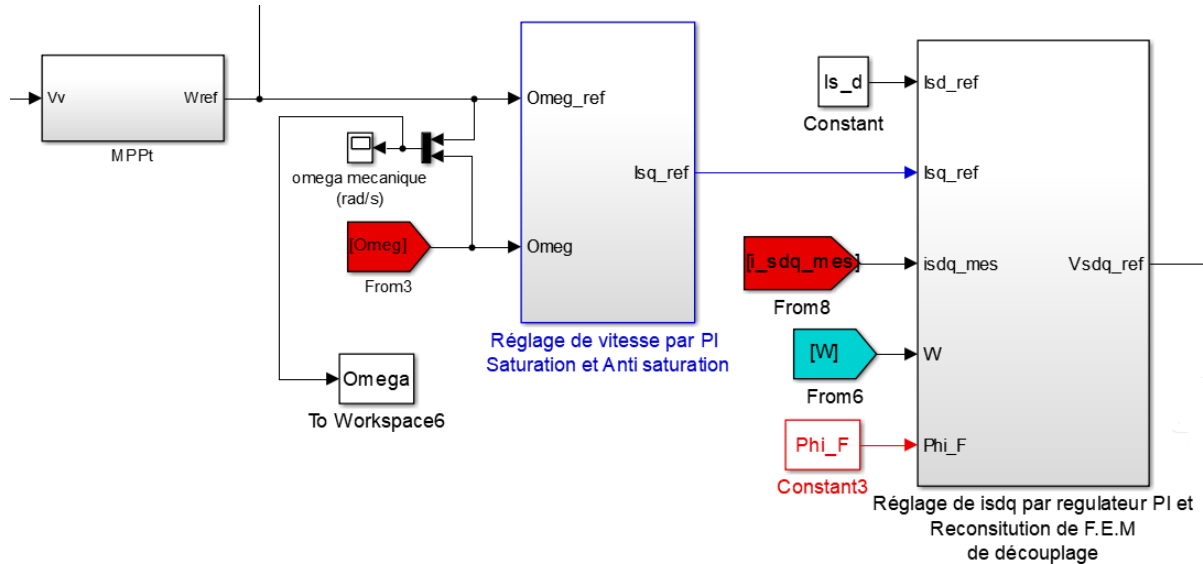


Figure 1: MPPT + réglage de la vitesse + Commande Vectorielle.



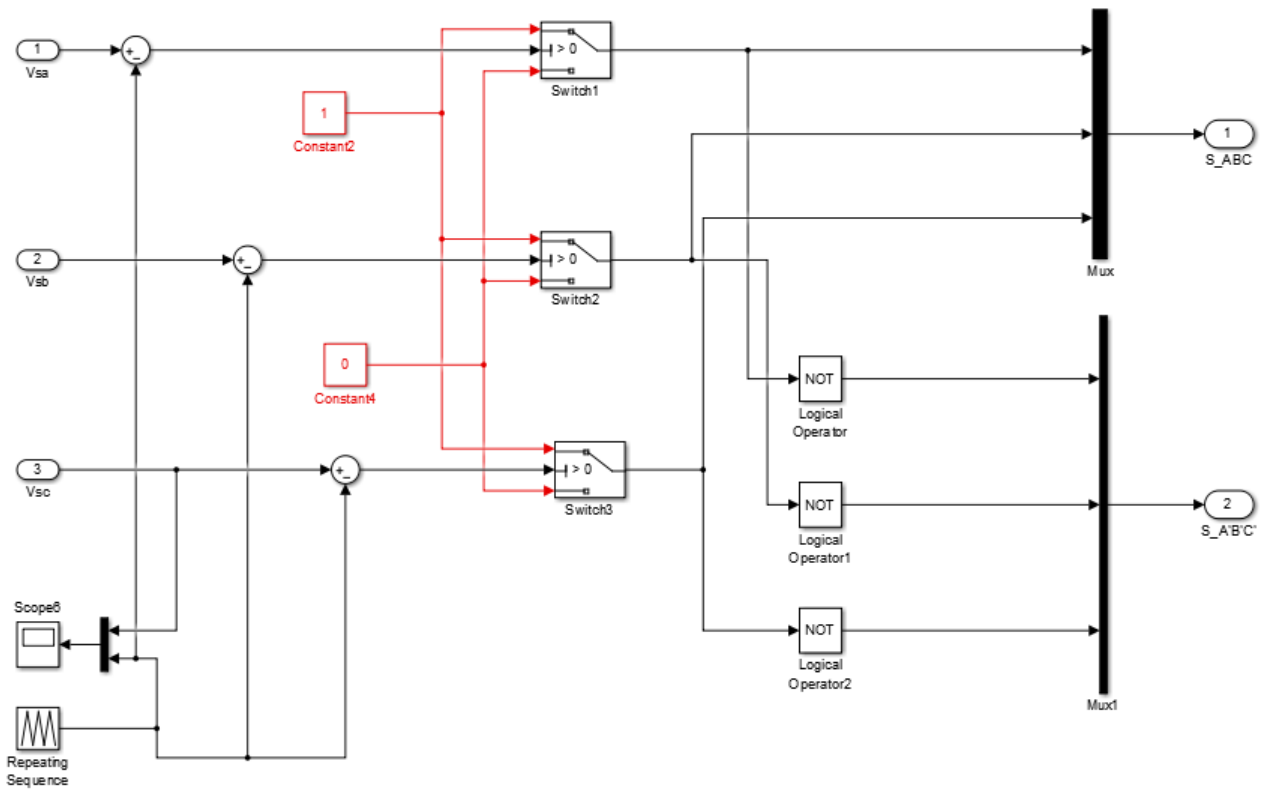


Figure 4: Modélisation Onduleur à MLI (2 niveaux).

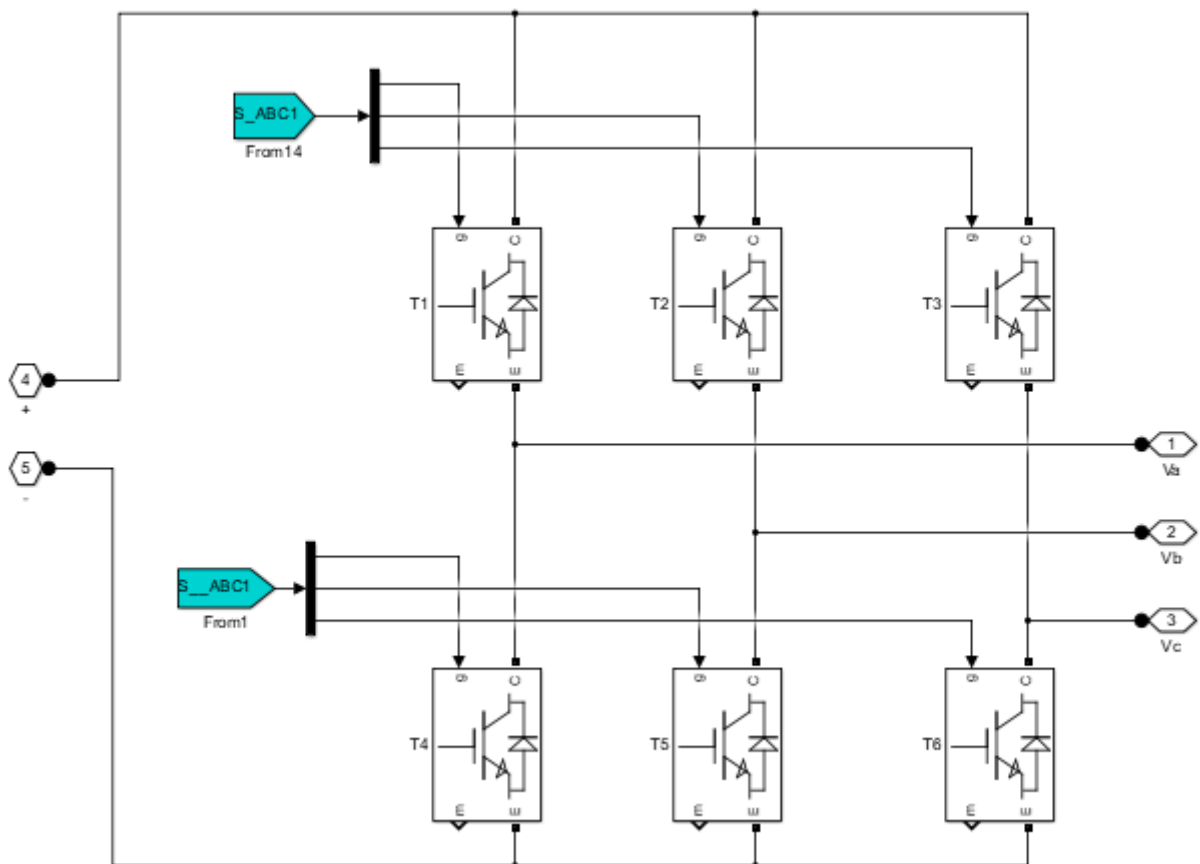


Figure 5: Onduleur à 2 niveaux.

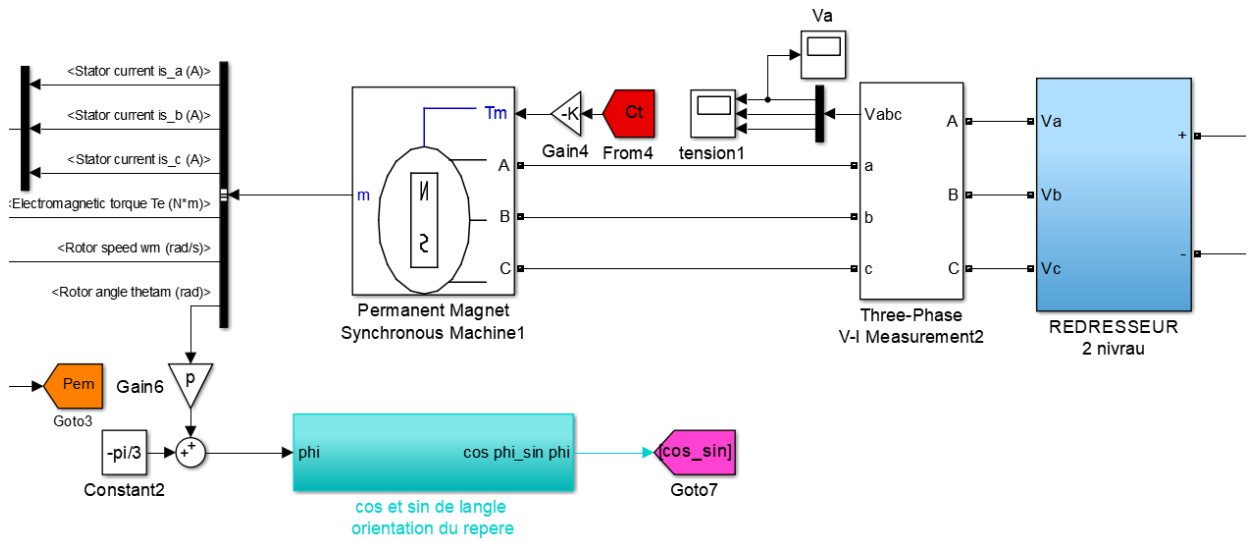


Figure 6: Côte machine (2 niveaux).

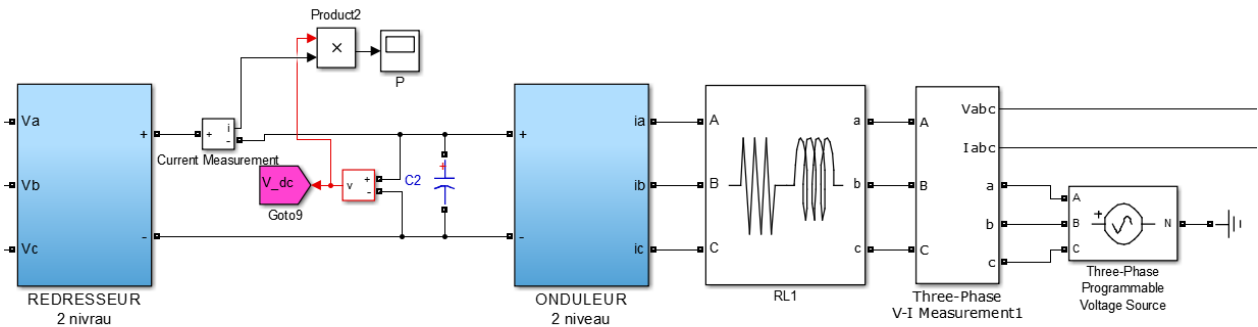


Figure 7: Côte réseaux (2 niveaux).

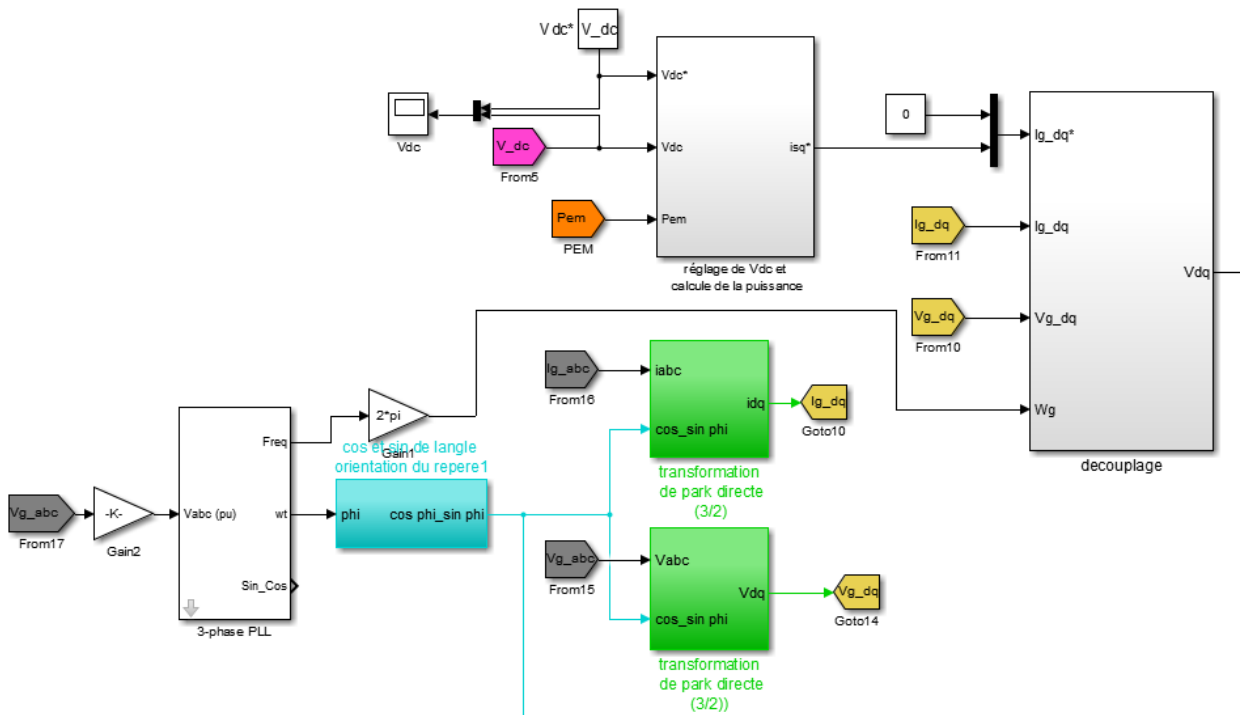


Figure 8: Commande Côte réseaux.

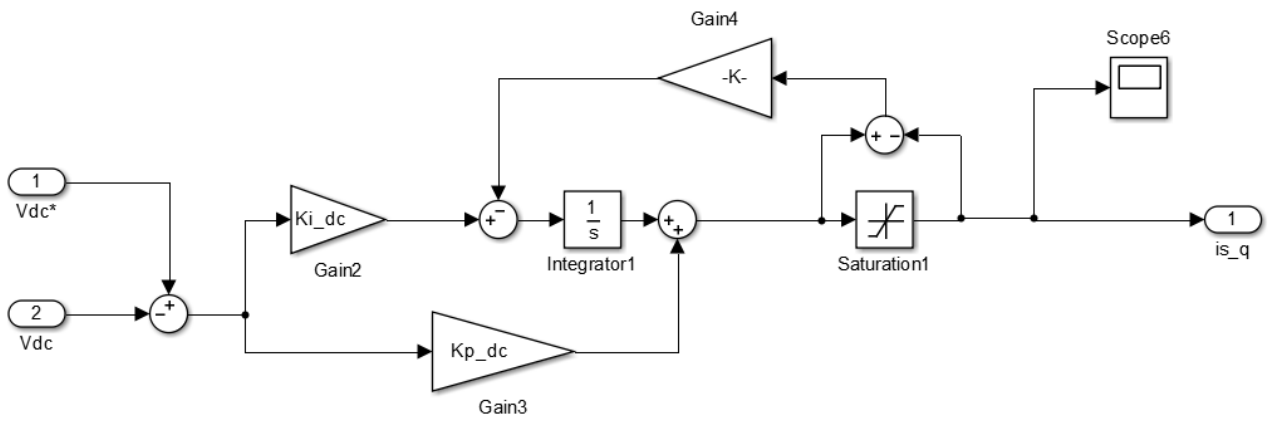


Figure 9: réglage de  $V_{dc}$ .

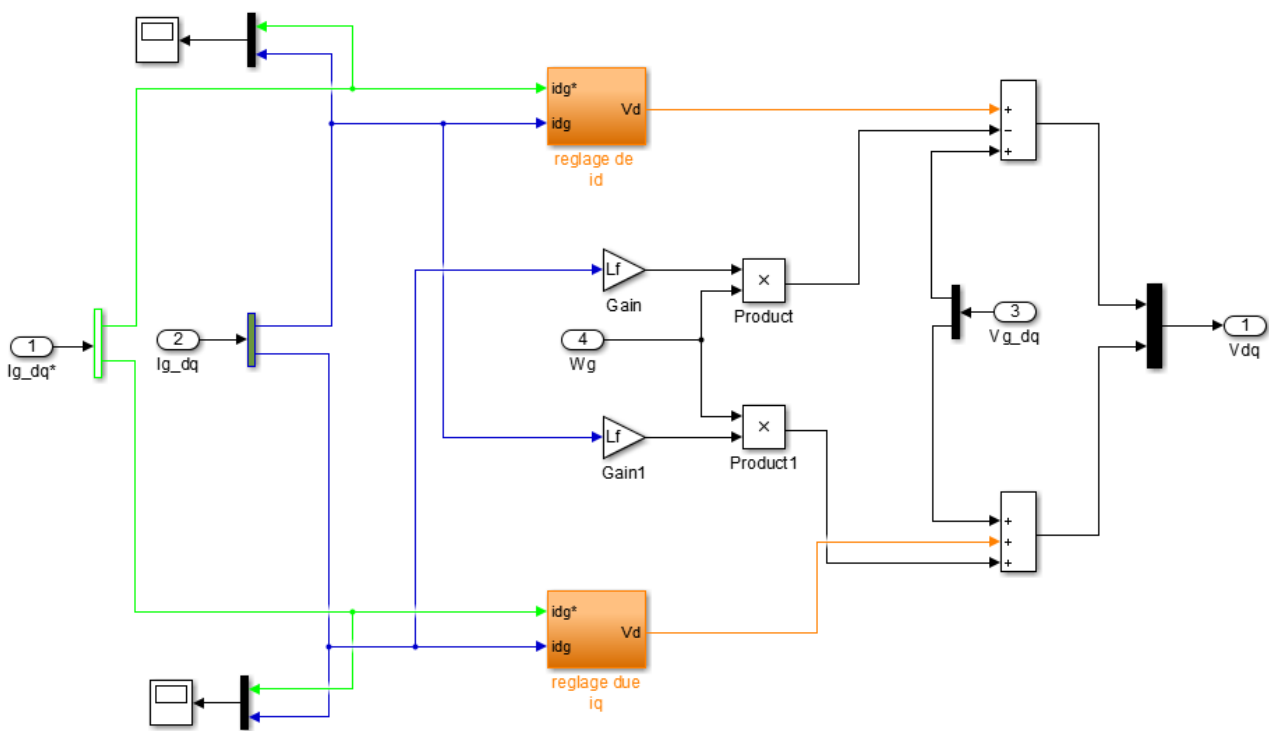


Figure 10: découplage Côte réseaux.

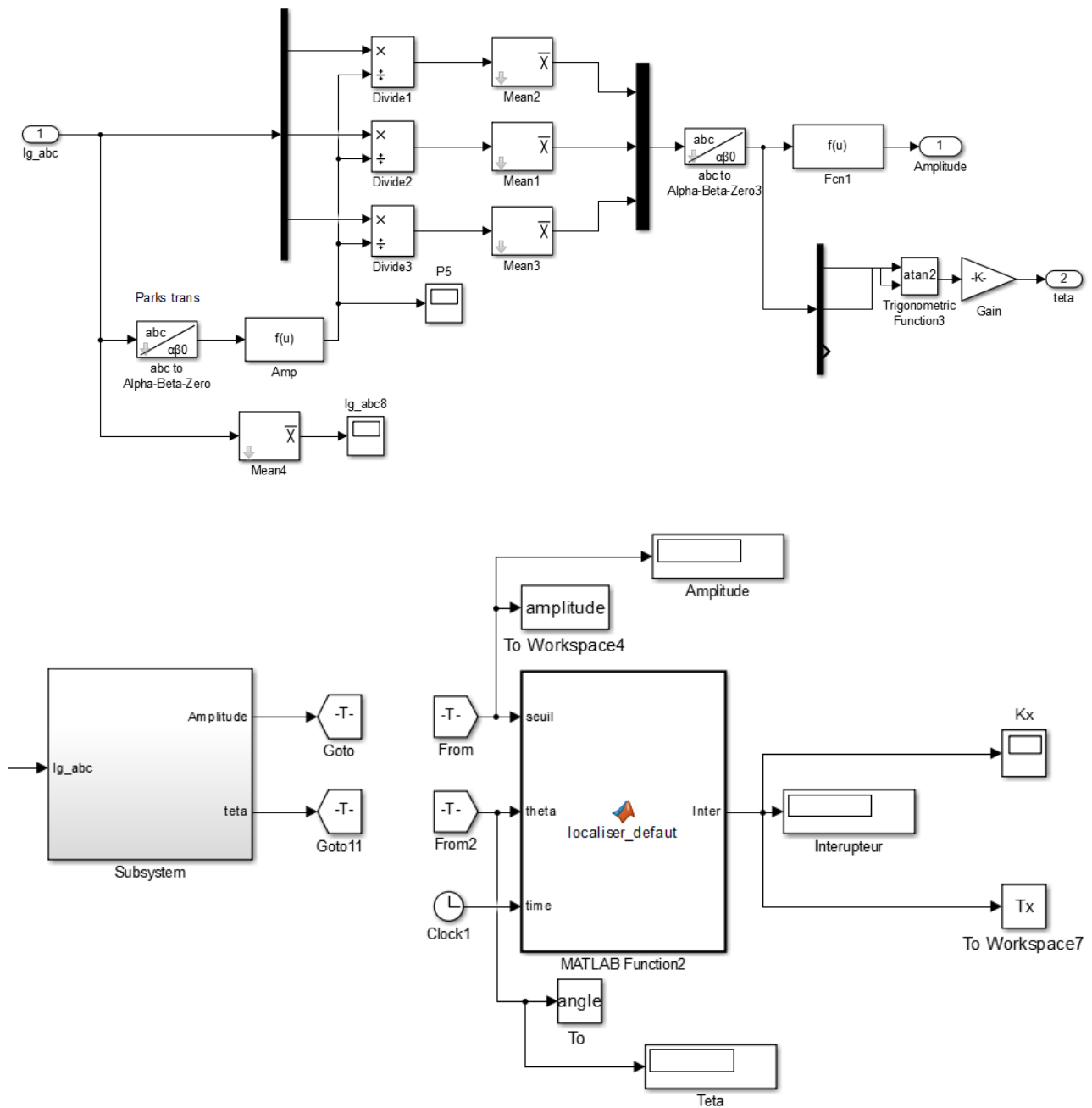


Figure 11: Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen (2 niveaux).

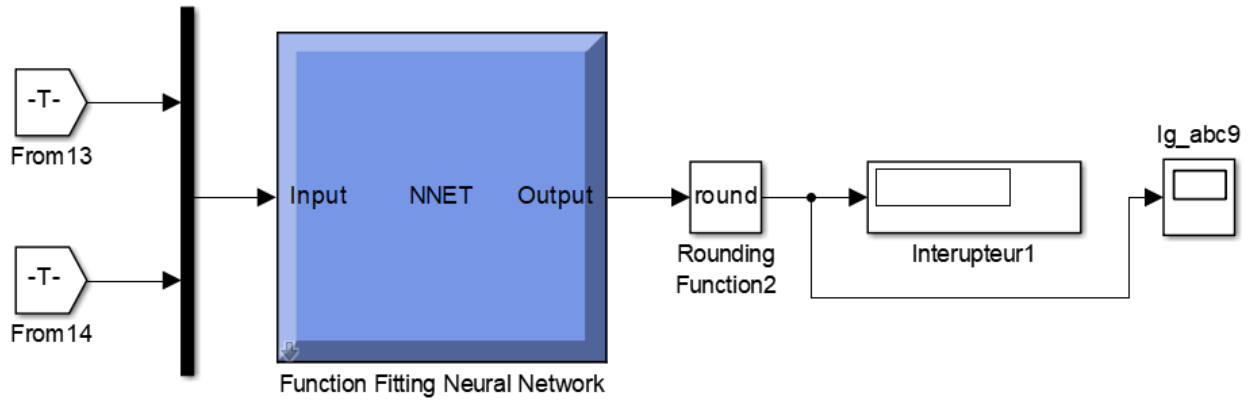


Figure 12: Diagnostic par RNA (2 niveaux).

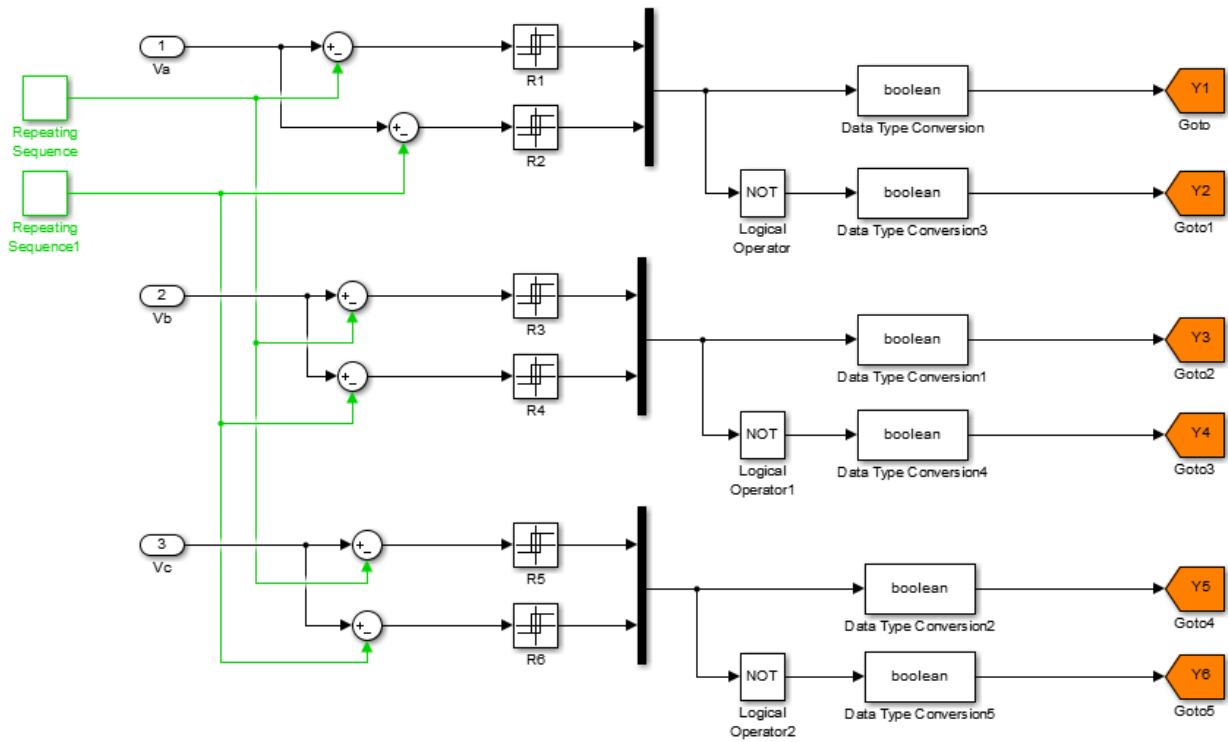


Figure 13: Modélisation Onduleur à MLI (3 niveaux).

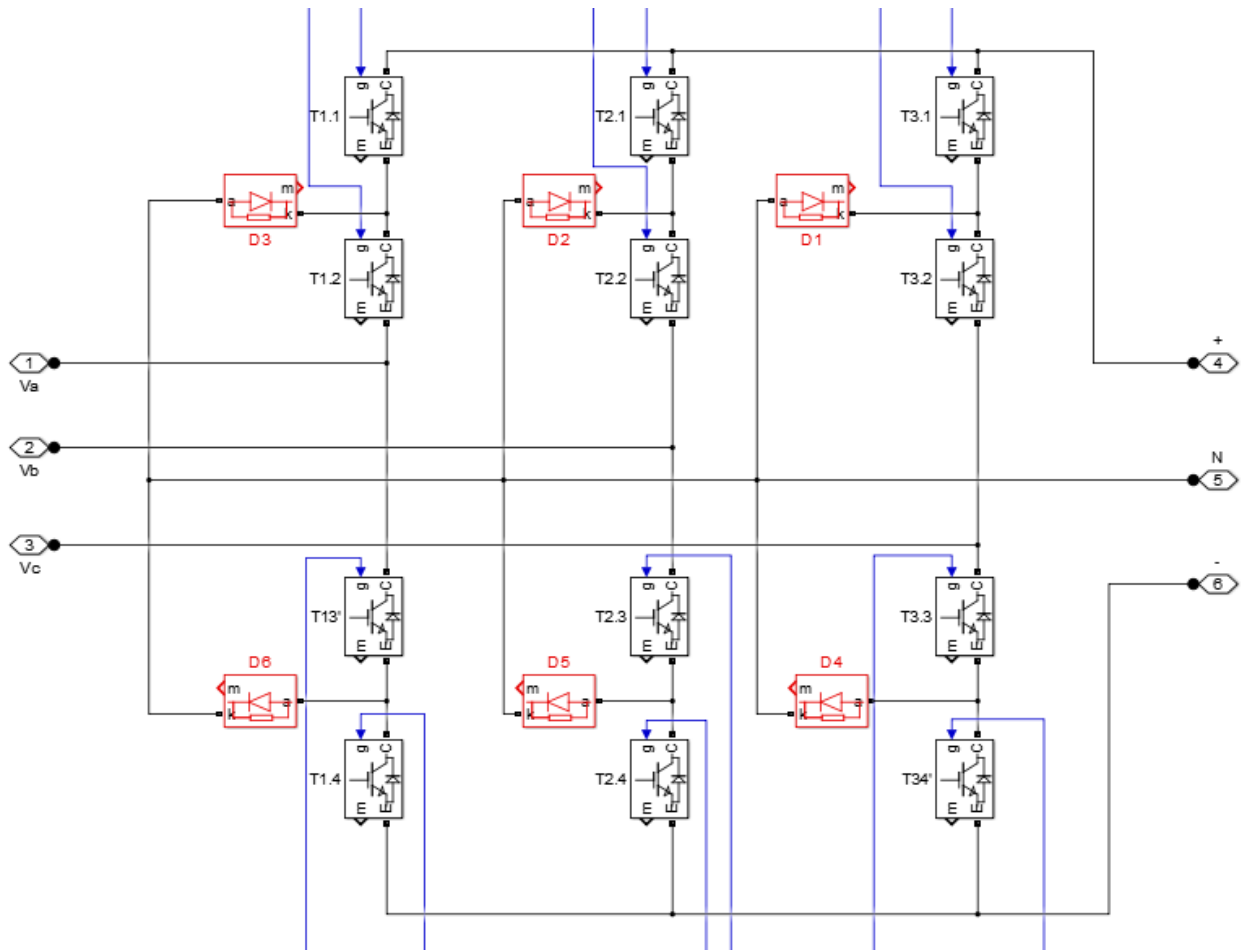


Figure 14: Onduleur à 3 niveaux.

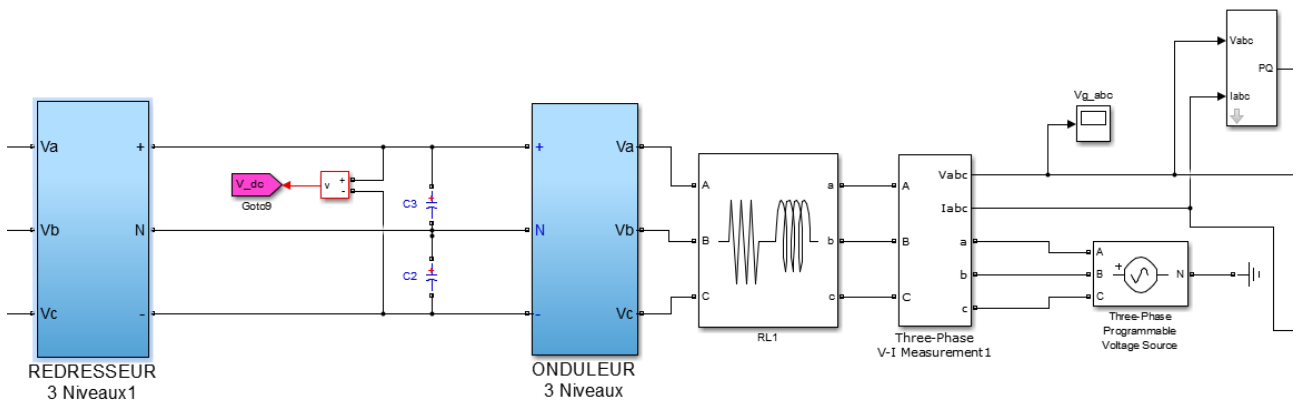


Figure 15: Côte réseaux (3 niveaux).



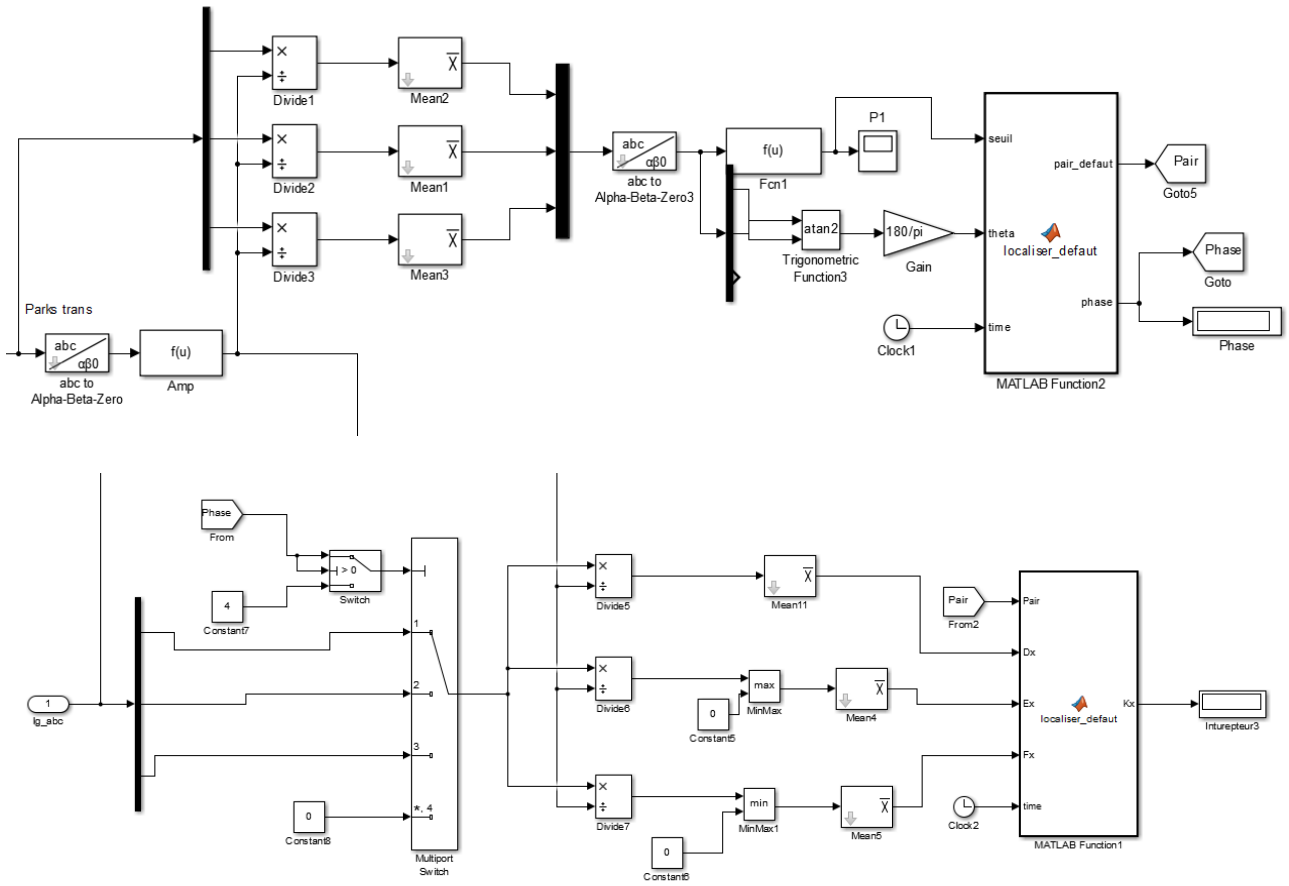


Figure 16: Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen (3 niveaux).

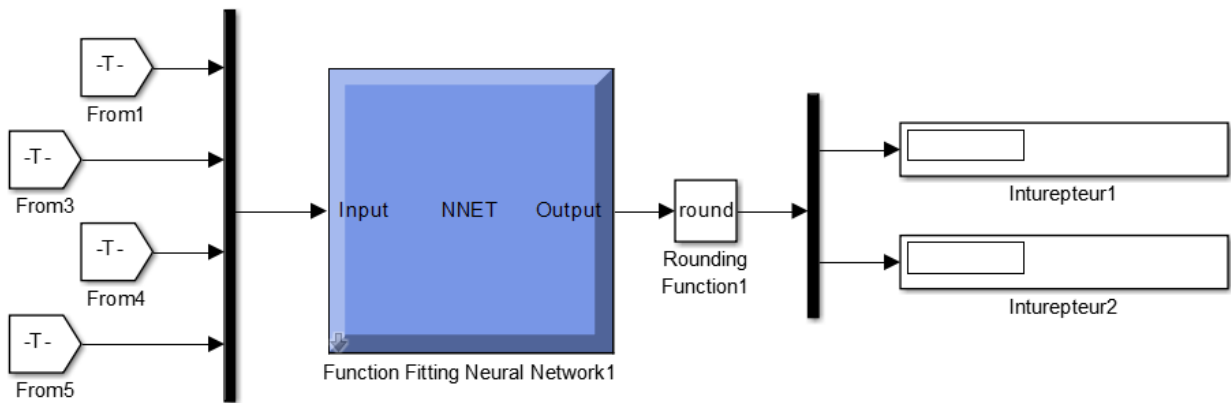


Figure 17: Diagnostic par RNA (3 niveaux).

### Résume :

Les topologies de convertisseurs à plusieurs niveaux offrent de grands avantages pour les applications sur les systèmes de production d'électricité connectés au réseau. Cette étude présente une approche avancée du diagnostic et de la localisation des défauts d'Interrupteur à circuit ouvert dans les convertisseurs de deux et trois niveaux de structure (NPC), qui sont intégrés aux systèmes de conversion d'énergie éolienne connectés au réseaux basé sur un générateur synchrone à aimants permanent (GSAP). Nous avons examiné la partie de puissance concerne la turbine, le multiplicateur, GSAP, convertisseurs d'interface de ligne AC/DC/AC et le réseau électrique. Afin de déterminer la MPPT et la commande cote machine et cote réseaux pour les deux convertisseurs à deux et trois niveaux, On a constaté que l'onduleur à 3 niveaux offre des résultats plus satisfaisants que celui à 2 niveaux en ce qui concerne la qualité d'énergie, les harmoniques et le THD. Enfin, les méthodes proposées utilisées sont l'Approche Vecteur de Park à Courant Moyen (ACPV) et le Réseau Neuronal Artificiel (RNA) pour détecter et isoler les défauts avec une précision et une vitesse élevée. L'ACPV propose une solution rapide et performante pour des applications spécifiques et clairement définies, tandis que le RNA fournit une grande souplesse, particulièrement bénéfique pour gérer des données complexes et diversifiées. Les méthodologies sont validées par le logiciel Matlab/Simulink. Les résultats de simulation montrent que l'approche basée sur le RNA rend la gestion des défaillances beaucoup plus fiable et efficace chez les convertisseurs, cela améliore la stabilité et les performances du système complet connecté au réseau.

**Mots clés :** Diagnostic des défauts, Interrupteur à circuit ouvert, réseau neuronal artificiel, Onduleur, système de conversion d'énergie éolienne.

### Abstract :

Multi-level converter topologies offer great advantages for applications on power generation systems connected to the grid. This study presents an advanced approach to the diagnosis and localization of open circuit switch defects in two- and three-level structure converters (NPCs), which are integrated into wind energy conversion systems connected to networks based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG). We examined the power part concerning the turbine, the multiplier, PMSG, AC/DC/AC line interface converters and the power grid. In order to determine the MPPT and machine rating control and grid rating for both two- and three-level converters, it was found that the 3-level converter offers more satisfactory results than the 2-level in terms of energy quality, harmonics and THD. Finally, the proposed methods used are the Park Medium Current Vector Approach (ACPV) and the Artificial Neural Network (ANN) to detect and isolate defects with high accuracy and speed. ACPV offers a fast and powerful solution for specific and clearly defined applications, while ANNs provide high flexibility, beneficial for managing complex and diversified data. The methodologies are validated by the Matlab/Simulink software. The results show that the ANN-based approach makes failure management much more reliable and efficient in converters, improving the overall stability and performance of systems connected to the network.

**Keywords:** Fault diagnosis, Open circuit switch, artificial neural network, inverter, wind energy conversion system.

توفر الطوبولوجيا المتحولة المتعددة المستويات مزايا كبيرة للتطبيقات على نظم توليد الطاقة الكهربائية المرتبطة بالشبكة. تقدم هذه الدراسة نهجا متقدما في تشخيص وتحديد موضعيات عيوب الدوائر المفتوحة في محولات بنية ذات مستويين أو ثلاثة مستويات، وهي مدمجة في نظم تحويل طاقة الرياح المرتبطة بالشبكات القائمة على مولد مغنطيسي دائم متزامن (PMSG). وفحصنا الجزء الكهربائي المتعلق بالتوربينة، والمضاعف، وأجهزة PMSG، ومحولات واجهات خطوط AC/DC/AC، وشبكة الطاقة. وبغية تحديد مقياس MPPT ومراقبة التصنيف الآلي وتصنيف الشبكة لكل من المحولات ذات المستويين الثاني والثالث، تبين أن المحولات ذات المستويات الثلاثة تقدم نتائج مرضية أكثر من ذات المستويين من حيث نوعية الطاقة، والتوافقيات، وإجمالي التشوه التوافقي (THD). وأخيراً، فإن الأساليب المقترحة المستخدمة هي نهج المتجه بارك للتيار المتوسط (ACPV) والشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لكشف وعزل العيوب بدقة وسرعة عاليتين. وتوفر هذه الخطة حلاً سريعاً وقوياً لتطبيقات محددة ومحددة بوضوح، في حين توفر التقارير السنوية مرونة عالية ومفيدة في إدارة البيانات المعقدة والمتنوعة. ويتم التحقق من المنهجيات بواسطة برنامج Matlab/Simulink وتبين النتائج أن النهج القائم على أساس البيانات السنوية يجعل إدارة الأعطال أكثر موثوقية وكفاءة في المحولات، مما يحسن الاستقرار والأداء الشاملين للنظم المرتبطة بالشبكة. الطاقة المتجددة.

**الكلمات الرئيسية:** تشخيص الأعطال، الدائرة المفتوحة، الشبكة العصبية الاصطناعية، العاكس، نظام تحويل طاقة الرياح.