

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
AC/DC à deux et trois niveaux dans une chaîne
éolienne basée sur une GSAP**

Préparé par : BENDJAIDA Redha et BENALLAL Abdelkader Farouk

Devant le Jury :

Noms et prénoms	Grade	Qualité
B. BELABBAS	MCA	Président
S. LARIBI	MCA	Examinateur
S. BELFEDHAL	MCB	Examinateur
M. LARBI	Pr	Encadrants
D. TOUMI	MCA	

PROMOTION 2022 / 2023

Remerciements

Au début, nous tenons à remercier et d'exprimer notre gratitude à Allah de m'avoir donné le courage et la santé durant toutes ces années d'étude, pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées. Nous remercions notre encadrant monsieur LARBI M'hamed, pour son soutien tout au long de cette mémoire. Nous remercions aussi notre encadrant monsieur TOUMI Djilali pour son précieux aide dans le cheminement de cette étude. Nous tenons également à remercier tous les membres de jury.

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

GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
DC/AC	Direct current / Alternative current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel Intégral
ACPV	Average Current Park's Vector

Notions générales

v	vitesse de vent (m/s)
$C_{aér}$	couple aérodynamique de l'éolienne (Nm)
β	angle d'orientation des pales (rad)
R	rayon de la pale (m)
C_g	couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur (Nm)
Ω	vitesse angulaire (rad/s)
Ω_t	vitesse angulaire de la turbine (rad/s)
$\Omega_{méc}$	vitesse mécanique de la génératrice (rad/s)
Ω_g	vitesse de rotation de la génératrice (rad/s)
Ω_{ref}	vitesse mécanique de référence (rad/s)
G	gain du multiplicateur de vitesse
J	moment d'inertie total ($Kg.m^2$)
J_t	moment d'inertie de la turbine ($Kg.m^2$)
J_g	moment d'inertie de la génératrice ($Kg.m^2$)
P_v	puissance de l'éolienne (W)
ρ	masse volumique de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$
S	surface circulaire balayée par la turbine (m^2)
λ	coefficient de vitesse spécifique
λ_{opt}	vitesse relative optimale de l'éolienne
$P_{éol}$	puissance captée par la turbine éolienne (W)
P_{Betz}	puissance maximale de l'éolienne (W)
C_p	coefficient de puissance
C_{pBetz}	coefficient de puissance maximal théorique
$C_{éol}$	couple aérodynamique de la turbine éolienne (Nm)
C_t	couple de la turbine (Nm)
$C_{méc}$	couple mécanique total appliquée au rotor de l'éolienne (Nm)
C_{em}	couple électromagnétique (Nm)
C_f	couple de frottement visqueux (Nm)
f_v	coefficient de frottement visqueux ($Nm/rad.s^{-1}$)
$P_{aér}$	aérodynamique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur (W)
$P_{élec}$	puissance électrique produite (W)

K_p	coefficient de l'action proportionnelle du régulateur
K_i	coefficient de l'action intégrale du régulateur
V_a, V_b, V_c	tensions statoriques dans le repère (abc) (V)
d	axe direct dans le repère de Park
q	axe quadratique dans le repère de Park
V_{dqo}	tension dans le repère de Park (V)
$[P(\theta)]$	matrice de passage dans le repère de Park
i_a, i_b, i_c	courants de phase statorique repère triphasé (A)
φ_f	valeur crête du flux à vide à travers l'entrefer (Wb)
i_d, i_q	courants dans le repère de Park (A)
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	vecteur des flux traversant les bobines statoriques (Wb)
R_s	résistance d'une phase statorique (Ω)
M_S	inductance mutuelle entre les enroulements statoriques (H)
P	nombre de pair de pôles
ω	vitesse électrique de rotor (rad/s)
L_d, L_q	inductances cycliques dans le repère de Park (H)
θ_e	angle électrique (rad)
θ	angle mécanique (rad)
i_{sd}, i_{sq}	courants dans le repère de Park (A)
U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}	tensions d'entrée à l'onduleur (V)
S_a, S_b, S_c	signaux de commande MLI des onduleurs
U_m	indice de modulation (V)
F_p	fréquence de la porteuse (Hz)
F_r	fréquence du signal de référence (Hz)
V_{mr}	amplitude de la tension de référence (V)
V_{mp}	amplitude de la tension de la porteuse (V)
U_m	taux de modulation

TABLE DES MATIERES

Remerciements	
Dédicace	
Liste symboliques	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	2
<i>Chapitre I : Modélisation d'une Chaîne de Conversion Eolienne</i>	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de l'énergie éolienne	4
I.2.1 Descriptif d'une éolienne	4
I.2.1.1 Éolienne à vitesse fixe	5
I.2.1.2 Éolienne à vitesse variable	5
I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	5
I.2.2.1 Avantages.....	5
I.2.2.2 Inconvénients.....	6
I.2.3 Classification des éoliennes.....	6
I.2.4 Différents types d'éoliennes.....	6
I.2.4.1 Eolienne à axe vertical (VAWT).....	6
I.2.4.2 Eolienne à axe horizontal (HAWT).....	7
I.3 Modélisation du système de production éolienne.....	7
I.3.1.1 Modélisation du vent	8
I.3.1.2 La puissance extraite du vent.....	9
I.3.1.3 Loi de Betz.....	10
I.3.1.4 Coefficient de vitesse spécifique	10
I.3.1.5 Coefficient de puissance (<i>C_p</i>)	11
I.3.2 Modèle de la turbine éolienne	12
I.3.2.1 Modélisation de la turbine (partie mécanique)	12
I.3.3 Modèle du multiplicateur	13
I.3.4 Modèle de l'arbre mécanique.....	13
I.4. Principe de la MPPT	14
I.4.1 Maximisation de puissance avec asservissement	14
I.4.2 Coefficient de puissance.....	15
I.5 Les résultats de simulation	16
I.5.1 Résultats de simulation à vitesse variable	16

I.5.2 Les résultats de simulation à vitesse fixe	17
I.6 Conclusion	18

Chapitre II : Commande du Système Eolien

II.1. Introduction	20
II.2 Génératrice à aimants permanents	20
II.3 Les avantages et les inconvénients	20
II.3.1 Avantages	20
II.3.2 Inconvénients	21
II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	21
II.4.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP.....	21
II.4.2 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé.....	21
II.4.2.1 Équation électrique.....	21
II.4.2.2 Equation magnétique.....	23
II.4.3 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq lie au rotor	23
II.4.3.1 Transformation de Park	23
II.4.3.2 Equations électriques.....	24
II.4.3.3 Equations magnétiques.....	24
II.4.3.4 Équations mécaniques	25
II.4.3.5 Expression du couple électromagnétique	25
II.5 Modélisation du convertisseur statique	25
II.5.1 Convertisseur statique continu-alternatif	25
II.5.1.1 Définition de l'onduleur	25
II.5.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension	26
II.5.1.2.1 onduleur deux niveaux	26
II.5.1.2.1 onduleur trois niveaux	27
II.5.2 MLI sinus triangle	28
II.7 Principe de la commande vectorielle.....	29
II.7.2 Modelé de la machine à commander.....	30
II.7.3 Commande vectorielle direct par compensation	30
II.7.3.1 Technique de découplage	30
II.8 Détermination des régulateurs	31
II.8.1 Calcul des régulateurs de courant	31
II.8.2 Calcul du régulateur de vitesse	33
II.8.3 Limitation de courant	35
II.9 Résultats de simulation.....	35

II.9.1 Résultats pour un onduleur deux niveaux	36
II.9.2 Résultats pour un onduleur trois niveaux	37
II.10 Interprétation	38
II.11 Conclusion	38
<i>Chapitre III : Diagnostic des Défauts des Convertisseurs</i>	
III.1 Introduction	40
III.2 Définition	40
III.3 Etapes de diagnostic	40
III.4 Définition et classification des défauts.....	41
III.4.1 Différents type de défaut.....	41
III. 5 Défauts internes du convertisseur	42
1.5.1 Court-circuit.....	42
1.5. 2. Circuit ouvert	42
III.6 Méthodes de détections des défauts	43
III.6.1 Approche des vecteurs de Park	43
III.6.2 Analyse de la trajectoire du vecteur courant.....	43
III.6.3 Analyses des défauts par la FFT	44
III.6.4 Diagnostic par logique floue.....	44
III.7 Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert	45
III.7.1 Onduleur deux niveaux	45
III.7.2 Onduleur trois niveaux.....	46
III.8 Détection des défauts de circuit ouvert	47
III.8.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen.....	47
III.8.2 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur deux niveaux	48
III.8.2.1 Exmple de détection des défauts avec onduleur deux niveaux.....	50
III.8.3 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur trois niveaux.....	52
III.8.3.1 Exemple de détection des défauts	53
III.9 Conception d'un système de diagnostic avec la logique floue sous Matlab	57
III.9.1 Structure du système d'inférence floue (SIF)	57
III.9.2 Fuzzification des variables d'entées et de sorties	57
III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entées (Pair)	57
III.9.2.é Fuzzification de la variable d'entées (i_{xn})	58
III.9.2.3 Fuzzification de la variable d'entées (ixnpos)	58
III.9.2.4 Fuzzification de la variable d'entées (ixnneg)	59

III.9.2.5 Fuzzification de la variable de sortie	59
III.9.3 Inférence	60
III.9.4 Défuzzification.....	60
III.10 Résultats de simulation.....	61
III.11 Conclusion.....	62
Conclusion générale	64
Annexes	67
Références bibliographique	72
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I.2 : Types d'éolienne.....	7
Figure I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	8
Figure I.4 : Bloc de simulation de la vitesse du vent.....	9
Figure I.5 : Evolution de profil du vent.....	9
Figure I.6 : Tube de courant autour d'une éolienne.....	10
Figure I.7 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	11
Figure I.8 : schéma bloc de la turbine éolienne.....	12
Figure I.9 : Modèle mécanique de la turbine.....	13
Figure I.10 : Schémas bloc du modèle de la turbine vitesse.....	14
Figure I.11 : Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	15
Figure I.12 : Coefficient de puissance de l'éolienne.....	18
Figure I.13 : Coefficient C_p	16
Figure I.14 : Coefficient de vitesse λ	16
Figure I.15 : puissance aérodynamique à vitesse variable.....	17
Figure I.16 : Couple du multiplicateur à vitesse variable.....	17
Figure I.17 : puissance aérodynamique à vitesse fixe.....	17
Figure I.18 : couple du multiplicateur à vitesse fixe.....	18
Figure II.1 : Structure du générateur éolien étudié.....	20
Figure II.2 : Passage de système triphasé au système biphasé.....	23
Figure II.3 : alimentation avec onduleur.....	25
Figure II.4 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	26
Figure II.5 : bras d'onduleur NPC à trois niveaux.....	27
Figure II.6 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.....	28
Figure II.7 : Principe de MLI sinus-triangle.....	29
Figure II.8 : principe découplage par compensation.....	31
Figure II.9 : Commande des courants i_d et i_q en deux boucles indépendantes.....	31
Figure II.10 : Boucle de régulateur de vitesse.....	33
Figure II.11 : Boucle de régulation de vitesse.....	34

Figure II.12 : Régulateur PI avec anti-windup	35
Figure II.13 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP.....	36
Figure II.14 : Courant direct et quadratique de GSAP.....	36
Figure II.15 : Courant statorique de GSAP.....	36
Figure II.16 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP.....	37
Figure II.17 : Courant direct et quadratique de GSAP.....	37
Figure II.18 : Courant statorique de GSAP.....	37
Figure III.01 : Différents types de défauts d'un système	41
Figure III.02 : Court-circuit sur un interrupteur d'un bras	42
Figure III.03 : Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras	43
Figure III.04 : Courant triphasé statorique dans le cas de défaut	45
Figure III.05 : Couple dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur T6.	46
Figure III.06: Courant triphasé statorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur T ₂₃	46
Figure III.07 : Le couple dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur T ₂₃	47
Figure III.08 : Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.....	49
Figure III.09 : Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	49
Figure III.10 : La valeur moyenne des courants triphasé.....	50
Figure III.11 : L'amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	50
Figure III.12 : Phase et Interrupteur en défaut	50
Figure III.13 : La valeur moyenne des courants triphasés	51
Figure III.14 : L'amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	51
Figure III.15 : Phase et Interrupteur en défaut	51
Figure III.16: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	52
Figure III.17 : Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.....	53
Figure III.18 : Courants moyenne du premier bras	53
Figure III.19 : Courants moyenne du deuxième bras	53
Figure III.20 : Valeur moyenne du troisième bras	54
Figure III.21 : Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.....	54
Figure III.22 : Valeur moyenne du courant triphasée et courant normalisée	55

Figure III.23 : L'amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	55
Figure III.24 : La phase et Interrupteur en défaut.	55
Figure III.25 : La valeur moyenne du courant triphasée.....	56
Figure III.26 : L'amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.....	56
Figure III.27 : La phase et Interrupteur en défaut.....	56
Figure III.28 : schéma bloc du SIF.....	57
Figure III.29 : Fuzzification de la variable d'entrée « Pair ».....	58
Figure III.30 : Fuzzification de la variable d'entrée « ixn ».....	58
Figure III.31 : Fuzzification de la variable d'entrée « ixnpos ».....	59
Figure III.32 : Fuzzification de la variable d'entrée « ixnneg ».....	59
Figure III.33 : Fuzzification de 'sortie « interrupteur ».....	59
Figure III.34 : présentation des règles d'inférence.....	60
Figure III.35 : Exemple de défuzzification en cas de défaut T1.....	61
Figure III.36 : Exemple de défuzzification en cas de défaut T4.....	61
Figure III.37 : Cas de défaut de l'interrupteur T ₂₂	62

Liste des tableaux

Tableau I.1 ; Classification des éoliennes selon leur puissance nominale.....	6
Tableau I.2: Coefficients définissant l'évolution de C_p	12
Tableau III.1: Diagnostic du défaut d'ouverture d'IGBT utilisant le vecteur de Park.....	48

Introduction générale

L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a connu une croissance rapide ces dernières décennies en raison de la demande croissante en énergie, des préoccupations environnementales liées aux énergies fossiles et nucléaires, ainsi que des politiques gouvernementales visant à promouvoir les énergies renouvelables. Les parcs éoliens ont atteint une capacité comparable à celle des centrales électriques traditionnelles, ce qui nécessite une réglementation similaire pour leur raccordement au réseau national conformément aux normes de connexion. Cependant, le choix du type d'aérogénérateur pour une éolienne est complexe et dépend de plusieurs critères tels que la structure, la topologie du convertisseur, l'emplacement de la turbine, les performances et les coûts, rendant ainsi la sélection du générateur approprié une tâche difficile.

La commande vectorielle est une approche qui permet à la génératrice synchrone à aimants permanents de présenter des caractéristiques similaires à celles d'une génératrice à courant continu en termes de linéarité et de découplage. Cependant, cette méthode de commande nécessite une identification précise des paramètres de la machine.

Les défaillances d'un convertisseur statique dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne peuvent provenir de sa commande, de ses composants de puissance ou de ses capteurs, entraînant une perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase et de puissance. Il est donc crucial de détecter rapidement ces défauts afin d'éviter leur propagation aux autres composants du système et de mettre en place des méthodes de détection et de compensation des défauts.

Pour mener notre étude, ce mémoire est structuré de la manière suivante :

le premier chapitre présente l'état de l'art de l'énergie éolienne, la modélisation du système de production éolienne et la mise en œuvre de la stratégie du MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans le deuxième chapitre, nous développons un modèle mathématique basé sur des hypothèses simplificatrices dans le repère (d, q) de la GSAP. Nous abordons également la modélisation de l'onduleur de tension de type deux niveaux et trois niveaux commandés par la technique MLI et la commande vectorielle appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents. Les régulateurs de type PI sont utilisés pour régler la vitesse et les courants, et les résultats des simulations sont présentés et analysés avec les deux types d'onduleur.

Le troisième chapitre traite l'étude des pannes d'onduleur à deux et trois niveaux, notamment les défauts de circuit ouvert. Nous effectuons une simulation pour un diagnostic classique utilisant le modèle vectoriel de Park, et explorons également l'utilisation de techniques intelligentes telles que la logique floue pour un diagnostic plus efficace. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de cette approche pour détecter en temps réel les défauts de circuit ouvert et évaluer leur gravité.

Chapitre I Modélisation d'une chaîne de conversion Eolienne

I.1. Introduction

Face à la flambée des prix du pétrole et l'épuisement, à plus ou moins long terme, des sources d'énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Le début du 21ème siècle a été marqué par une ruée spectaculaire vers les énergies renouvelables. L'ultime objectif est de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des sources conventionnelles d'énergies. [1]

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. Dans un premier temps, cette énergie n'a été exploitée que dans les domaines mécaniques. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine. On peut citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande. Par la suite, ce type d'énergie a servi à produire l'électricité. Au 16ème siècle, elle a été utilisée pour pomper de l'eau et couper le bois. [2]

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Les chiffres de son évolution montrent jour après jour l'ampleur de son intégrité dans le domaine de la production de l'énergie électrique. [3]

I.2. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.1) [4].

Cette conversion se fait en deux étapes : Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [5]

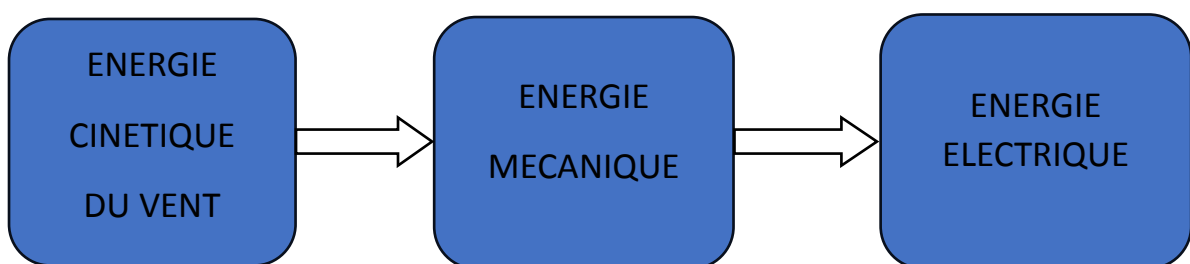


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.2.1 Descriptif d'une éolienne

À convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pales en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables.

Les deux familles d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques peuvent être classifiées selon leur vitesse : à savoir des turbines à vitesse fixe et d'autres à vitesse variable.

I.2.1.1 Éolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent être construites avec des pales à angle fixe, ce qui les rend moins chères, mais moins populaires pour les grandes éoliennes en raison de leur incapacité à régler l'angle des pales. Pour contrôler la surface de ces pales, on peut utiliser la méthode Stall, qui implique de changer l'angle d'orientation de la pale, ce qui peut causer un décrochage aérodynamique et un ralentissement des pales, entraînant une baisse de l'efficacité de la turbine au-delà d'une certaine vitesse. En outre, ces turbines peuvent causer des fluctuations importantes dans la tension et la puissance du réseau en cas de rafales de vent.

I.2.1.2 Éolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont conçues de manière à réduire les contraintes physiques exercées sur les pales par les rafales de vent, ce qui améliore l'efficacité aérodynamique du système. En conséquence, la production annuelle d'énergie d'une éolienne à vitesse variable est augmentée de 5 à 10 % par rapport à une éolienne à vitesse fixe. La turbine à vitesse variable ajuste constamment sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent, ce qui permet de maximiser la puissance et de fonctionner dans une plage de vitesses de vent exploitables, conduisant ainsi à une production d'énergie électrique élevée.

Cependant, la plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour maintenir la cohérence de fréquence avec le réseau. Cela nécessite donc l'intégration d'une interface d'électronique de puissance dans la chaîne de conversion. Un des facteurs limitants pour ce type d'éolienne réside dans le choix de la technologie du générateur. Traditionnellement, il existe trois principaux types de générateurs qui peuvent être envisagés pour les différents systèmes d'éoliennes.

- Les générateurs à courant continu (DC)
- Les générateurs à courant alternatif (AC) synchrones et asynchrones. [6]

I.2.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.2.2.1 Avantages :

- L'énergie éolienne s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de gaz à effet serre pour maintenir l'augmentation de la température moyenne de la terre dans des niveaux acceptables.
- Comme toutes les énergies vertes, l'énergie éolienne crée des nouveaux emplois et assure le développement de pays.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, écologique, fiable, et inépuisable.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie et elle est l'énergie la moins chère entre les autres énergies renouvelables.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'intégration des fermes éoliennes dans un réseau électrique déjà existant est très facile et l'installation de cette énergie est relativement simple.

I.2.2 Inconvénients :

- Le bruit mécanique ou aérodynamique engendré essentiellement par le multiplicateur.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant aléatoire, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques reste plus élevé surtout sur les sites moins ventés. [7]

I.2.3 Classification des éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I.1 présente une classification des turbines éoliennes. [8]

Tableau I.1: Classification des éoliennes selon leur puissance nominale.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	De 12 m à 45 m	de 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

I.2.4 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux principales grandes familles à savoir l'aéro-turbine utilisée : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.2.4.1 Eolienne à axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical (VAWT, vertical axis Wind turbine) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. L'axe de rotor est perpendiculaire au sol et elles n'ont besoin d'aucun système pour orienter dans la direction du vent. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. L'efficacité de cette structure reste médiocre par rapport aux éoliennes à axe horizontal puisqu'elles captent moins d'énergies dans le vent.

I .2.4.2 Eolienne à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes les plus répandues actuellement sont de type à axe horizontal (HAWT, horizontal axis Wind turbine). Elles sont basées des moulins à vent et sont constituées d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraîne la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripal étant le plus utilisé, car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien Ce type d'aérogénérateur à s'orienter suivant la direction du vent et a implanté sur le sol (on-shore) ou en mer (off-shore).

Le rotor de HAWT peut être placé en amont ou en aval de la nacelle . Dans la majorité des cas, ce sont des rotors du type "amont", c'est-à-dire que le vent souffle directement sur les pâles. Cela implique l'utilisation de pâles très rigides, car elles sont très exposées au vent. La configuration "aval" est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pâles plus fragiles. [7]



1) à axe verticale



2) à axe horizontal

Figure I.2 : Types d'éolienne

I .3 Modélisation du système de production éolienne

Les éoliennes à vitesse variable sont conçues de manière à réduire les contraintes physiques exercées sur les pales par les rafales de vent, ce qui améliore l'efficacité aérodynamique du système. En conséquence, la production annuelle d'énergie d'une éolienne à vitesse variable est augmentée de 5 à 10 % par rapport à une éolienne à vitesse fixe. La turbine à vitesse variable ajuste constamment sa vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent, ce qui permet de maximiser la puissance et de fonctionner dans une plage de vitesses de vent exploitables, conduisant ainsi à une production d'énergie électrique élevée.

Cependant, la plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour maintenir la cohérence de fréquence avec le réseau. Cela nécessite donc l'intégration d'une interface d'électronique de puissance dans la chaîne de conversion. Un des facteurs limitant pour ce type d'éolienne réside dans le choix de la technologie du générateur. Traditionnellement, il existe trois principaux types de générateurs qui peuvent être envisagés pour les différents systèmes d'éoliennes.[8]

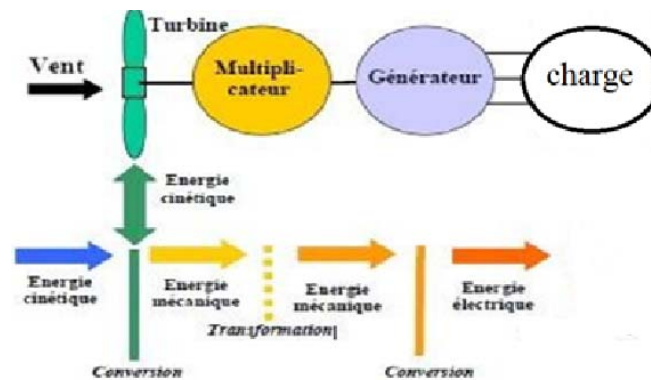


Figure I.3: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3.1.1. Modélisation du vent

La ressource éolienne, du point de vue de sa répartition fixe, est essentielle dans une maquette éolienne est donc cruciale pour le calcul de la production et de la rentabilité de l'électricité. Les propriétés dynamiques du vent sont essentielles pour étudier l'ensemble du système de conversion d'énergie car l'énergie éolienne, dans des conditions optimales, est le cube de la vitesse du vent. Vecteur tridimensionnel de la vitesse du vent. Cependant, la direction de la vecteur vitesse du vent considéré dans ce modèle est limitée à une dimension.[9]

la vitesse du vent est généralement représentée par une fonction numérique qui évolue dans le temps. La mesure exacte de la vitesse du vent à hauteur de turbine est très complexe, la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par la somme de plusieurs harmoniques voire la figure (I.4).

$$V = A + \sum_{k=1}^i (a_k) \sin(wkt + \varphi) \quad (\text{I.1})$$

$$V(t) = 6 + 2\sin(1.5t - \pi/5) + 2\sin(4t - \pi/3) + 1.5\sin(5.4t + \pi/12) + 0.5\sin(2.5t + \frac{\pi}{5}) \quad (\text{I.2})$$

Avec

A : Valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

wt : Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent [10]

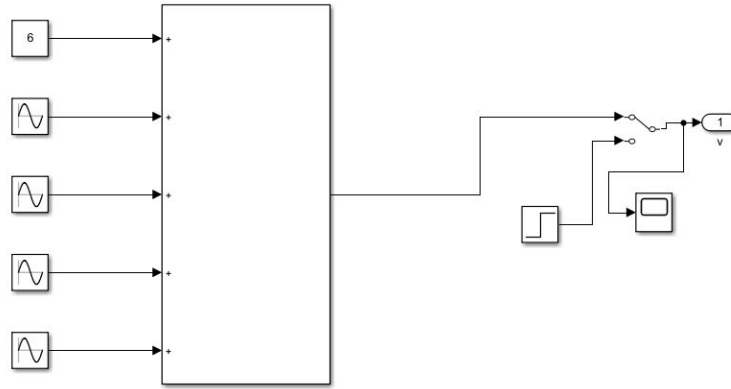


Figure I.4: Bloc de simulation de la vitesse du vent.

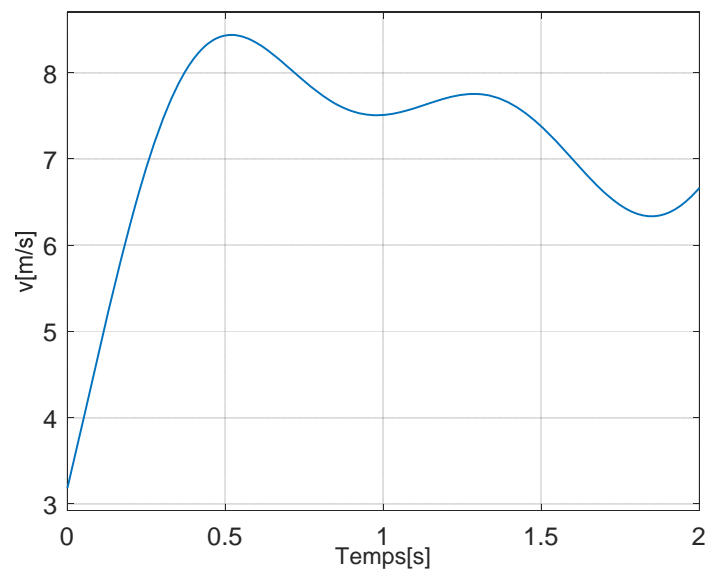


Figure I.5 : Evolution de profil du vent.

I.3.1.2 puissance extraite du vent

La puissance extraite du vent dépend de plusieurs facteurs, notamment de la vitesse du vent, de la densité de l'air et de la surface balayée par les pales de l'éolienne. La formule générale pour calculer la puissance extraite est:

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

Avec

ρ : représente la masse volumique d'air (Kg/m^3).

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

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

$$S = 2R \cdot H \quad (\text{I.4})$$

R : représente le Rayon de la voilure (m).

H : représente hauteur de la voilure (m)

I.3.1.3 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (I.8) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor. Soit $(v_1 + v_2)/2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est : [11]

$$m = \rho \cdot s \cdot (v_1 + v_2)/2 \quad (\text{I.5})$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton)

$$P_m = \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (\text{I.6})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.4) :

$$P_m = \frac{\rho \cdot s \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{I.7})$$

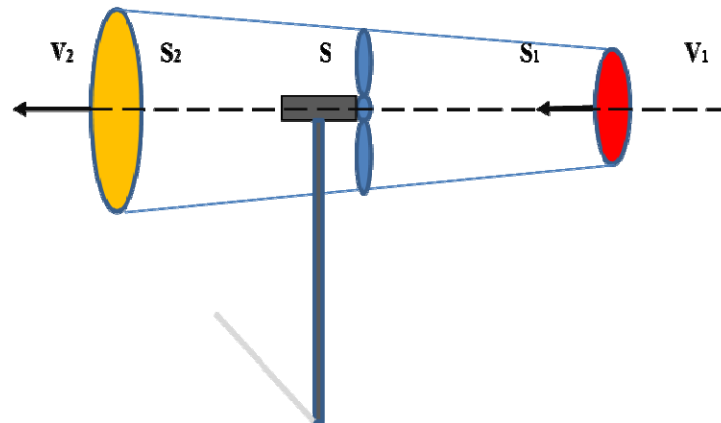


Figure I.6 : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{betz} = \frac{1}{2} \rho S V^3 * C_p \quad (\text{I.8})$$

Avec :

$C_{P\ Betz}$: coefficient de puissance de Betz.

Par conséquent, même si l'extraction de puissance sans pertes est possible, seulement 59% de l'énergie éolienne pourrait être utilisée par une éolienne. [12]

I.3.1.4 Coefficient de vitesse spécifique

Le coefficient de vitesse λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs est défini comme étant le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales $R V \Omega$ sur la vitesse instantanée du vent. [12]

$$\lambda = \frac{\Omega R v}{v} \quad (\text{I.9})$$

Où

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

Ω_t : Vitesse angulaire de la turbine éolienne (rad/sec)

I.3.1.5 Coefficient de puissance (C_p)

Au cours de ce mémoire, nous avons appris à connaître les notions de puissance d'une éolienne et coefficient de puissance ou coefficient de performance. Alors à cause des vitesses non nulles de l'aire derrière l'éolienne la puissance récupérée sur une éolienne est inférieure à la puissance du vent.

On définit alors ce qu'on appelle un coefficient de puissance comme le rapport de la puissance éolienne divisé par la puissance du vent. La C_p dépend du nombre des pales du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil de section) par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_{\acute{e}ol}}{P_v} \quad (I.10)$$

Avec :

$P_{\acute{e}ol}$ est la puissance captée par la turbine éolienne (w).

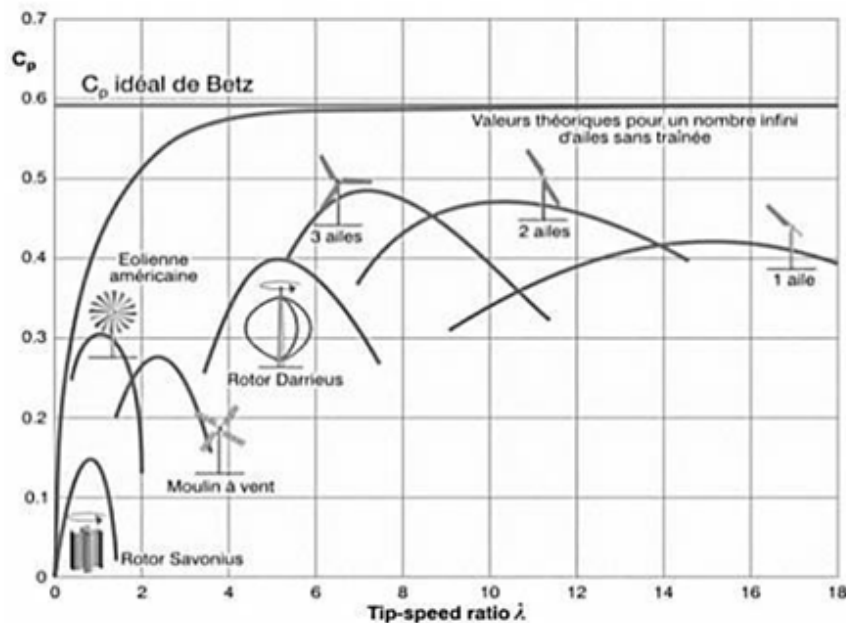


Figure I.7 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

La valeur maximale théorique possible de C_p et appelée limite de Betz, alors il faut garder à l'esprit théorie de Betz qui dit qu'on ne peut pas récupérer 100% de l'énergie mais qu'on maximum on va pouvoir récupérer 0.59 fois la puissance de vent :

$P_{betz} = 0.59 P_{vent}$ Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [2]

I.3.2 Modèle de la turbine éolienne

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure I.8.

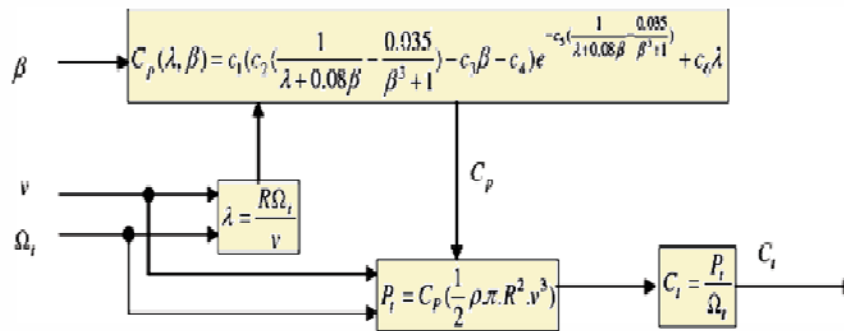


Figure I.8: schéma bloc de la turbine éolienne

Le coefficient de puissance de la turbine utilisé dans notre étude est donné comme suit :

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) \exp\left(\frac{-c_5}{\lambda_1}\right) + c_6 \lambda \quad (\text{I.11})$$

Avec :

Tableau I.2: Coefficients définissant l'évolution de C_p .

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

Dans cette formule, le paramètre λ_1 dépend également de λ et β .

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035^2}{1 + \beta^2}$$

1.3.2.1 Modélisation de la turbine (partie mécanique)

La partie mécanique de la turbine, comprend trois pales de longueur R_t . Elles sont fixées sur un dispositif d'entraînement destiné à transformer la vitesse de rotation d'une vitesse Ω_t du côté rotor, connecté à un multiplicateur permettant d'avoir une vitesse de rotation rapide du côté générateur.[6]

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.

J_m : Le moment d'inertie de la génératrice.

F_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.

Ω_m : La vitesse de rotation de la génératrice.

G : Le gain du multiplicateur de vitesse.

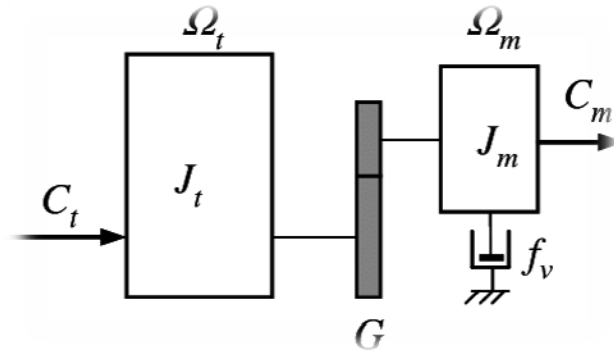


Figure I.9 : Modèle mécanique de la turbine.

I.3.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur assure la connexion entre la turbine et le générateur. Il est considéré comme rigide et est représenté par un simple coefficient de transmission. Les effets de l'élasticité et du frottement dans le multiplicateur sont négligés. Les pertes d'énergie dans le multiplicateur sont considérées comme négligeables. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de transmission du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur. [13]

$$G = \frac{\Omega_g}{\Omega_t} \qquad C_g = \frac{C_t}{G} \qquad \Omega_t = \frac{\Omega_g}{G}$$

Avec

C_t : Couple de la turbine.

Ω_t et Ω_g : vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur.

C_g : Couple après multiplicateur

G : Le gain du multiplicateur

I.3.4 Modèle de l'arbre mécanique

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \qquad (I.12)$$

La variation de la vitesse mécanique Ω_g est déterminée par la somme du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_m , qui est la combinaison du couple de la turbine après le multiplicateur, du couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , et du couple de frottement visqueux C_f , qui est décrit par la relation : [14]

$$C_f = f_v \Omega_g \quad (\text{I.13})$$

Le schéma bloc de la figure I.8 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_g de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique. La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au Système.

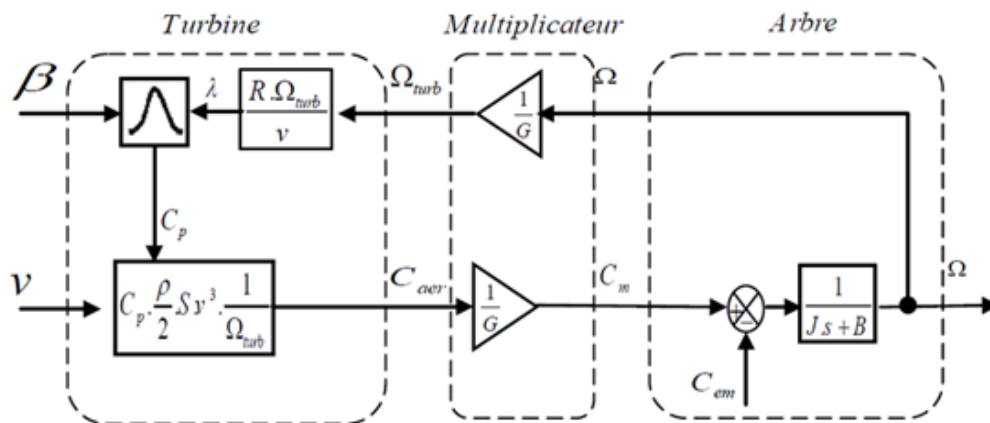


Figure I.10 : Schémas bloc du modèle de la turbine.

I.4. Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine, on s'intéresse au sens de variation de la grandeur. Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. [10]

I.4.1 Maximisation de puissance avec asservissement

Dans la structure présentée par la figure (I.11) ; la vitesse de rotation de référence est définie comme consigne à appliquer au régulateur du couple électromagnétique, pour traquer en permanence et efficacement la puissance maximale. Le correcteur de vitesse est de type proportionnel-intégral (PI). [13]

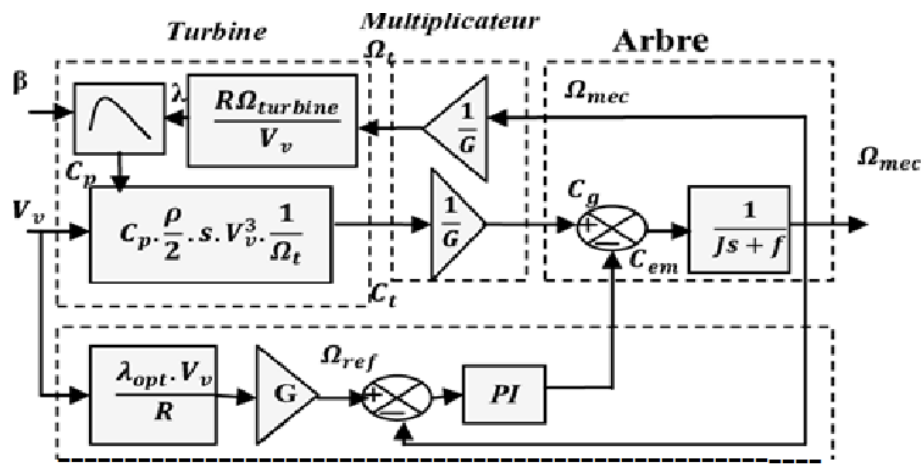


Figure I.11: Schéma bloc de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

I.4.2 Coefficient de puissance

Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Ce coefficient est calculé d’une façon empirique à partir de mesures expérimentales. Pour une éolienne donnée, le coefficient de puissance dépend de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine éolienne Ω_t , et de l’angle d’orientation des pales β . On définit λ la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v}$$

λ dépend du rayon des pales de l’éolienne, de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine éolienne. [15]

La Figure 1.12 représente un exemple de courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β .

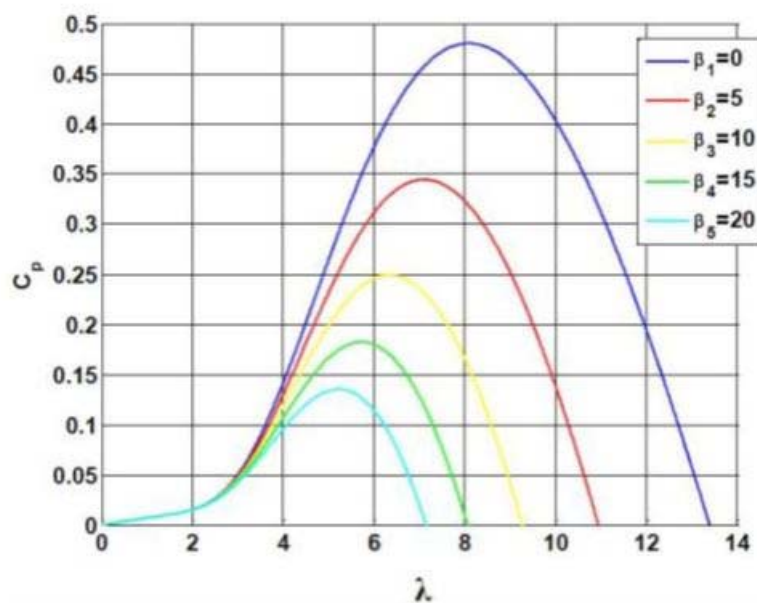


Figure 1.12 : Coefficient de puissance de l’éolienne.

Ce coefficient de puissance est toujours inférieur à la limite de Betz qui est de 0.59.

1.5 Les résultats de simulation

Les différentes simulations ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK sont donnés par les figures suivantes. Le profil de la variation du vent employé pour les simulations sont de deux vitesse : vitesse fixe et vitesse variable

1.5.1 Résultats de simulation à vitesse variable

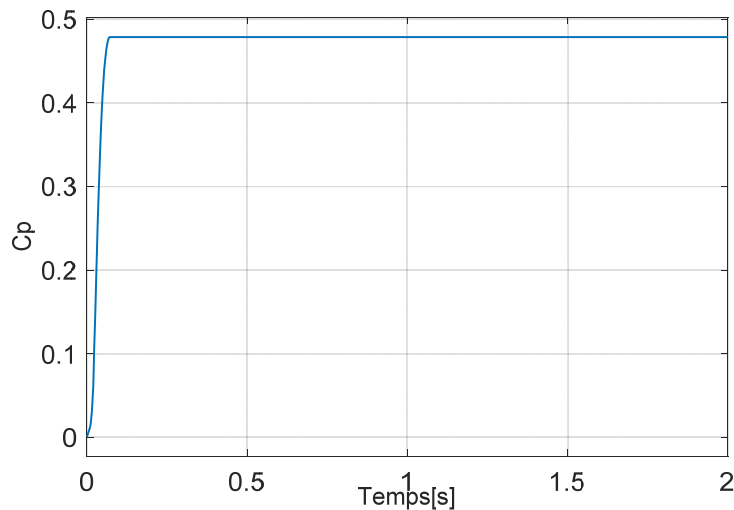


Figure I.13 : Coefficient C_p .

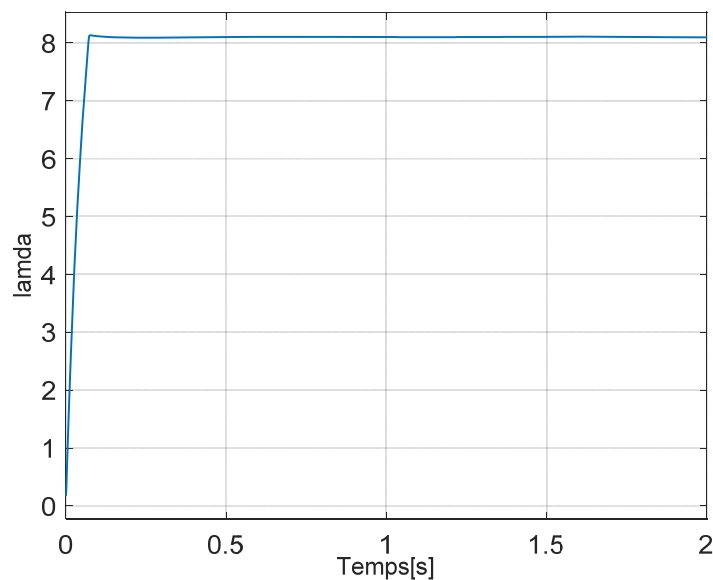


Figure I.14 : Coefficient λ .

On peut conclure que la commande par asservissement de la vitesse a permis de maintenir le coefficient de puissance à sa valeur maximale, qui est de 0,48, ainsi que la vitesse spécifique à sa valeur optimale de 8,1.

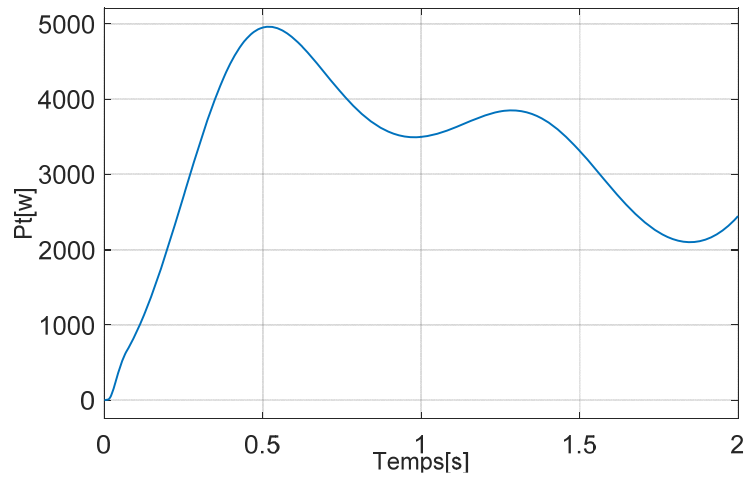


Figure I.15 : puissance aérodynamique à vitesse variable.

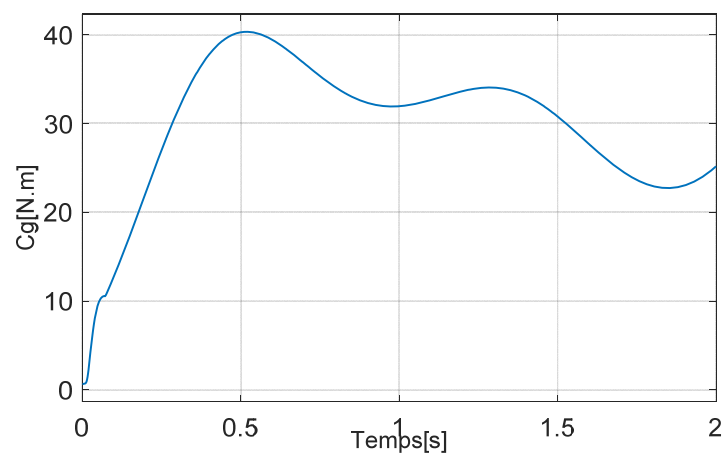


Figure I.16 : Couple du multiplicateur à vitesse variable

Puisque la vitesse du vent est variable et le coefficient C_p est maintenu à sa valeur maximale.

I.5.2 résultats de simulation à vitesse fixe

Quand on a fixé la vitesse du vent, on remarque que le coefficient C_p et la vitesse spécifique garde les mêmes allures présentant des valeurs correspondantes à la puissance maximale identiquement au fonctionnement à vitesse variable

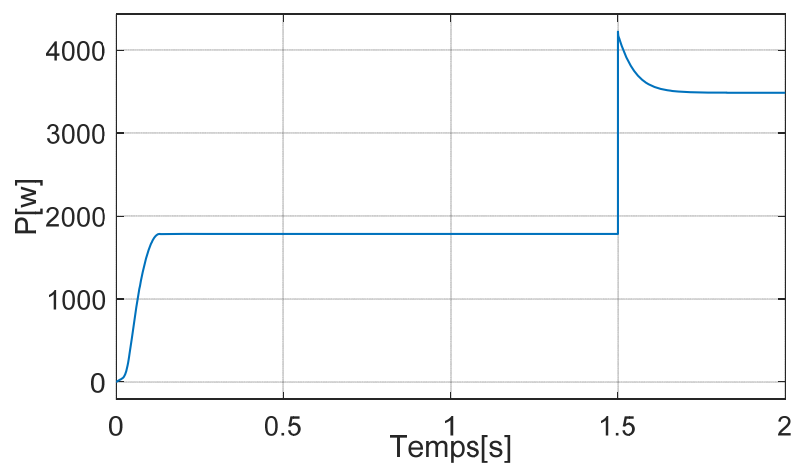


Figure I.17 : puissance aérodynamique à vitesse fixe.

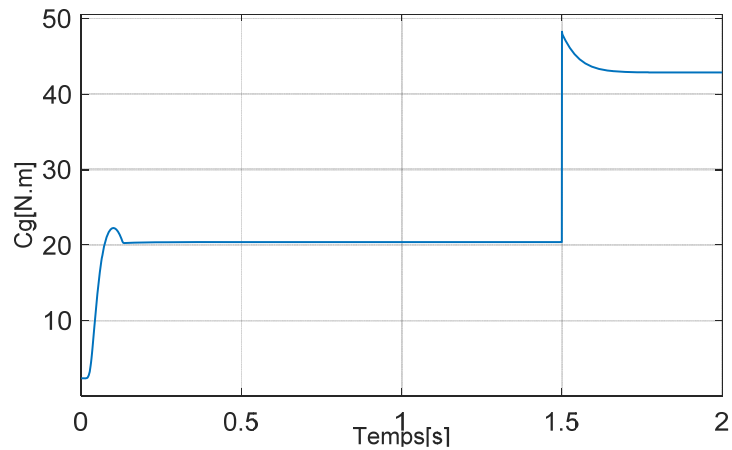


Figure I.18 : couple du multiplicateur à vitesse fixe.

Puisque le coefficient C_p est maintenu à sa valeur maximale alors on peut extraire le maximum de la puissance aérodynamique.

I.6 Conclusion

Fondamentalement, dans ce chapitre, nous avons décrit les éléments fondamentaux d'un système éolien en les modélisant. Ce système est composé de différentes pièces mécaniques et électriques, y compris des éoliennes, des GSAP (générateurs synchrones à aimant permanent) et des multiplicateurs mécaniques. Après avoir examiné les différents types d'éoliennes disponibles, nous avons ensuite entamé la modélisation du système de production éolienne. Enfin, nous avons présenté plusieurs techniques pour maximiser la production d'énergie éolienne.

Chapitre II : Commande du Système Eolien

II.1. Introduction

Suite à la présentation du mécanisme de conversion d'énergie éolienne, nous avons procédé à la modélisation des composantes fondamentales de la chaîne de conversion éolienne, à savoir la turbine, la génératrice et les convertisseurs.

Dans la suite de ce chapitre, nous examinerons la modélisation mathématique et mécanique du GSAP du redresseur à MLI, ainsi que la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents.

II.2 Génératrice à aimants permanents

La Génératrice Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) est une machine synchrone régulière, où le circuit d'excitation à courant continu a été remplacé par des aimants permanents. Donc on permet d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. [16]

Le fonctionnement du GSAP est relativement simple. Lorsque les pales d'une éolienne tournent, elles font tourner le rotor du générateur. Le rotor contient des aimants permanents qui créent un champ magnétique stable. Ce champ magnétique est ensuite utilisé pour induire une tension électrique dans les bobines du stator qui entourent le rotor.

L'utilisation des génératrices à aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'énergie renouvelable. [17]

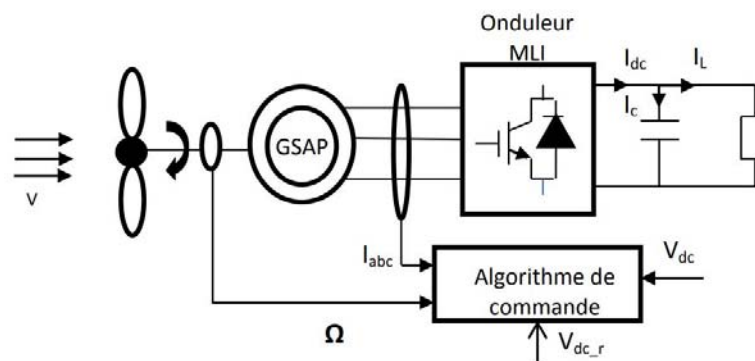


Figure II.1 : Structure du générateur éolien étudié.

II.3 Les avantages et les inconvénients

La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique. [18]

II.3.1 Avantages

- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator d'où le rendement du moteur est amélioré,

- Une faible inertie et un couple massique élevé, Rendement et facteur de puissance élevés
- Une meilleure performance dynamique,
- Construction et maintenance plus simple,
- Augmentation de la constante thermique et de la fiabilité, à cause de l'absence de contacte bague balais dans ces machines.

II.3.2 Inconvénients

- Prix des aimants le rend plus cher,
- La présence de pulsation de couple,
- Risque de désaimantation, ce qui limite l'utilisation par les des contrainte comme la température max, courant max...etc.,
- Pertes par courant de Foucault dans les aimants

II.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

II.4.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP

Le modèle de la GSAP est beaucoup plus complexe que celui de la machine à courant continu, il nécessite l'utilisation des lois de commande de plus en plus performantes et par voie de conséquence, leur commande est plus compliquée du fait que [19] :

- Les grandeurs sont alternatives, à fréquences fixes ou variables.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- Le système est non linéaire à coefficients variables à entrées et sorties multiples.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale
- Le circuit magnétique est supposé non saturé.
- Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté.

II.4.2 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé

II.4.2.1 Équation électrique

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes respectivement : $[v_s]$ $[\varphi_s]$ $[i_s]$.

$$[V_s]=[R_s][i_s]+\frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T \quad : \text{Vecteur tension statorique}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad : \text{Vecteur courant statorique}$$

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad : \text{Vecteur de flux statorique}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad : \text{Matrice Résistance du stator}$$

II.4.2.2 Equation magnétique

Le vecteur des flux totalisés $[\varphi_s]$ des phases statoriques s'écrit dans le repère lié au stator sous la forme matricielle condensée suivante :

$$[\varphi_s] = [L_s][i_s] + [\varphi_{fabc}] \quad (\text{II.2})$$

Ou :

$$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad : \text{Vecteur flux statoriques,}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T \quad : \text{Vecteur courants statoriques,}$$

$$[\varphi_{fabc}] = [\varphi_{fa} \ \varphi_{fb} \ \varphi_{fc}]^T \quad \text{Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique}$$

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée qui contient des termes constants regroupés dans $[L_{s_0}]$ alors que les termes variables dépendant de (θ) sont regroupés dans $[L_{s_2}(\theta)]$ le cas général, elle se met sous la forme [20]:

$$[L_s] = [L_{s_0}] + [L_{s_2}(\theta)] \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s_0} & M_{s_0} & M_{s_0} \\ M_{s_0} & L_{s_0} & M_{s_0} \\ M_{s_0} & M_{s_0} & L_{s_0} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_{s_2}(\theta)] = \begin{pmatrix} \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix}$$

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

L_s : Inductance propre d'une phase statorique,

θ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

II.4.2.3 Equation mécanique

Le GSAP se distingue par sa structure simple, où le rotor et son roulement sont les seules parties mobiles. Cette simplicité est à l'origine de la robustesse et de la fiabilité de la machine. De ce fait, l'application de la deuxième loi de Newton est aisée dans cette approche. En conséquence, la dernière équation mécanique du modèle de système d'équations fondamentales de la GSAP peut être aisément déterminée. [21]

$$J \frac{d\omega_r}{dx} = \sum_i C_i \quad \Rightarrow \quad J \frac{d\omega_r}{dx} = C_e - C_r - C_f \quad (\text{II.4})$$

$$C_f = f \omega_r \quad (\text{II.5})$$

J : Le moment d'inertie du moteur

f : Le coefficient de frottement visqueux

C_e : Le couple électromagnétique délivré par le moteur

C_r : Le couple résistant ou de charge

II.4.3 Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq lié au rotor

II.4.3.1 Transformation de Park

Pour obtenir un système d'équation à coefficients constants, Il est usuel de faire appel à une transformation dite transformation de Park. Elle permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c) au repéré d'axe (o, d, q).

Le système de grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler le composant homopolaire. Par conséquent, le repère (o,d,q) peut être réduit à un repère biphasé (d,q) comme indiqué dans la figure(II.2) . [22]

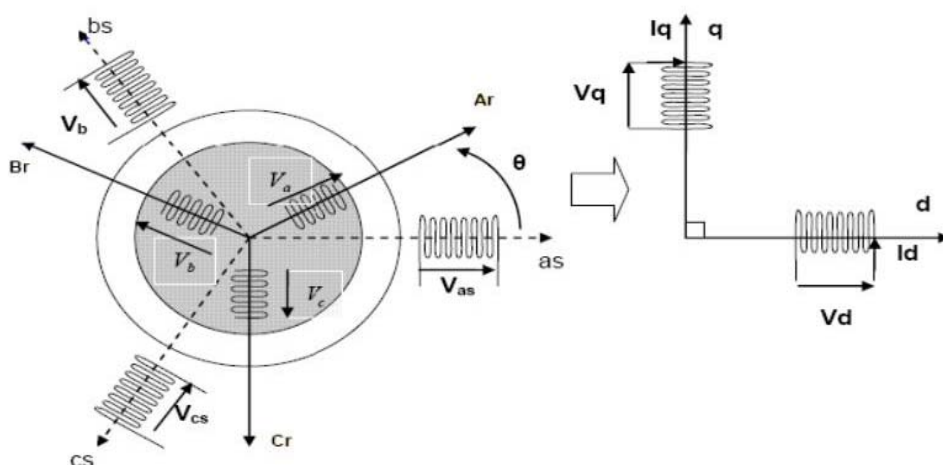


Figure II. 2 : Passage de système triphasé au système biphasé.

Passage triphasé au biphasé :

$$[X_{dqo}] = P(\theta)[X_{abc}]$$

Passage biphasé au triphasé :

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{abc}]$$

Avec :

X : Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux),

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

$[P(\theta)]^{-1}$: la matrice de passage inverse de Park

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad [P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle.

II.4.3.2 Equations électriques

Nous pouvons écrire les équations électriques de la GSAP dans le repère de Park sous la forme [23] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega \phi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega \phi_d \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

II.4.3.3 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

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

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

L_d : Inductance suivant l'axe (d)

L_q : Inductance suivant l'axe (q)

ϕ_f : Flux des aimants permanents

II.4.3.4 Équations mécaniques

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$\begin{cases} J = J_t + J_m \\ J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

J_t : moment d'inertie de la turbine

J_m : moment d'inertie du générateur

f_v : coefficient des frottements visqueux du générateur

Ω_m : vitesse de rotation du générateur.

II.4.3.5 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = P[\Phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (\text{II.10})$$

II.5 Modélisation du convertisseur statique

Après avoir présenté le modèle de la machine, on présentera le système d'entraînement complet où la machine synchrone est associée avec un convertisseur statique de tension triphasé.

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques de puissance qui permettent de convertir l'énergie électrique de manière efficace et précise. Ils sont utilisés dans de nombreuses

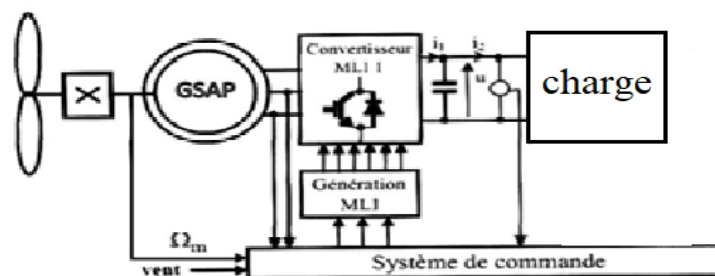


Figure II.3 : Alimentation avec un onduleur

II.5.1 Convertisseur statique continu-alternatif

II.5.1.1 Définition de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative. L'utilisation des onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs triphasés, les alimentations de secours.....etc. Grâce au développement technologique des semi-conducteurs, et l'apparition des nouvelles techniques de commandes les onduleurs sont devenus plus performants.

Cependant, pour que la tension de sortie d'un onduleur soit plus proche d'une sinusoïde, avec un taux d'harmoniques aussi faible que possible, il est important de choisir la bonne technique de commande. La forme de la tension de sortie dépend en grande partie de la méthode de commande utilisée. Il est donc essentiel de sélectionner la méthode de commande appropriée pour chaque application en fonction des exigences de performance et des contraintes de coûts [23].

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

- Selon la source : onduleurs de tension, onduleurs de courant.
- Selon le nombre de phases (monophasé, triphasé, etc.).
- Selon le nombre de niveaux (2,3, etc...).

II.5.1.2 Modélisation de l'onduleur de tension

II.5.1.2.1 onduleur deux niveaux

Un onduleur deux niveaux il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés généralement par des IGBT et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par un condensateur C de tension V_{dc} [24].

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (II.4)

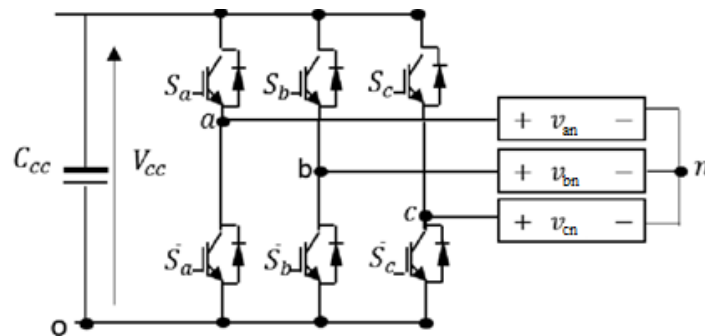


Figure II.4 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables S_a , S_b et S_c , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie de l'onduleur V_{mi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue).

Soit "n", le point neutre du côté alternatif, alors les trois tensions composées U_{ab} , U_{bc} et U_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

et $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ (La charge constituée par la machine est équilibrée).

Les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

II.5.1.2.1 onduleur trois niveaux

Les onduleurs à trois niveaux ont beaucoup d'états de commutation par rapport aux onduleurs à deux niveaux. L'algorithme pour la détermination de section triangulaire qui donne la position de V_{ref} , le choix des états de commutation et le modèle de commutation est plus difficile.

Cette structure se compose de trois bras, chacun des trois bras (A, B et C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K_{A1} , K_{A2} , K_{A3} et K_{A4} pour le bras A) et deux diodes de clamp (D_{clA1} et D_{clA2}) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant. [25]

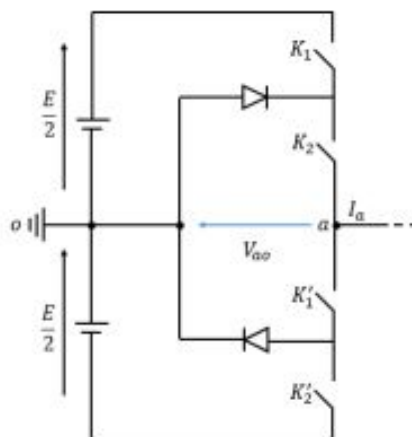


Figure II.5 : Bras d'onduleur NPC à 3 niveaux

L'application des règles d'interconnexions des sources nous conduit aux règles suivantes :

K_{A2} et K_{A4} : ne doivent jamais être ouvert au même temps pour ne pas ouvrir la source de courant.

K_{A2} et K_{A4} : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas court-circuiter la source flottante $E/2$.

K_{A1} et K_{A3} : ne doivent jamais être ouvert en même temps pour ne pas ouvrir la source de courant,

K_{A1} et K_{A3} : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas connecter deux sources de tensions de valeurs différentes E et $E/2$.

Pour simplifier l'étude, on prend un bras d'onduleur NPC à trois niveaux dont la structure est représentée dans la figure (6), Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne "a" de la charge pour les différents états possibles des interrupteurs et il faut montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Pour un onduleur NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement :

Séquence a : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont passants et K_3, K_4 sont bloqués. La tension de sortie V_{ao} est $V_{ao} = +\frac{1}{2}E$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_3, K_4 vaut $+\frac{1}{2}E$

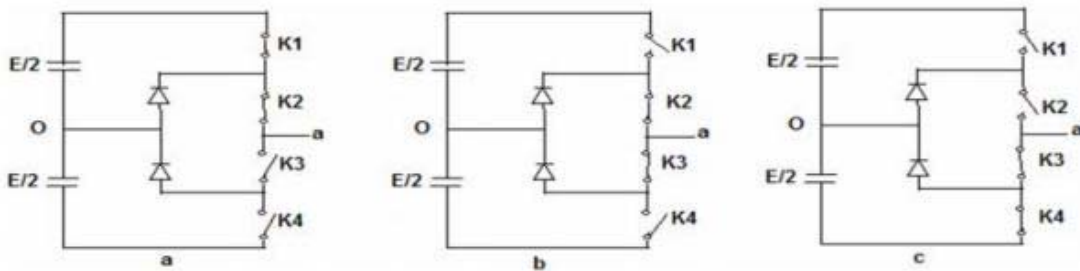


Figure II.6 : Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

Séquence b : Génération du niveau intermédiaire V_{ao}

Les interrupteurs K_2, K_3 sont passants et K_1, K_4 sont bloqués, dans ce cas la tension de sortie V_{ao} est nulle, $V_{ao} = 0$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_4 vaut $+\frac{1}{2}E$.

Séquence c : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1, K_2 sont bloqués et K_3, K_4 sont passants. La tension de sortie V_{ao} est $V_{ao} = -\frac{1}{2}E$. Et la tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1, K_2 vaut $+\frac{1}{2}E$.

K_1	K_2	K_3	K_4	V_{ao}
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

II.5.2 MLI sinus triangle

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques. Il existe différentes structures de Modulation de Largeur d'Impulsion.

La MLI sinus-triangle : est basée sur la comparaison entre une onde modulante, de forme Sinusoïdal à faible fréquence, et une autre onde porteuse de forme triangulaire à fréquence plus élevée. Les points d'intersection entre la porteuse et la modulante déterminent les instants de commutation. [26]

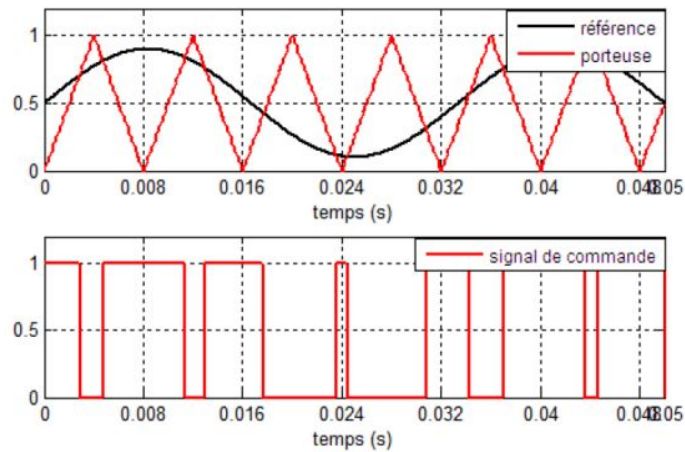


Figure II.7 : principe de la MLI sinus-triangle.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation : $U_m = \frac{f_p}{f_r}$
- Le taux de modulation : $U_p = \frac{V_{mr}}{V_{mp}}$

Avec :

f_p : Fréquence de modulation.

f_r : Fréquence de référence.

V_{mr} : Amplitude de tension de référence.

V_{mp} : Valeur de crête de l'onde de modulation.

II.7 Principe de la commande vectorielle

En utilisant la commande par flux orienté, le courant est dirigé le long de l'axe "q". En conséquence, la seule composante du courant en quadrature, " i_q ", peut être utilisée pour contrôler le couple électromagnétique. Cela est obtenu en maintenant le courant statorique en phase quadrature avec le flux inducteur, ce qui permet d'obtenir un couple maximal. La vitesse peut ensuite être régulée en utilisant le courant " i_q' ", et la tension " V_q ". Cette approche est similaire au principe utilisé dans les machines à courant continu. Dans la commande vectorielle, les deux composantes du courant statorique, " i_d " et " i_q ", sont contrôlées en utilisant les tensions de référence " V_{dref} " et " V_{qref} " à l'entrée de l'onduleur, ce qui permet de contrôler les tensions " V_d " et " V_q " correspondantes.[27]

II.7.2 Modelé de la machine à commander

Machine synchrone à pôles lisses donc ce cas $L_d=L_q$ et l'expression du couple se réduit à :

$$C_{em} = P\phi_f i_q \quad (\text{II.13})$$

II.7.3 Commande vectorielle directe

II.7.3.1 Technique de découplage

Afin d'alimenter la machine, des tensions de référence sont imposées à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques appropriés sur les bras de l'onduleur pour que les tensions délivrées aux bornes du stator soient aussi proches que possible des tensions de référence. Toutefois, en raison des termes de couplage entre les axes d et q présents dans les équations statoriques, il est nécessaire de définir des termes de compensation pour permettre le découplage des axes d et q. Cette opération permet de simplifier les équations de la machine et de la partie régulation, et facilite le calcul des coefficients des régulateurs. En effet, les équations statoriques contiennent des termes qui impliquent des courants provenant de l'autre axe, ce qui nécessite l'utilisation de termes de compensation pour les éliminer et simplifier les équations. Ces équations s'écrivent [28] :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

On définit les termes de découplage e_d et e_q de façon que les tensions restants V_{d1} et V_{q1} aient une relation de premier ordre avec les deux composantes des courants statoriques i_d et i_q , tels que :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)i_d \\ V_{d2} = (R_s + sL_q)i_q \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases}$$

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} . Leurs expressions s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (II.16)$$

S : est l'opérateur de Laplace

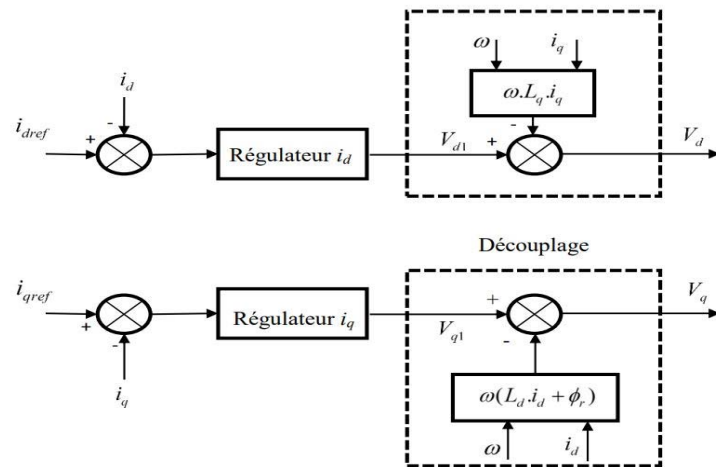


Figure II.8 : Principe de découplage par compensation.

II.8 Détermination des régulateurs

II.8.1 Calcul des régulateurs de courant

Le schéma de commande vectorielle pour les courants se compose de deux boucles distinctes, tel qu'illustré dans la figure (II.9).

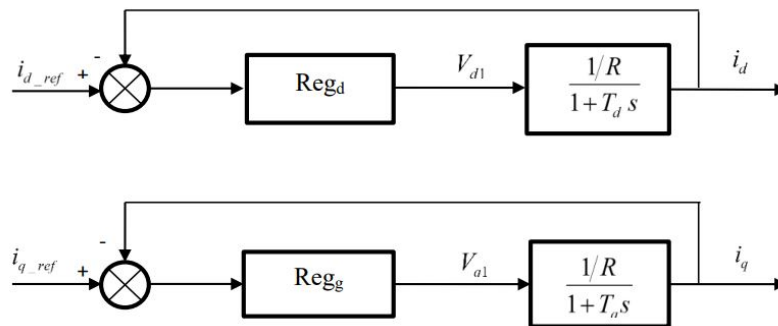


Figure II.9 : Commande des courants i_d et i_q en deux boucles indépendantes.

D'après les équations liées aux systèmes équations (II.16), on écrit les fonctions des transferts suivants :

$$\begin{cases} F_d(s) = \frac{1}{R_s + L_d s} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_d s} = \frac{i_d}{V_{d1}} \\ F_q(s) = \frac{\frac{1}{R}}{R_s + L_q s} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_q s} = \frac{i_q}{V_{q1}} \end{cases} \quad (II.17)$$

Avec : $T_d = \frac{L_d}{R_s}$ et $T_q = \frac{L_q}{R_s}$

Les régulateurs qui sont responsables de la régulation du courant dans les axes d et q respectivement, sont choisis pour être des régulateurs proportionnels et intégraux. La fonction de transfert de ces régulateurs est de la forme : $K_p + \frac{K_i}{s}$

Avec :

K_p : Action proportionnelle du régulateur ;

K_i : Action intégrale du régulateur ;

s : Opérateur de Laplace ;

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont données par :

$$\begin{cases} FTBO_d = \frac{K_i}{s} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \left(\frac{1}{1 + T_d s} \right) \\ FTBO_q = \frac{K_i}{s} \left(\frac{K_p}{K_i} s + 1 \right) \left(\frac{1}{1 + T_q s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec

$$\begin{cases} H_d = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \\ H_q = \frac{K_{pq}}{K_{iq}} \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} FTBF_d = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{id}} s + 1} = \frac{1}{1 + \tau_d s} \\ FTBF_q = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{iq}} s + 1} = \frac{1}{1 + \tau_q s} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Avec

$$\begin{cases} \tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \\ \tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}} \end{cases}$$

La détermination de la dynamique des boucles de courant en commande vectorielle. Les boucles de courant sont des régulateurs de premier ordre, et leur dynamique est déterminée par les constantes de temps τ_d et τ_q . Pour fixer la dynamique du système, il convient de choisir les constantes de temps de manière à ce que la constante de temps en boucle fermée soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

En général, le temps de réponse dans un système de premier ordre est de $T_r = 3\tau$. Ainsi, pour obtenir une dynamique de réponse rapide du système, les constantes de temps doivent être choisies avec soin. La constante de temps du système en boucle fermée doit être inférieure à la constante de temps en boucle ouverte pour garantir une réponse rapide et stable du système [27].

$$T_r = \frac{3R_s}{K_{id}} \quad (\text{II.20})$$

- Pour le courant i_q :

$$K_{id} = \frac{3R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau}$$

Avec

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}}$$

$$K_{pd} = \frac{L_d K_{id}}{R_s} = \frac{3L_d}{3\tau} = \frac{L_d}{\tau}$$

- Pour le courant i_q :

$$K_{iq} = \frac{3R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau}$$

$$K_{pq} = \frac{L_q K_{iq}}{R_s} = \frac{3L_q}{3\tau} = \frac{L_q}{3\tau}$$

II.8.2 Calcul du régulateur de vitesse

Le processus à commander est décomposé en deux sous système :

- Sous système du réglage de courant i_q donc du couple
- Sous système de la partie mécanique.

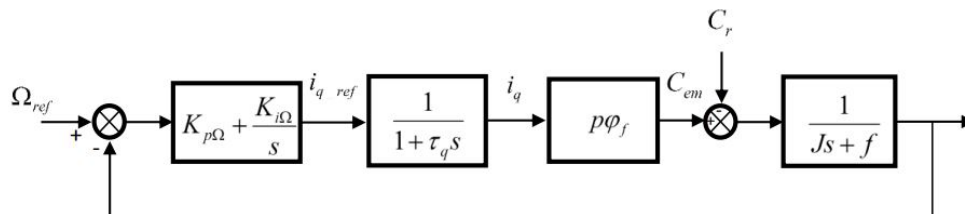


Figure II.10 : Boucle de régulateur de vitesse.

Le schéma peut être simplifié par la Figure suivant :

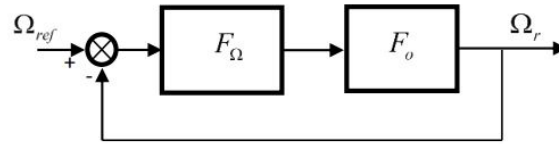


Figure II.11 : Boucle de régulation de vitesse.

$F_{\Omega}(s)$: La fonction de transfert du régulateur de vitesse est donnée par :

$$F_{\Omega}(s) = k_{p\Omega} + \frac{k_{i\Omega}}{s} \quad (\text{II.21})$$

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

$$F_o(s) = \frac{pQ_f}{f(1+s\tau_q)(1+s\tau_m)} \quad (\text{II.22})$$

$$\tau_m = \frac{J}{f}$$

La FTBF est donnée par :

$$FTBF = \frac{F_{\Omega}F_o}{1+F_{\Omega}F_o} \quad (\text{II.23})$$

Après les calculs on trouve :

$$FTBF_{\Omega} = \frac{pQ_f(k_{p\Omega}s + k_{i\Omega})}{J\tau_q \cdot s^3 + (J + f\tau_q)s^2 + (pQ_fK_{p\Omega} + f)s + pQ_fK_{i\Omega}}$$

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

Devient :

$$p(s) = Js^2 + (pQ_fK_{p\Omega} + f)s + pQ_fK_{i\Omega} = \frac{J}{pQ_fK_{i\Omega}}s^2 + \frac{pQ_fK_{p\Omega} + f}{pQ_fK_{i\Omega}}s + 1 \quad (\text{II.24})$$

La FTBF possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2}s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)s + 1 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

ω_0 : Pulsation propre du système,

ξ : Coefficient d'amortissement.

Par identification du dénominateur de l'équation caractéristique :

$$\frac{J}{pQ_fK_{i\Omega}} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad , \quad \frac{pQ_fK_{p\Omega} + f}{pQ_fK_{i\Omega}} = \left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right)$$

On déduit les expressions de k_i et k_p :

$$k_{i\Omega} = \frac{J \cdot \omega_0^2}{P Q_f} \quad , \quad k_{p\Omega} = \frac{2 \cdot \xi \cdot J \cdot \omega_0 - f}{P Q_f}$$

II.8.3 Limitation de courant

Ces limitations peuvent entraîner des problèmes lors de phénomènes transitoires importants, tels qu'un dépassement élevé de la valeur à réguler, voire un comportement instable de la régulation. En raison de la nature non linéaire de la limitation, il n'est plus possible d'appliquer la théorie linéaire pour analyser précisément le comportement dynamique une fois que la sortie du régulateur est saturée.

La saturation perturbe également le fonctionnement des régulateurs avec une composante intégrale. En effet, la partie intégrale continue à accumuler l'erreur même si la sortie du régulateur est limitée.

Afin d'éviter ces inconvénients, il est essentiel de corriger le comportement dynamique du régulateur, en particulier la partie intégrale, lorsque la limitation est atteinte. Cette mesure est appelée "anti-reset-windup" (anti-remise de l'emballement). Son objectif est d'empêcher que la composante intégrale du régulateur ne continue à croître au-delà de la limite, ce qui peut provoquer des instabilités et des comportements indésirables.

En d'autres termes, l'anti-reset-windup est une technique utilisée pour limiter l'accumulation de l'erreur intégrale lorsque la sortie du régulateur est saturée, afin de maintenir la stabilité du système et d'éviter les réactions incontrôlées [28].

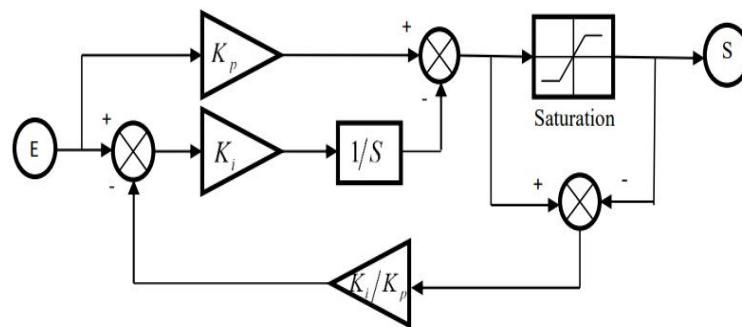


Figure II.12 : Régulateur PI avec anti-windup.

II.9 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulations effectuées sur un système d'éolienne à vitesse variable. L'objectif de ces simulations était de tester le fonctionnement de l'ensemble du système pour les deux types d'onduleur (deux et trois niveaux).

II.9.1 Résultats pour un onduleur deux niveaux

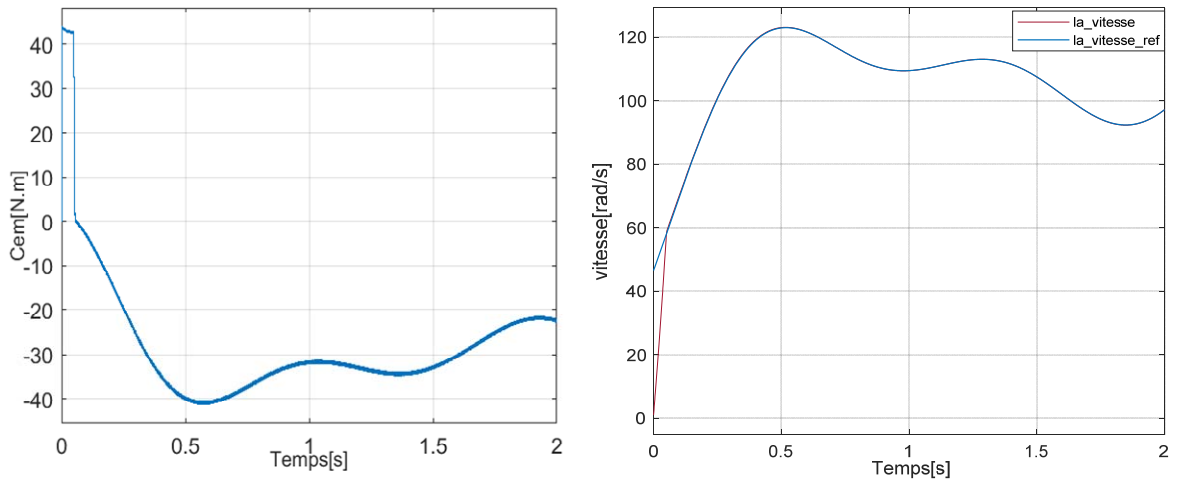


Figure II.13 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP.

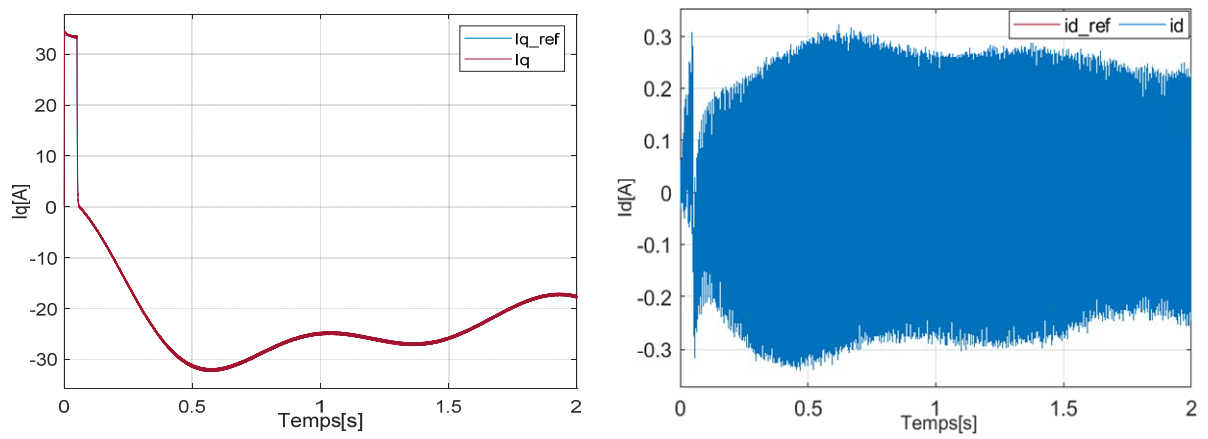


Figure II.14 : Courant direct et quadratique de la GSAP.

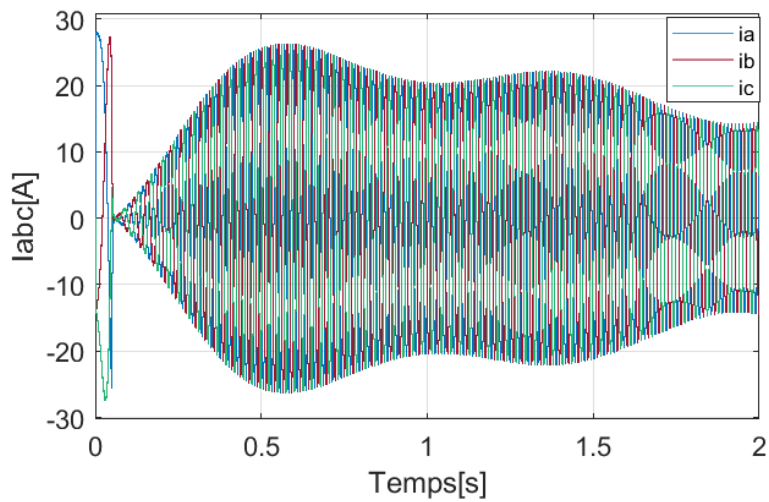


Figure II.15 : Courant statorique de la GSAP.

II.9.2 Résultats pour onduleur trois niveaux

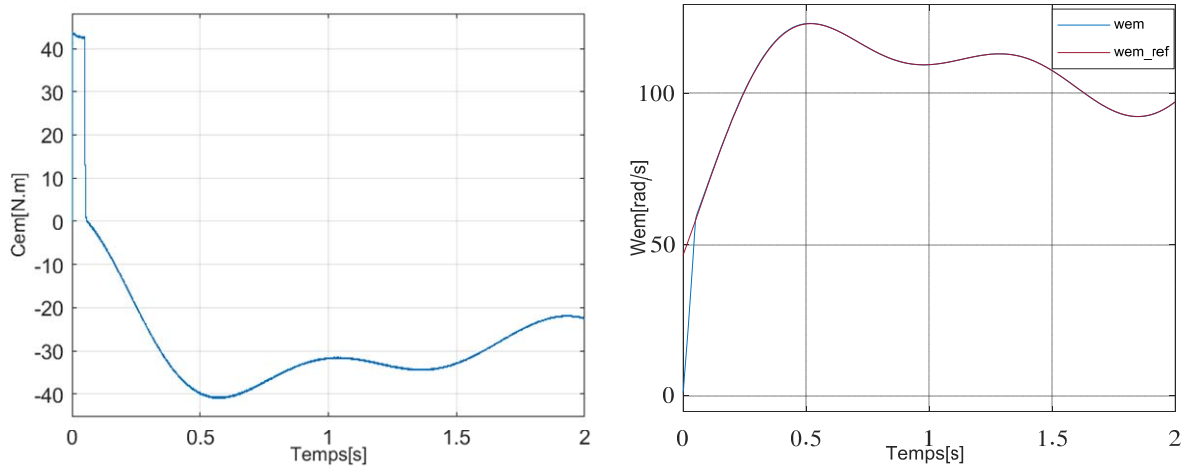


Figure II.16 : Vitesse de rotation et couple électromagnétique de la GSAP

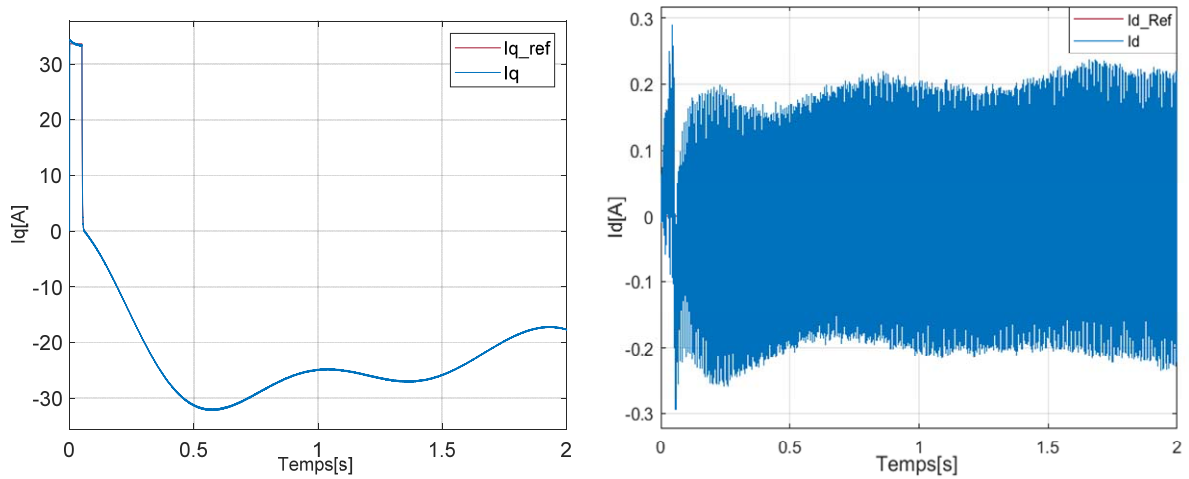


Figure II.17 : Courant direct et quadratique de la GSAP.

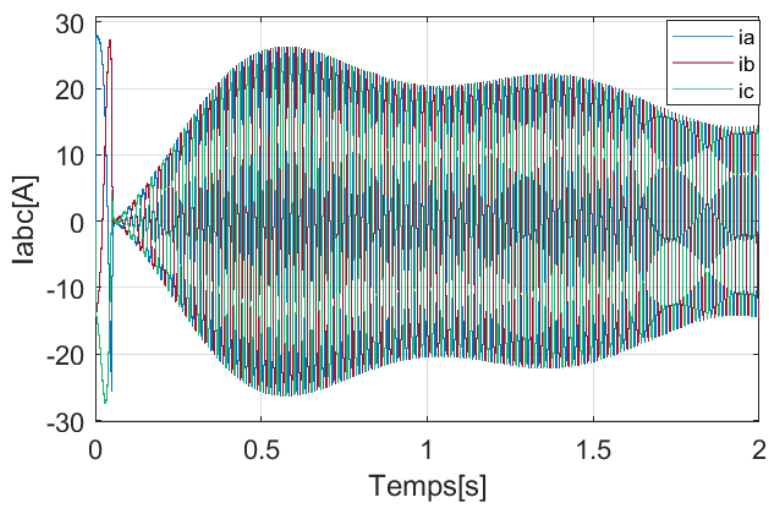


Figure II.18: Courant statorique de la GSAP.

II.10 Interprétation

Dans cette partie, on présente de résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable afin de tester le fonctionnement de la chaîne globale. La figure (II.13) et figure (II.16) illustre le résultat du contrôle de la vitesse de rotation de la GSAP et couple électromagnétique, ceci montre que l'éolienne est bien adaptée à la variation du vent, grâce à la stratégie de contrôle MPPT proposée. Les courants i_d et i_q suivent parfaitement leurs références en appliquant la commande vectorielle à la GSAP (Figure (II.14) et figure (II.17)).

Nous avons observé que les onduleurs à trois niveaux offrent une meilleure qualité de sortie en réduisant les harmoniques, mais ils présentent une complexité plus élevée à mettre en œuvre par rapport aux onduleurs à deux niveaux.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord développé un modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents, en utilisant à la fois le repère naturel et le repère de Park. Ensuite, nous avons procédé à la modélisation du redresseur MLI et de l'onduleur MLI. Nous avons prévu deux boucles de régulation pour contrôler les courants : une pour le courant I_d afin de réguler le flux, et une autre pour le courant I_q afin de réguler le couple électromagnétique. De plus, nous avons mis en place une boucle de régulation de vitesse pour le GSAP. Par utilisation des deux types d'onduleur deux et trois niveaux Ensuite, nous avons obtenu les résultats de nos simulations qui ont démontré notre capacité à extraire le maximum de puissance de l'énergie. Enfin, nous avons effectué une comparaison entre les deux types d'onduleurs.

Chapitre III : Diagnostic des Défaits des Convertisseurs

III.1 Introduction

Les convertisseurs statiques sont des éléments essentiels dans de nombreux systèmes d'électronique de puissance telle que les variateurs de vitesse des machines alternatives. La sécurité de ces systèmes, leur fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie. [29]

Actuellement un grand axe de recherches est orienté vers la surveillance de l'état du Convertisseur statique. En effet, un convertisseur tel que l'onduleur est susceptible de présenter des défauts structurels tels que les défauts d'ouverture des interrupteurs à semi-conducteurs et par conséquent ce type de dysfonctionnement peut induire des endommagements pour le système de production si le personnel n'est pas averti et qu'un arrêt intempestif ne soit produit. Puisque, l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade de défaut ; il est donc évident, que l'investissement dans le domaine de la détection des dysfonctionnements paraît une solution incontournable. [30]

III.2 Définition

Le processus de diagnostic est une activité intellectuelle essentielle dans de nombreux domaines. Son but principal est d'identifier les origines d'un dysfonctionnement en se basant sur des observations et des symptômes observés. Cela implique la détection et la localisation d'un composant ou d'un élément défectueux au sein d'un système dynamique. [31]

III.3 Etapes de diagnostic

Le diagnostic d'un système industriel a un certain nombre d'étapes [37]:

- **Acquisition des données**

Lors de la phase de l'acquisition de données on reçoit les informations concernant le système à surveiller, et cela en utilisant des capteurs qui mesurent les différentes variables du processus.

- **Étape d'élaboration d'indicateurs de défauts**

Après les mesures réalisées et les observations des opérateurs en charge de l'installation, il convient de construire les indicateurs de défauts (résidus ou symptômes) permettant de renseigner sur la présence de défauts. Cette étape consiste à comparer le comportement réel du système à un comportement de référence, l'écart est nul en l'absence de défauts et non nul dans le cas contraire.

- **Étape de détection**

Cette étape permet de décider si le système est dans l'état de fonctionnement normal. Tester la non nullité des résidus pour décider si le système est affecté par des défauts n'est pas suffisant car en pratique les grandeurs mesurées sont entachées par des bruits et les systèmes sont soumis à des perturbations parfois non mesurables, c'est pour cela que cette étape fait appel aux tests statistiques, elle est réalisée à l'aide d'un seuillage.

- **Etape de localisation :**

Après l'étape de détection de défauts vient l'étape de localisation qui consiste à déterminer les éléments défaillants, à partir d'une table de signatures des défauts .en résumé cette étape consiste à évaluer les résidus quelle que soit la méthode employée.

- **Etape de prise décisions**

Cette étape consiste à décider de la marche à suivre afin de retourner au fonctionnement normal de l'installation et de le maintenir, et ceci est réalisé par des opérateurs humains. Ces décisions peuvent être : l'adaptation paramétrique de la loi de commande, un changement de point de consigne, une procédure normale d'arrêt ou encore un arrêt d'urgence.

III.4 Définition et classification des défauts

Grâce aux développements rapides de l'électronique, de la technique informatique et de la technologie de l'information, les processus industriels modernes deviennent de plus en plus complexes. Ainsi, les problèmes de sécurité et de fiabilité révèlent une importance considérable vu que la présence d'une défaillance peut entraîner des conséquences désastreuses. Ainsi, il est indispensable de faire appel à des techniques de surveillances modernes combinant le diagnostic et la correction des défauts afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité des processus, de minimiser les coûts de maintenance et de protéger l'installation dans les états critique [39].

III.4.1 Différents type de défaut

Un défaut est défini comme étant un écart non permis entre la valeur réelle d'une caractéristique du système et sa valeur nominale. Comme le montre la figue (III.1), trois types de défauts sont distingués : défaut actionneur, défaut capteur et défaut procédé (ou défaut composant).

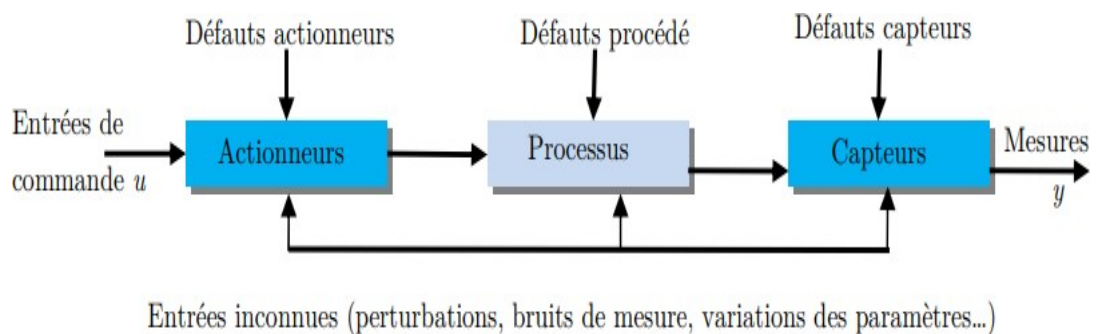


Figure. III.1. Différents types de défauts d'un système

- **Défauts capteurs :** Les capteurs convertissent les grandeurs physiques en signaux utilisables par les calculateurs. Ils sont essentiels pour communiquer des informations sur l'état et le comportement des processus. Les défauts des capteurs entraînent une mauvaise représentation des grandeurs physiques mesurées.

- **Défauts de l'installation ou du processus :** Ces défauts affectent les composants ou les dispositifs dans processus, avec les changements consécutifs dans les propriétés dynamiques d'entrée / sortie du système.
- **Défauts actionneurs :** Un actionneur est un composant qui transforme les signaux de commande en mouvement, chaleur ou champ magnétique. Les défauts des actionneurs peuvent entraîner une consommation d'énergie élevée ou une perte de contrôle. Ils peuvent être dus à des problèmes mécaniques, électriques, électroniques ou de commande. Une surveillance et une maintenance régulières sont essentielles pour assurer le bon fonctionnement du système. [41].

III.5 Défauts interne du convertisseur

1.5.1 Court-circuit

Le défaut de type court circuit se produit lorsqu'un des composants d'une cellule de commutation reste constamment fermé. Un tel défaut peut avoir deux causes : soit la mise en court-circuit physique de la puce de silicium (IGBT ou diode) par dépassement de température critique, soit la défaillance de la commande rapprochée.

Dans ce cas, les courants de phases sont fortement altérés. Ce type de défaillance est extrêmement préjudiciable au convertisseur et nécessiterait la mise en œuvre de sécurité permettant de déconnecter le bras défaillant dès l'apparition de cette défaillance.

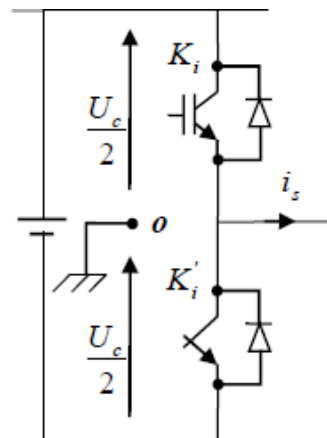


Figure III.2 : Court-circuit sur un interrupteur d'un bras.

1.5.2. Circuit ouvert

Il se peut, pour diverses raisons, qu'un des IGBT (supérieur ou inférieur) d'une cellule de commutation d'un bras reste constamment ouvert (défaut de type circuit ouvert). Ce type de défaut a pour principale cause une défaillance de la commande rapprochée (défaut thermique du driver ou perte d'alimentation par exemple). Selon la localisation du défaut dans la cellule, celui-ci sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur IGBT supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut IGBT inférieur). Lorsque le défaut est visible, la signature se

matérialise par le passage d'un rapport cyclique α à 0 ou à 1, mais uniquement sur la cellule défectueuse. La conséquence est que la cellule défectueuse se retrouve alors en surtension et qu'un arrêt du convertisseur est obligatoire pour éviter une propagation du défaut [33].

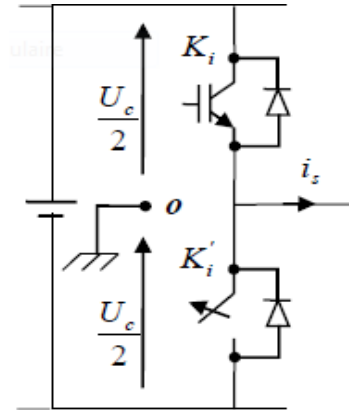


Figure III.3 : Circuit ouvert sur un interrupteur d'un bras

III.6 Méthodes de détections des défauts

III.6.1 Approche des vecteurs de Park

Cette approche repose sur l'utilisation de la transformation de Park, qui permet de convertir les grandeurs d'une machine triphasée en grandeurs équivalentes pour une machine biphasée, selon les axes d et q. En appliquant cette transformation, on obtient les vecteurs de Park pour les tensions, les flux et les courants. Cette technique utilise les deux composantes du courant statique, à savoir i_{sd} et i_{sq} , qui dépendent des courants statiques i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} et sont exprimées de la manière suivante. [34]

$$i_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}}i_{sa} - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sb} - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sc} \quad (\text{III.1})$$

$$i_{sq} = \frac{1}{\sqrt{2}}i_{sb} - \frac{1}{\sqrt{6}}i_{sc} \quad (\text{III.2})$$

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir : la première utilise les grandeurs biphasées i_{sa} , et i_{sb} qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_{sb} = f(i_{sa})$, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park, elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement

III.6.2 Analyse de la trajectoire du vecteur courant

Cette méthode utilise le principe de la transformation de Park pour exprimer les courants triphasés (i_a , i_b , i_c) dans un repère biphasé stationnaire (α ; β).

Le système des courants (i_a, i_b, i_c) est transformé en système biphasé (i_α, i_β) [35]

Les courants statoriques s'expriment sous la forme suivante [36]

$$i_A = \frac{1}{3}(i_a - i_b) \quad (\text{III.3})$$

$$i_B = \frac{1}{3}(i_a - 2i_b) \quad (\text{III.4})$$

$$i_A = \frac{1}{3}(-2i_a - i_b) \quad (\text{III.5})$$

Avec (i_a, i_b, i_c) sont les courants de phases, (i_A, i_B, i_C) sont les courant de ligne.

Le rapport ψ représente la pente de la trajectoire moyenne du courant sur un temps discret défini par :

$$\psi = \frac{i_{\alpha k} - i_{\alpha k-1}}{i_{\beta k} - i_{\beta k-1}} \quad (\text{III.6})$$

Ou et sont l'instant actuel de calcul et l'instant d'avant. [32]

III.6.3 Analyses des défauts par la FFT

Depuis de nombreuses années, l'analyse spectrale du signal a été largement utilisée pour détecter les défaillances dans les machines électriques, notamment les ruptures de barres au niveau du rotor, la détérioration des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. La technique d'analyse spectrale est particulièrement utilisée lorsque la machine est alimentée directement par le réseau électrique ou à travers un onduleur de tension. [44]

III.6.4 Diagnostic par logique floue

La logique floue est une théorie qui a connu un grand succès depuis que prof. L. Zadeh a introduit le concept de sous-ensembles flous en 1965. Elle trouve Notamment sa place dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie électrique, Elle présente en effet l'avantage d'utiliser des règles linguistiques simples permettant de traduire facilement le savoir-faire d'un expert pour répondre à une problématique spécifique. Dans ce sens on utilise des correcteurs à base de logique floue qui améliorent de façon globale aussi bien les performances dynamiques que la robustesse des systèmes commandés, en s'appuyant sur leur connaissance a priori [35].

Le concept de la théorie des sous-ensembles flous, s'appuie sur la notion de degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble flou. Tandis que les ensembles traditionnels sont caractérisés par une fonction d'appartenance notée, (également appelée fonction caractéristique) définie sur $\{0,1\}$, les sous-ensembles flous sont, eux, caractérisés par une fonction d'appartenance notée μ définie sur $[0,1]$. [38]

La procédure de fonctionnement d'un système flou est accomplie en trois étapes :

- La fuzzification

- L'inférence
- La défuzzification

En général, le bloc de fuzzification effectue un prétraitement des données, qui sont ensuite traitées par des règles linguistiques nécessitant la définition de fonctions d'appartenance. La fuzzification génère une série de variables floues qui sont regroupées dans un vecteur et introduites dans le bloc d'inférence. Dans le bloc d'inférence, les valeurs des variables linguistiques sont liées par plusieurs règles qui prennent en compte le comportement statique et dynamique du système, ainsi que les effets du système à diagnostiquer. Dans la dernière étape, le bloc de défuzzification transforme la valeur floue (linguistique) en une valeur déterminée afin de déduire l'état du système. [40]

III.7 Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert

III.7.1 Onduleur deux niveaux

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec défaut de circuit ouvert pour un onduleur deux niveaux de l'interrupteur T_6 dû à l'instant $t=0.3s$. On va analyser l'effet du défaut pour la vitesse du vent variable.

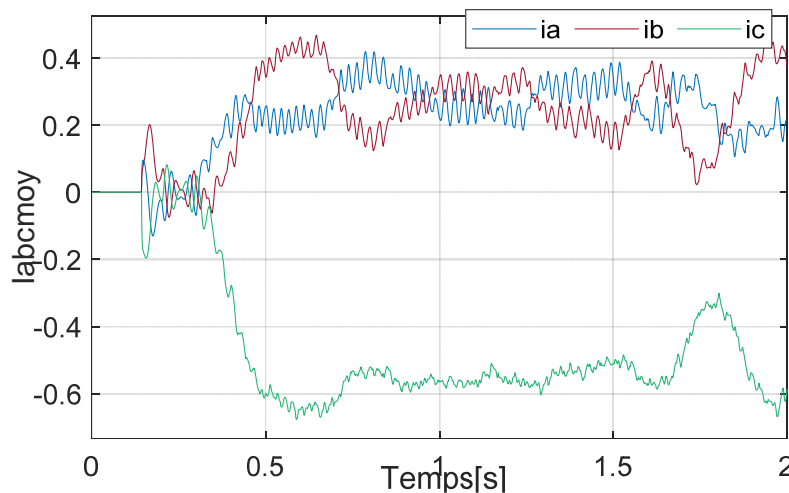


Figure III.4 : Courant triphasé statorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

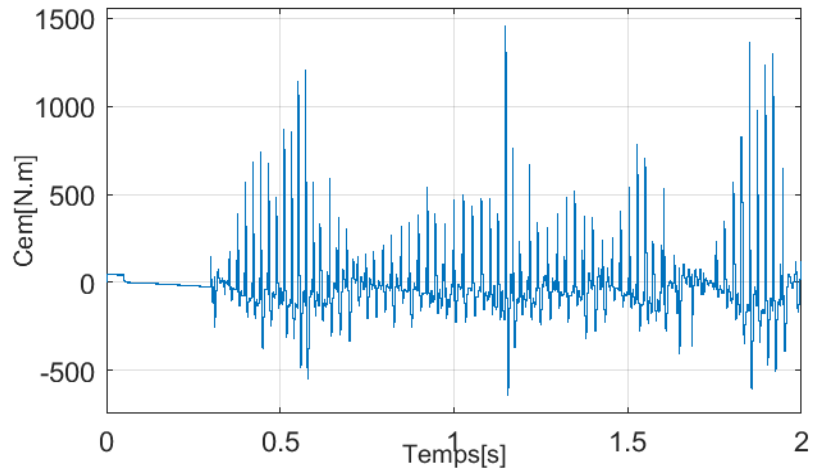


Figure III.5 : Le couple dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

III.7.2 Onduleur trois niveaux

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec défaut de circuit ouvert pour un onduleur trois niveaux de l'interrupteur T_{23} dû à l'instant $t=0.3s$. Par la suite, l'analyse du défaut pour la vitesse du vent variable.

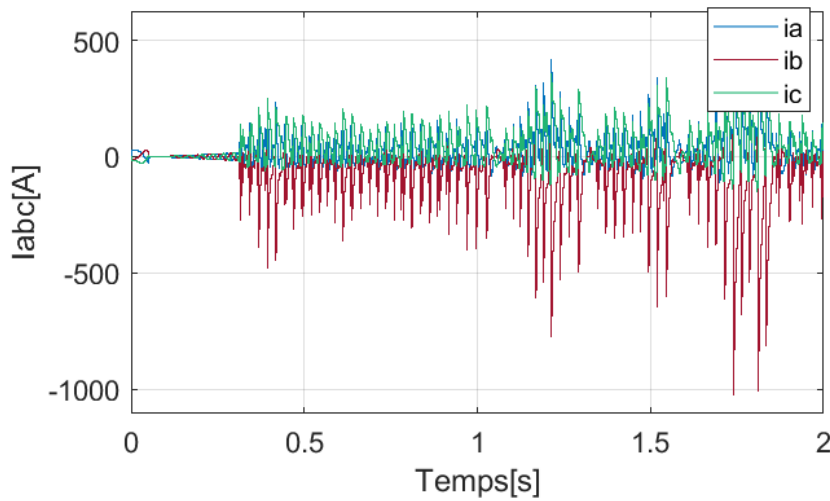


Figure III.6 : Courant triphasé statorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

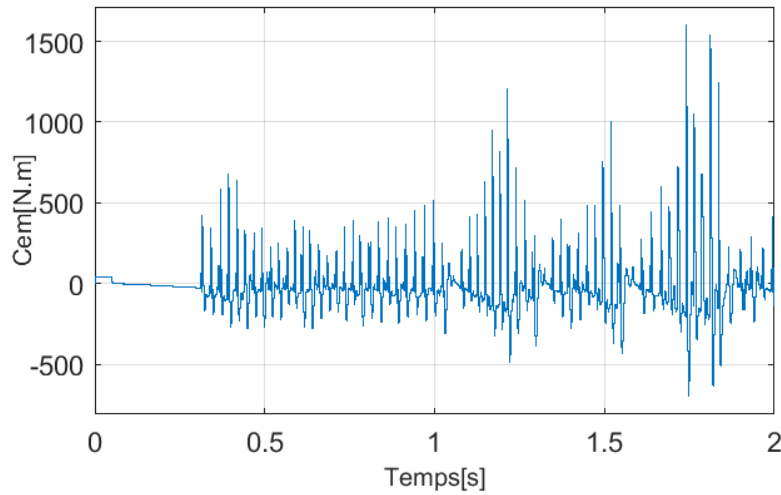


Figure III.7 : Le couple dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur T_{23} .

III.8 Détection des défauts de circuit ouvert

III.8.1 Diagnostic par module et angle du vecteur de Park moyen

Une approche de diagnostic appelée ACPV (Average Current Park's Vector) appliquée à des onduleurs à deux niveaux et à des onduleurs 3 niveaux L'ACPV permet de détecter et de localiser les défauts en circuit ouvert dans les semiconducteurs de l'onduleur en analysant les caractéristiques des courants de sortie.

L'approche ACPV consiste à calculer la valeur moyenne de chaque courant de ligne du moteur, puis à appliquer une transformation du vecteur de Park pour obtenir le vecteur de Park moyen du courant de ligne.

$$i_{x_{av}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_x[k], \quad x \in \{A, B, C\} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{cases} i_A[k] = I_m \cdot \cos(\omega \cdot T_s \cdot k) \\ i_B[k] = I_m \cdot \cos(\omega \cdot T_s \cdot k - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C[k] = I_m \cdot \cos(\omega \cdot T_s \cdot k - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les courants de repère de Park

$$\begin{cases} i_{d_{av}}[k] = \frac{2}{3} i_{A_{av}}[k] - \frac{1}{3} (i_{B_{av}}[k] + i_{C_{av}}[k]) \\ i_{q_{av}}[k] = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{B_{av}}[k] - i_{C_{av}}[k]) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

On a

$$i_{s_{av}}[k] = i_{d_{av}}[k] + j \cdot i_{q_{av}}[k] = |i_{s_{av}}[k]| \angle \theta_{s_{av}} \quad (\text{III.10})$$

$$|i_{sav}[k]| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (\text{III.11})$$

Donc

$$|i_{sav_n}[k]| = \frac{|i_{sav}[k]|}{|i_s[k]|} \quad (\text{III.12})$$

En fonctionnement normal, les valeurs moyennes des courants de ligne sont proches de zéro. Cependant, en cas de défaut circuit ouvert, ces valeurs augmentent, permettant ainsi la détection du défaut. De plus, la localisation du composant défectueux est réalisée en analysant la valeur de phase du vecteur de Park. [45]

L'avantage de cette approche est qu'elle permet une détection précise et une localisation des défauts circuit ouvert dans les semi-conducteurs de l'onduleur, ce qui facilite la maintenance et la réparation des systèmes de conversion de puissance [45].

III.8.2 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur deux niveaux

Lorsqu'un défaut de type circuit ouvert dont un onduleur de type 2 niveaux se produit, la valeur de cette norme augmente et dépasse un seuil prédéfini dans l'algorithme de diagnostic. Cela permet de détecter le défaut. Une fois le défaut détecté, il est nécessaire de le localiser. Pour cela, on utilise l'angle du vecteur de Park moyen du courant de ligne. Selon la valeur de cet angle, il est possible de déterminer quelle paire d'interrupteurs est défectueuse.

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

IGBT	Module du vecteur de Park	angle du vecteur de Park
T_1	Supérieur au seuil	$0^\circ < \theta < 60^\circ$
T_2	Supérieur au seuil	$-180^\circ < \theta < -120^\circ$
T_3	Supérieur au seuil	$120^\circ < \theta < 180^\circ$
T_4	Supérieur au seuil	$-120^\circ < \theta < -60^\circ$
T_5	Supérieur au seuil	$-60^\circ < \theta < 0^\circ$
T_6	Supérieur au seuil	$60^\circ < \theta < 120^\circ$

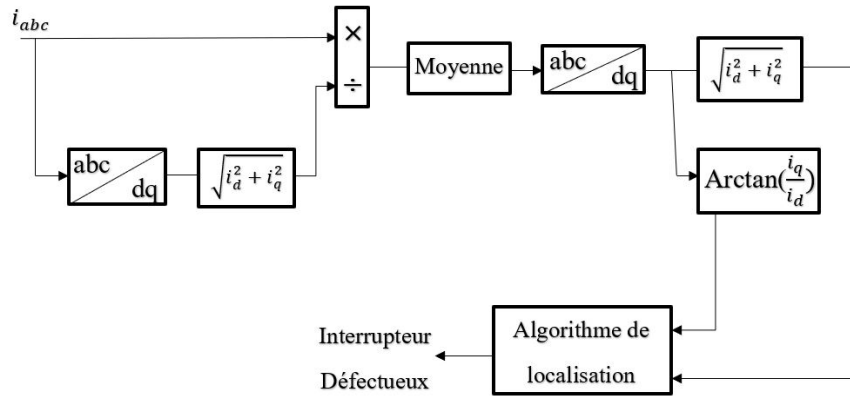


Figure III.8: Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert.

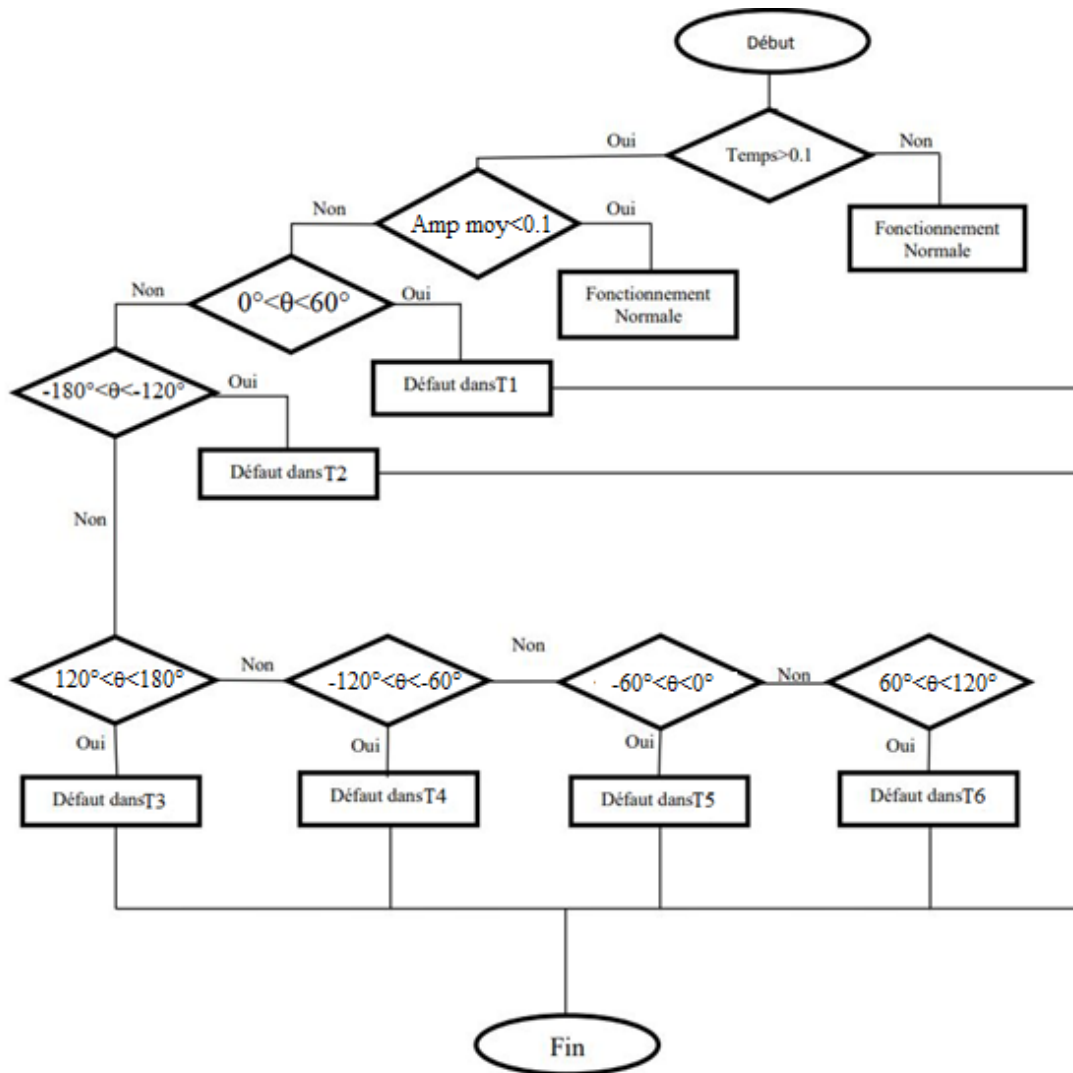


Figure III.9: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert

III.8.2.1 Exemple de détection des défauts avec onduleur deux niveaux

Les figures (III.10), (III.11) et (III.12), présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant $t=0.3s$ au niveau de l'interrupteur T_1 . Les valeurs des courants moyennes I_a est positive et I_b et I_c sont négative et on a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à 0.1. L'angle du vecteur de Park est égal à 20° , donc le défaut est présent dans l'interrupteur T_1 .

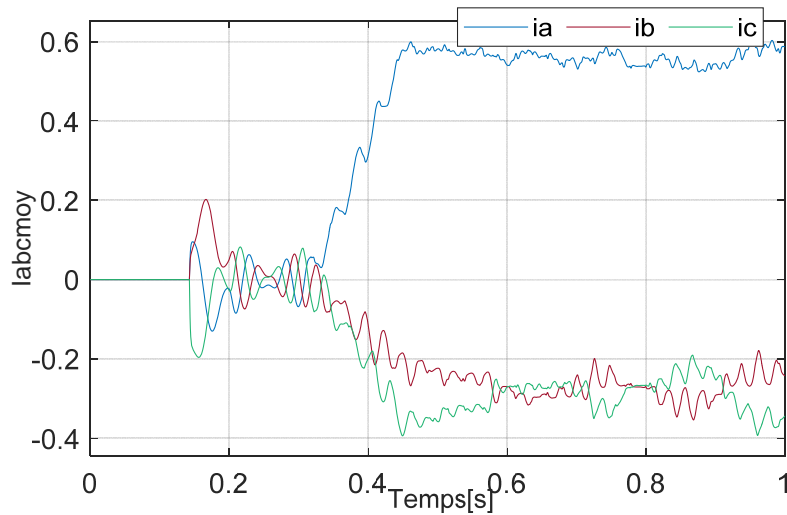


Figure III.10: valeur moyenne des courants triphasés.

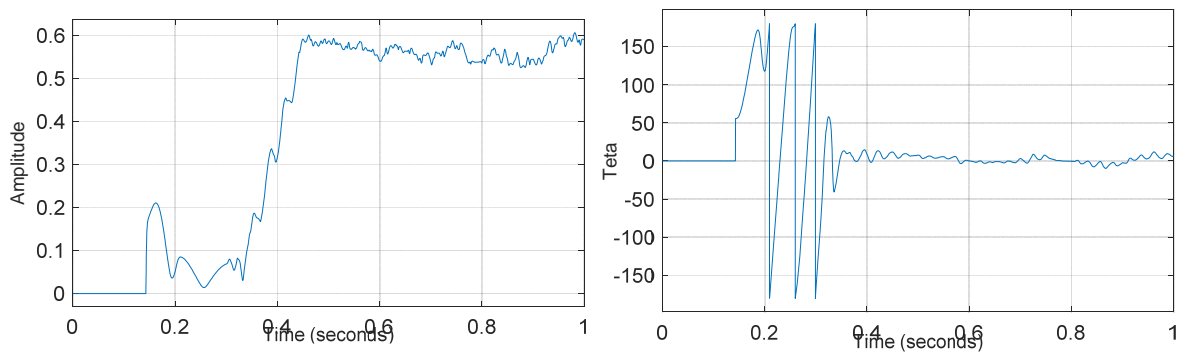


Figure III.11: Amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

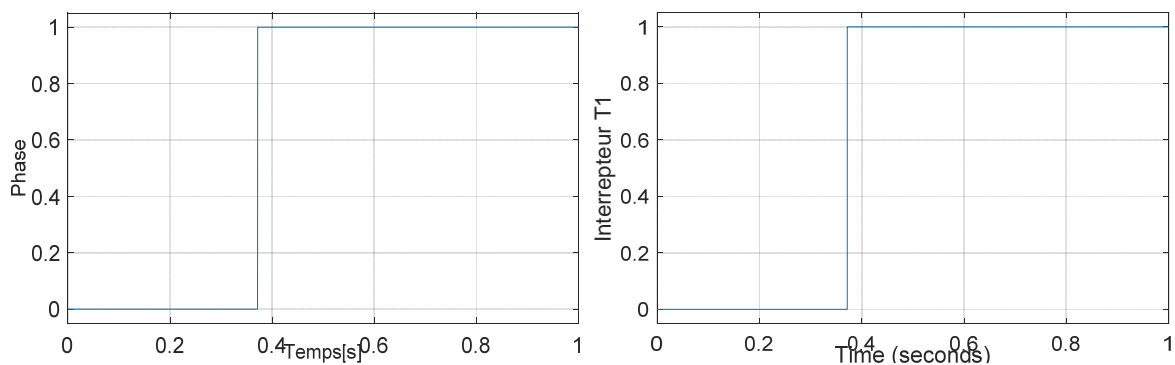


Figure III.12: Phase et Interrupteur en défaut.

Les figures (III.13), (III.14) et (III.15) présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant $t=0.3$ s au niveau de l'interrupteur T_6 . Les valeurs des courants moyennes I_a et I_b est positive et la valeur de courant I_c est négative. On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à 0.1 . L'angle du vecteur de Park est égal à 70° , donc le défaut est présent dans l'interrupteur T_6 .

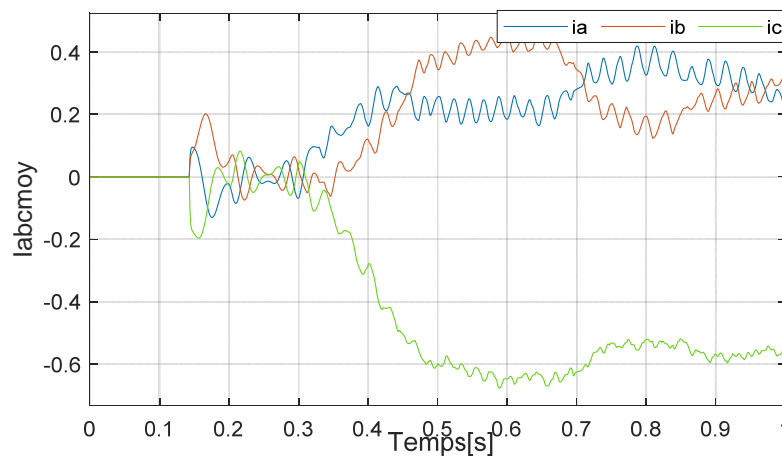


Figure III.13: valeur moyenne des courants triphasés.

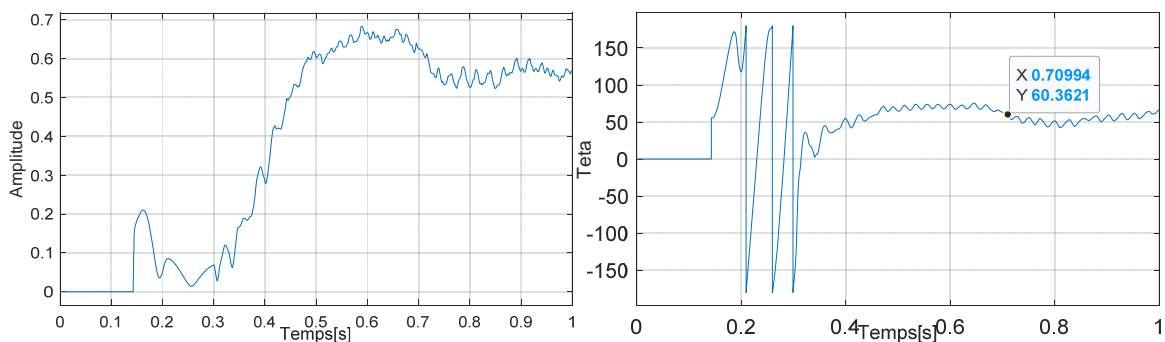


Figure III.14: amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

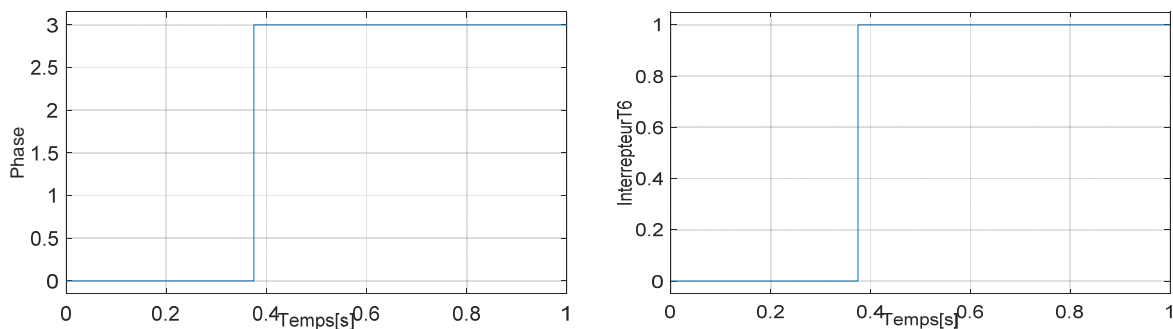


Figure III.15: phase et Interrupteur en défaut.

III.8.3 Détection des défauts de circuit ouvert avec onduleur trois niveaux

Pour effectuer le diagnostic de panne d'un onduleur trois niveaux, plusieurs étapes sont nécessaires. Une fois la panne détectée et la branche et la paire de transistors IGBT défectueux par l'algorithme (figure III.16),

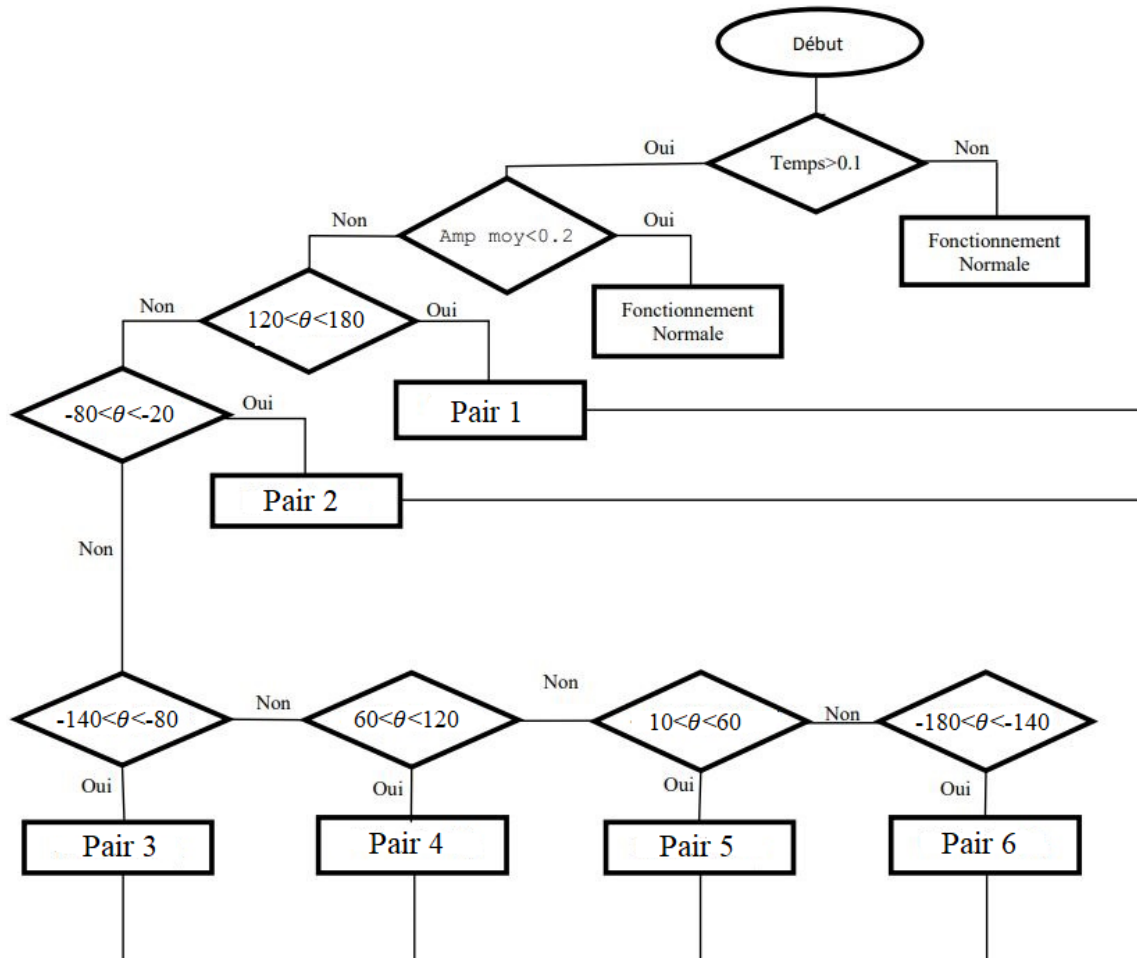


Figure III.16: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

Il faut maintenant déterminer le transistor IGBT spécifiquement défectueux. Cela peut être accompli en utilisant le sous-système 2 de la (figure III.17)

Ce sous-système divise le courant normalisé i_{xn} [k] en parties positive ($i_{xn_{pos}}$ [k]) et négative ($i_{xn_{neg}}$ [k]). Ensuite, les valeurs moyennes normalisées $i_{xn_{pos}}$ [k] et $i_{xn_{neg}}$ [k] sont calculées à l'aide des équations (III.13) et (III.14), en utilisant le nombre total d'échantillons (N), l'indice de l'échantillon (k) et l'indice de la branche de l'onduleur (x).

$$i_{xn_{pos_{av}}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{xn_{pos}}[k], \quad x \in \{A, B, C\} \quad (\text{III.13})$$

$$i_{xn_{neg_{av}}}[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{xn_{neg}}[k], \quad x \in \{A, B, C\} \quad (\text{III.14})$$

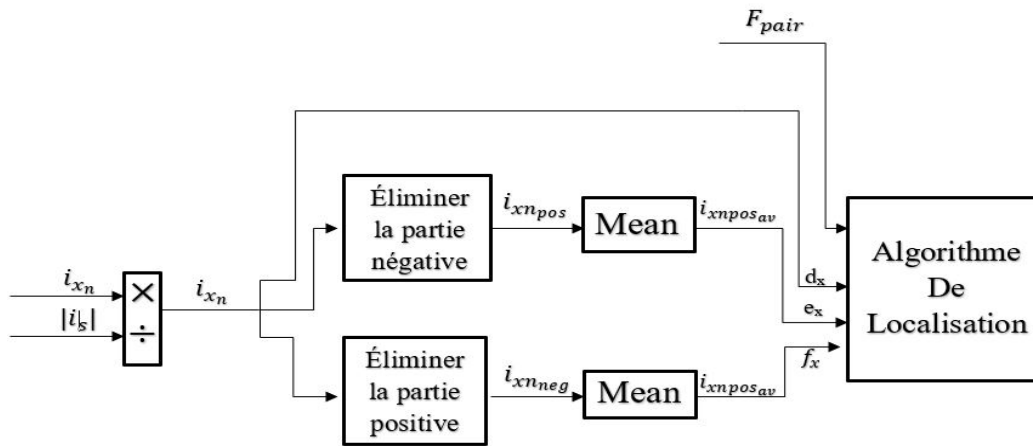


Figure III.17: Schéma globale pour la localisation d'un interrupteur ouvert

Lorsque tous les transistors IGBT de l'onduleur sont en bon état, les valeurs moyennes normalisées $i_{xn_{pos}}$ [k] et $i_{xn_{neg}}$ [k] sont généralement constantes : Si ces valeurs diffèrent, cela indique une panne en circuit ouvert dans un transistor IGBT. [45]

Pour détecte l'interpréteur exacte du défaut (circuit ouvert), on utilise l'algorithme (Fig III.8) pour détecte le pair F_{pair} (demi bras), et pour identifier l'interrupteur du demi bras on base sur les valeurs moyennes de : d_x , e_x et f_x qui changeant de chaque interpréteur de bras.

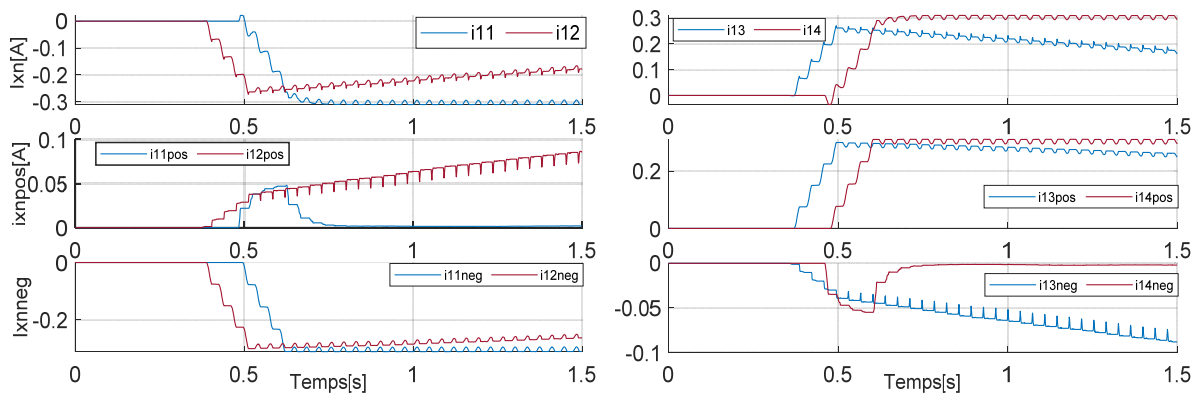


Figure III.18: courants moyens du premier bras.

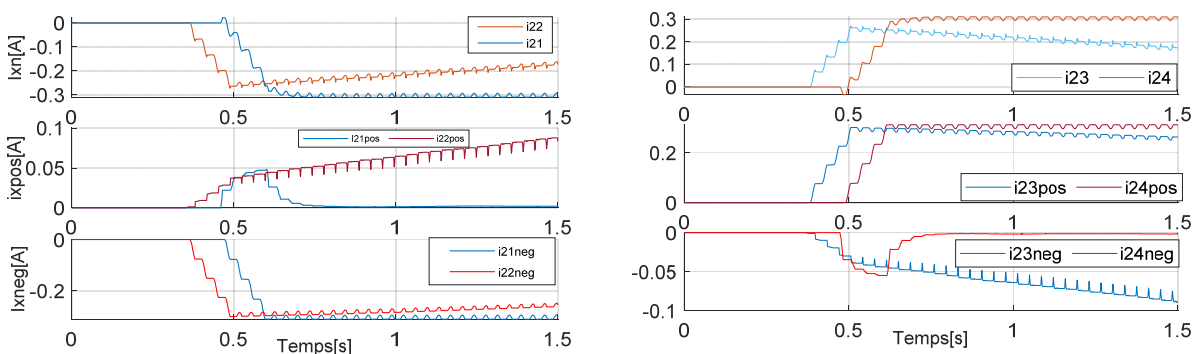


Figure III.19: valeur moyenne du deuxième bras.

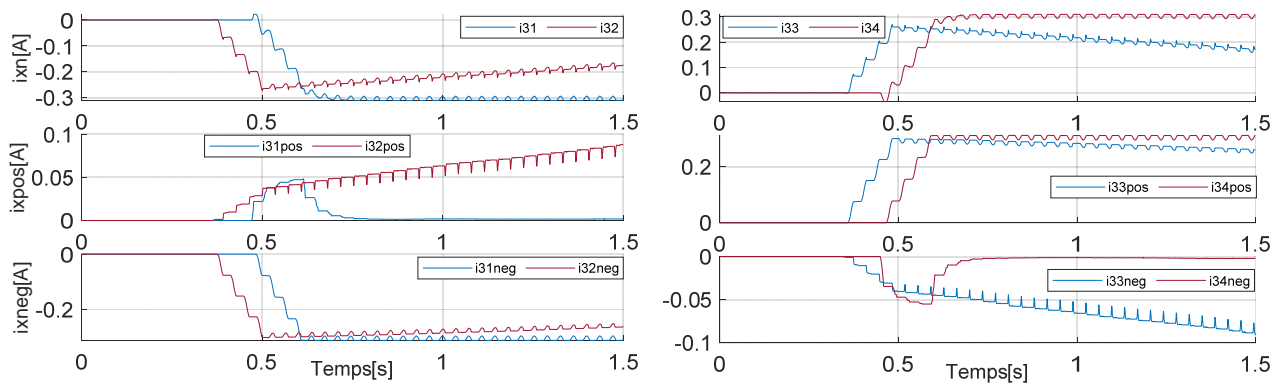


Figure III.20: valeur moyenne du troisième bras.

On remarque que les valeurs du courant moyennes i_{xn} , i_{xnpos} et i_{xneg} sont identiques pour les trois bras de l'onduleur. Alors nous pouvons définir l'algorithme de détection de IGBT du bras.

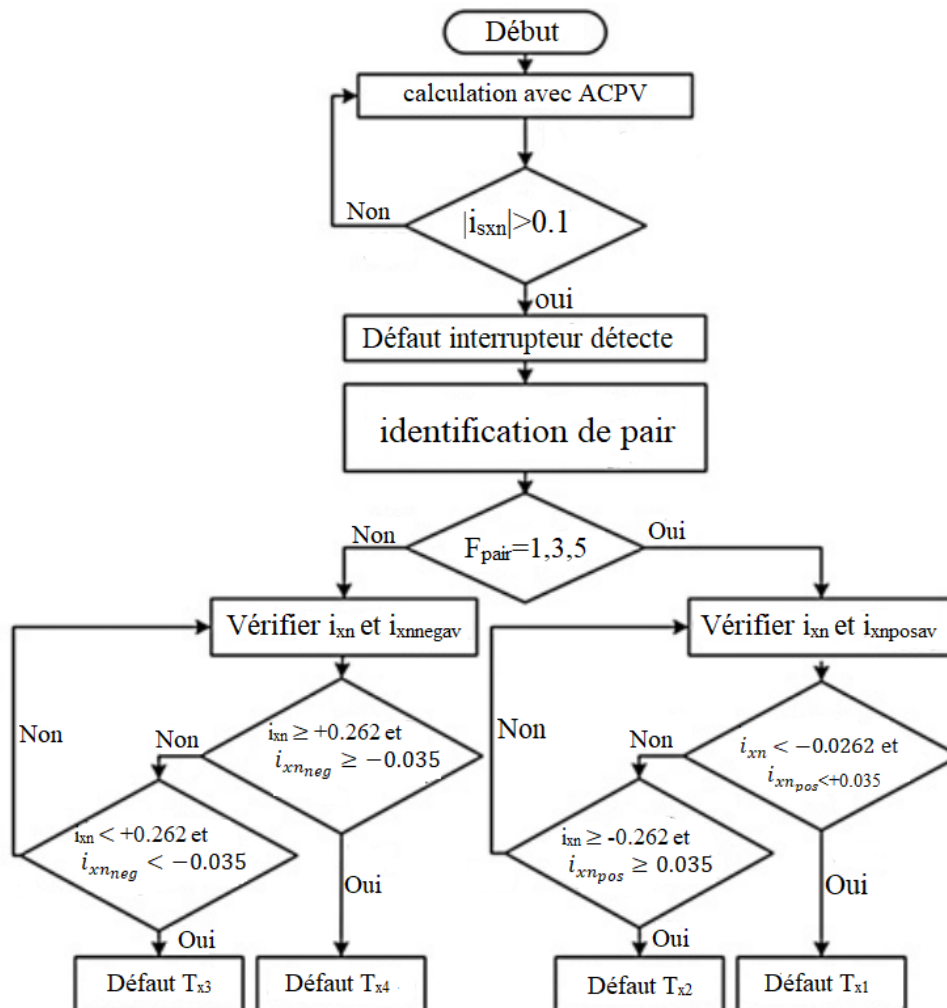


Figure III.21: Algorithme pour la détection du défaut circuit ouvert.

III.8.3.1 Exemple de détection des défauts

Les figures (III.22), (III.23) et (III.24), présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant $t=0.3s$ au niveau de l'interrupteur T_{22} . Les valeurs des courants moyens I_a et I_c sont positive et la valeur de courant I_b est négative. On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à 0.1 . L'angle du vecteur de Park est égal à -100 , et $i_{xn} > -0.262$ et $i_{xnpos} > 0.035$ donc le défaut est présent dans l'interrupteur T_{22}

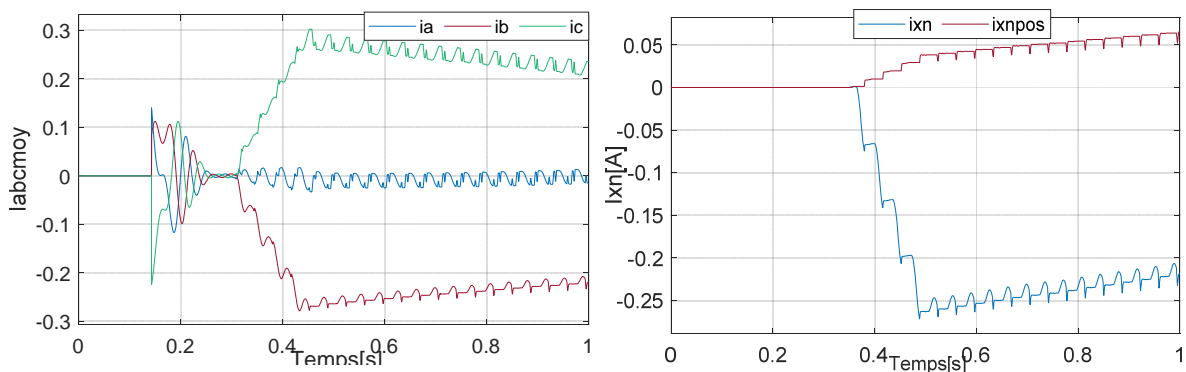


Figure III.22: valeurs moyennes du courant triphasé et courant normalisée.

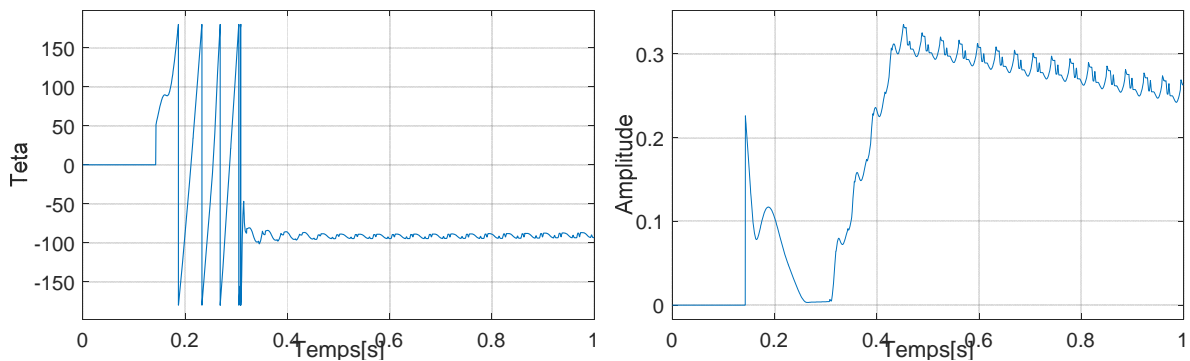


Figure III.23: amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

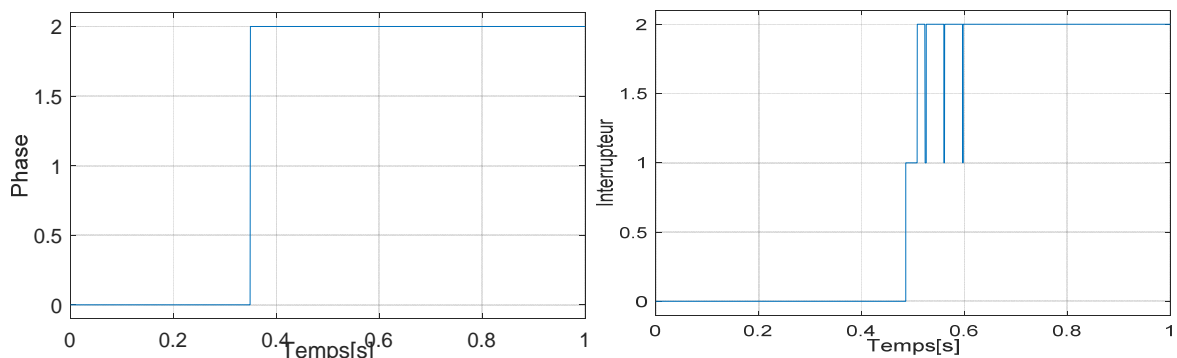


Figure III.24: phase et Interrupteur en défaut.

Les figures (III.25), (III.26) et (III.27) présentent les résultats de simulation de la détection de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert qui s'applique à l'instant $t=0.3s$ au niveau de l'interrupteur T_{33} . Les valeurs du courant moyenne I_a est négative et la valeur de courant I_b et I_c sont positives. On a remarqué que la valeur moyenne de l'amplitude des courants de Park est supérieure à $0,1$. L'angle du vecteur de Park est égal à -150 , donc le défaut est présent l'interrupteur T_{33} .

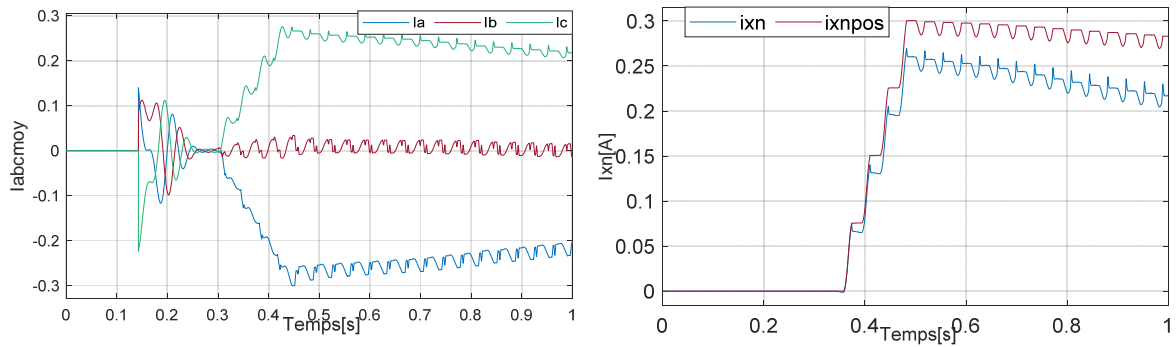


Figure III.25: valeur moyenne du courant triphasée.

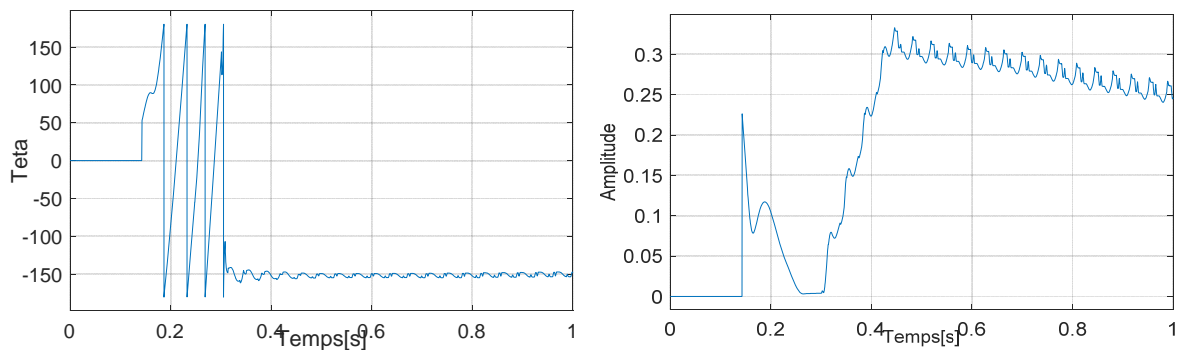


Figure III.26: amplitude de courant en repère de Park et l'angle du vecteur de Park.

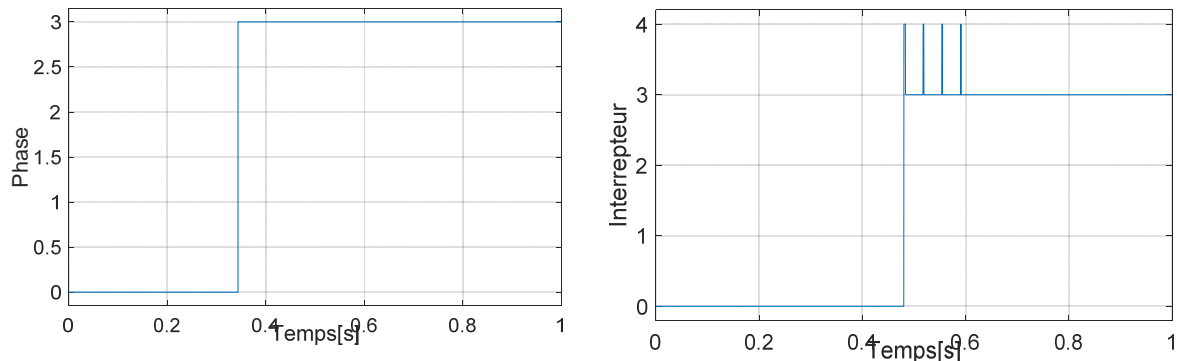


Figure III.27: La phase et Interrupteur en défaut.

III.9 Conception d'un système de diagnostic avec la logique floue sous Matlab

L'implémentation du système d'inférence floue sous Matlab est réalisée par l'interface graphique de la boîte à outils. Méthode de diagnostic du défaut base sur logique floue

III.9.1 Structure du système d'inférence floue (SIF)

Les bases de floues de l'approche proposée sont extraites de l'analyse des conditions défectueuses en circuit ouvert, et nous avons choisi un système d'inférence floue avec deux variables à l'entrées et une variable à la sortie. La figure suivante montre le schéma bloc de notre système.

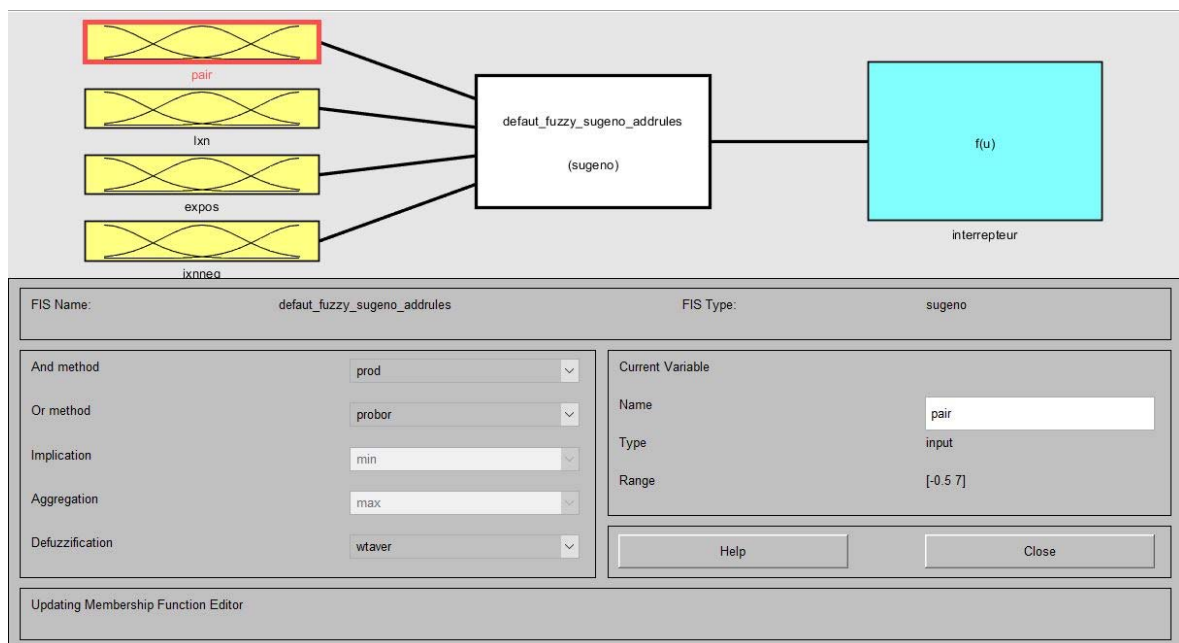


Figure III.28: schéma bloc du SIF.

III.9.2 Fuzzification des variables d'entrées et de sorties

Elles permettent de définir le sous-ensemble flou et de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou. Nous allons travailler dans ce chapitre avec une fonction d'appartenance de type trapézoïdale et triangulaire.

III.9.2.1 Fuzzification de la variable d'entrées (Pair)

La variable "Pair" varie dans l'intervalle $[0 \ 6]$. Donc, cette variable a sept fonctions d'appartenance de type triangulaire qui est : $[p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6]$

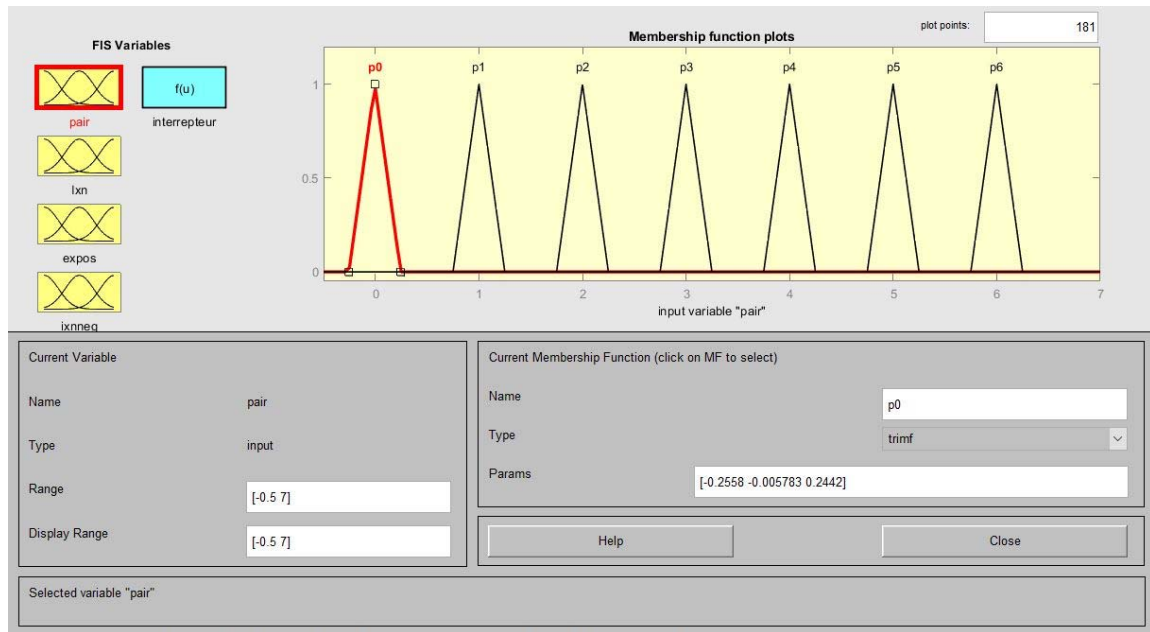


Figure III.29: Fuzzification de la variable d’entrée « Pair ».

III.9.2.2 Fuzzification de la variable d’entées (i_{xn})

La variable " i_{xn} " varie dans l’intervalle $[-0.5 \ 0.5]$. Donc, cette variable a quatre fonctions d’appartenance de trapézoïdale qui sont : $[d_{xN1}, d_{xN2}, d_{xP1}, d_{xP2}]$.

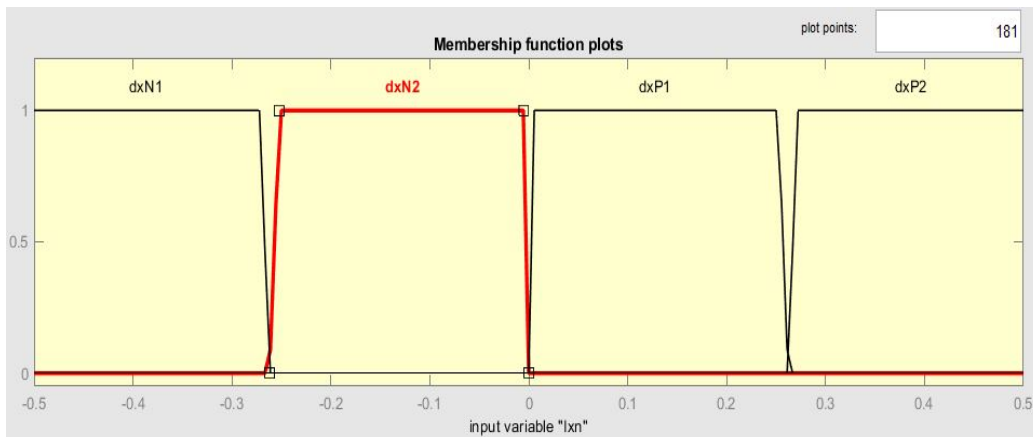


Figure III.30: Fuzzification de la variable d’entrée « i_{xn} ».

III.9.2.3 Fuzzification de la variable d’entées (i_{xnpos})

La variable " e_{xpos} " varie dans l’intervalle $[0 \ 0.5]$. Donc, cette variable a quatre fonctions d’appartenance de trapézoïdale qui sont : $[E_{xs}, E_{xb}]$

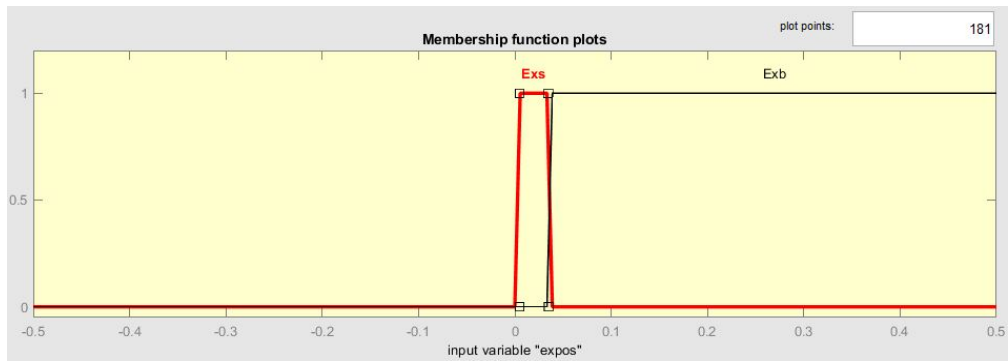


Figure III.31: Fuzzification de la variable d'entrée « i_{xnpos} »

III.9.2.4 Fuzzification de la variable d'entées (i_{xnneg})

La variable " i_{xnneg} " varie dans l'intervalle $[-0.5 \ 0.5]$. Donc, cette variable a quatre fonctions d'appartenance de trapézoïdale qui sont : $[F_{xb}, F_{xs}]$.

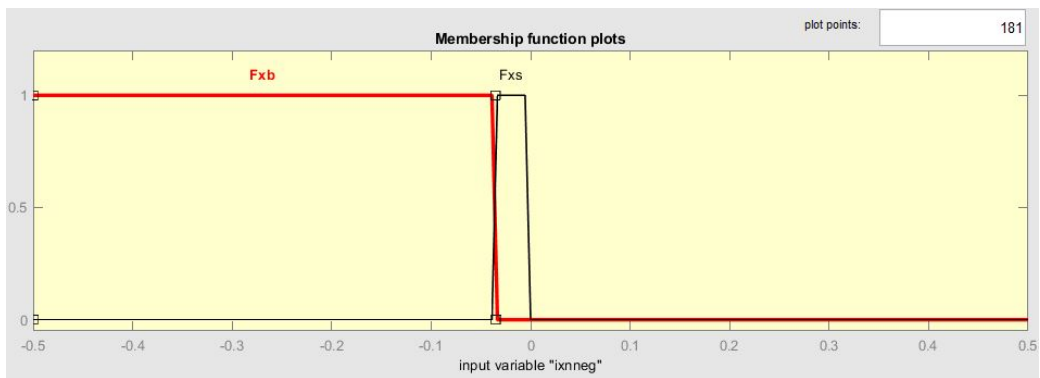


Figure III.32: Fuzzification de la variable d'entrée « i_{xnneg} »

III.9.2.5 Fuzzification de la variable de sortie

La variable "Interrupteur " varie dans l'intervalle $[0 \ 4]$, cette variable a quatre fonctions d'appartenance de type constant qui sont : $[T_0, T_1, T_2, T_3, T_4]$.

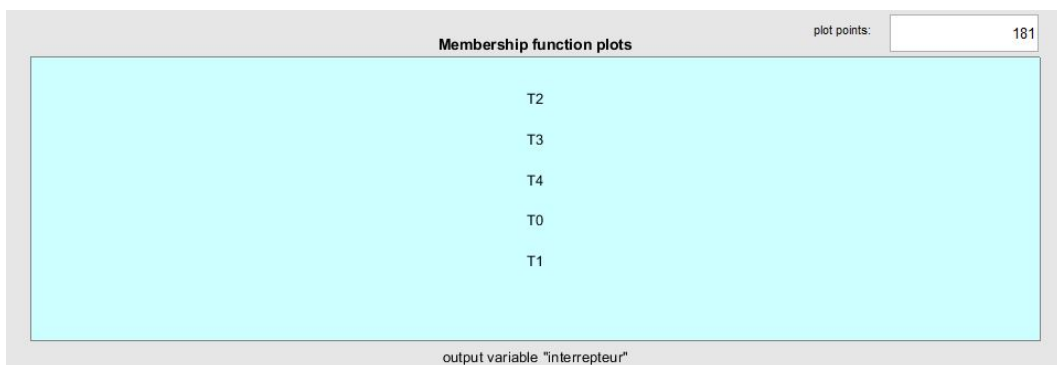


Figure III.33: Fuzzification de la sortie « interrupteur ».

III.9.3 Inférence

La stratégie de diagnostic dépend essentiellement des inférences (règles).

On compte 13 règles d'inférence comme exemples, les règles suivantes :

- SI (Pair est po) ALORS (T0) → état sans défaut,
- SI (Pair est p3) ET (ixn est dxN2) et (ixnpos est Exb) ALORS (Interrupteur est T2),
- SI (Pair est p6) ET (ixn est dxP2) et (ixneg est Fxs) ALORS (Interrupteur est T4),

La figure (III.23) illustre la configuration des différentes règles floues pour les différentes situations de défauts dans le système flou.

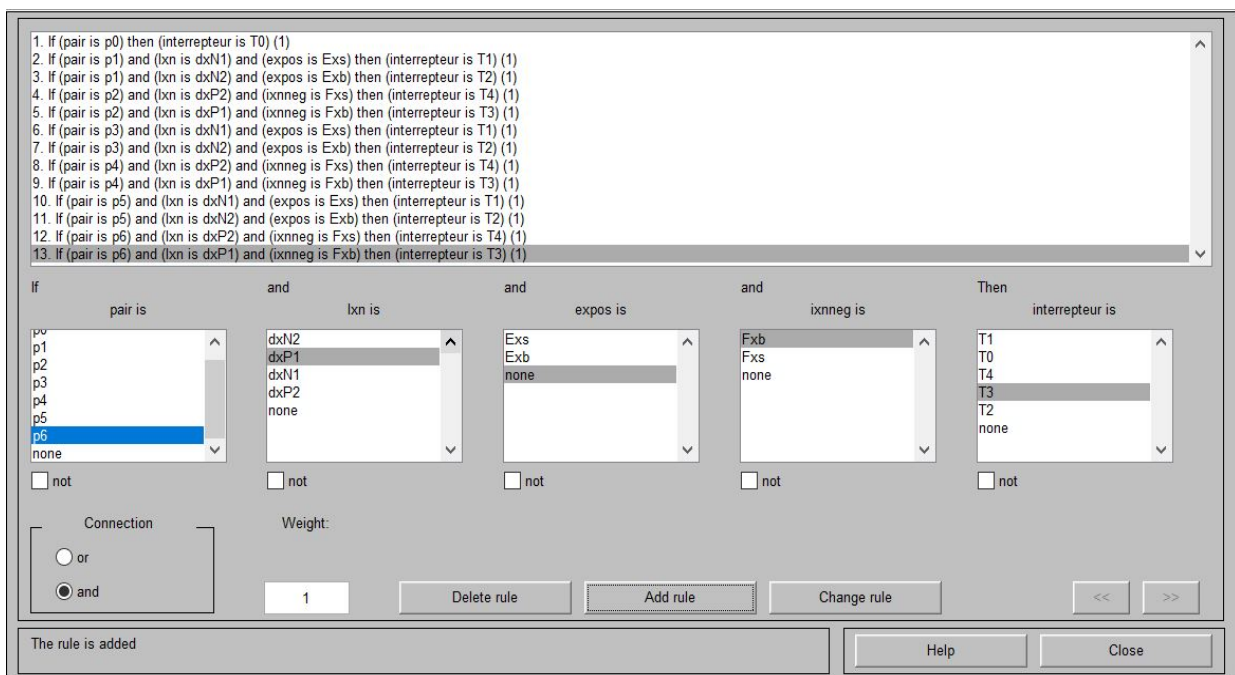


Figure III.34: présentation des règles d'inférence.

III.9.4 Défuzzification

La défuzzification permet la conversion de l'union des sous-ensembles flous modifiés (fonctions d'appartenance résultantes fournies par l'inférence), à une sortie non floue ; suivie par une dénormalisation et conversion N/A.

Les figures (III.24), (III.25) illustre deux exemples de défuzzification de défaut appliqué dans $t=0.3s$, le premier est dans le cas d'un défaut dans T1 de ($P=1$, $ixn=-0.396$ et $ixnpos=0.018$ interrupteur=T1). Le second concerne un exemple de défauts dans T4 de ($P=4$, $ixn=0.33$ et $ixneg=-0.0178$ interrupteur=T4).



Figure III.35: Exemple de défuzzification en cas de défaut dans T1.



Figure III.36: Exemple de défuzzification en cas de défaut dans T4

Donc le résultat obtenu par le système (SIF) est confondu avec l'hypothèse que nous avons considérée, donc notre système a bien classer le défaut.

III.10 Résultats de simulation

Les résultats de simulation d'un cas de défaut étudiés précédemment sont donnés par la figure III.37 présentés par la sortie correspondante du système flou.

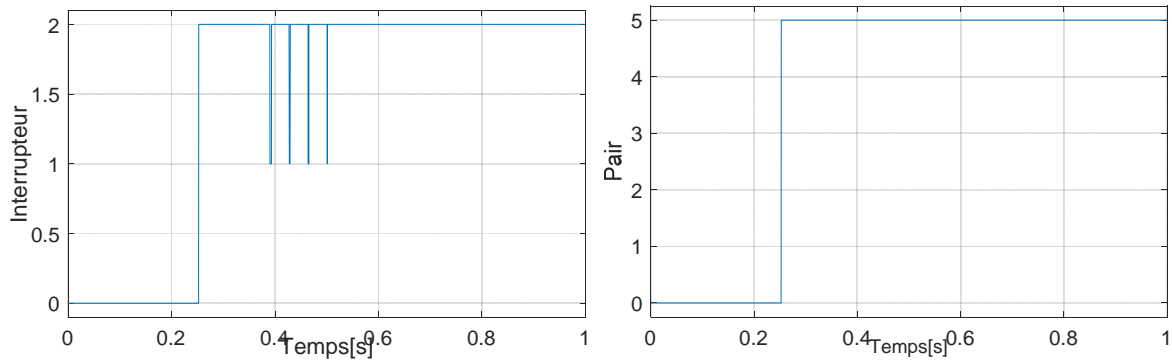


Figure III.37: Cas de défaut de l'interrupteur T_{22} .

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous examinons le défaut de circuit ouvert d'un interrupteur en utilisant deux types d'onduleurs : un onduleur à deux niveaux et un onduleur à trois niveaux. Nous effectuons des simulations à l'aide de MATLAB/SIMULINK afin d'observer les résultats de la simulation lors de l'application d'un défaut, à savoir l'ouverture d'un interrupteur. Pour détecter le défaut, nous utilisons le système de diagnostic de défaut d'onduleur MLI en utilisant deux techniques de diagnostic différentes. La première technique repose sur le module et l'angle du vecteur de Park pour détecter le défaut dans l'onduleur à deux niveaux, tandis que pour l'onduleur à trois niveaux, nous utilisons le module et l'angle de Park pour détecter le pair. Une fois détecté, nous appuyons sur les courants moyens pour identifier précisément l'interrupteur défectueux. La deuxième méthode de diagnostic flou est capable de détecter le défaut, ce qui permet un contrôle sécurisé en isolant le défaut.

Conclusion Générale

En raison de la tendance des pays à se tourner vers les énergies renouvelables, l'énergie éolienne présente un potentiel propre et un rendement élevé par rapport à l'énergie solaire. Dans le cadre de notre mémoire de Master, nous avons choisi de nous concentrer sur la production et la conversion de l'énergie éolienne en utilisant la GSAP. Nous avons abordé plusieurs concepts théoriques liés aux systèmes éoliens, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons également étudié les différents types d'éoliennes. Ensuite, nous avons présenté une modélisation mathématique de la chaîne éolienne connectée à la GSAP, en mettant l'accent sur un générateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables avec un redresseur commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Nous avons effectué des simulations de la chaîne éolienne à l'aide du logiciel MATLAB, en nous concentrant sur le fonctionnement de la chaîne éolienne selon une structure de conversion d'énergie spécifique, comprenant une génératrice synchrone à aimants permanents pilotée par un convertisseur contrôlé par MLI. Nous avons développé un modèle complet du système afin d'analyser son comportement dynamique. Nous avons également mis en place un dispositif de contrôle basé sur la commande vectorielle de la génératrice, associé au système de conversion, afin d'extraire la puissance maximale du vent. Les résultats de simulation, pour un profil de vent donné, ont permis d'atteindre les objectifs fixés par ces stratégies de commande. Nous avons étudié deux types de convertisseurs, à deux et trois niveaux, en analysant leurs performances et leur dynamique sur la chaîne éolienne.

Dans la dernière partie de notre étude, nous sommes penchés sur la détection et le diagnostic des défauts de type circuit ouvert au niveau des interrupteurs des onduleurs MLI à deux et trois niveaux dans un système d'entraînement électrique. Nous avons proposé et évalué deux techniques statistiques pour détecter et diagnostiquer ces défauts. La première méthode repose sur la détection du défaut en utilisant les informations relatives au module et à l'angle du vecteur de Park, et elle s'applique aux convertisseurs à deux niveaux. Pour les convertisseurs à trois niveaux, nous avons également utilisée cette méthode de détection, en ajoutant des critères supplémentaires basés sur les courants moyens pour identifier précisément l'interrupteur défectueux. De plus, nous avons utilisé la logique floue pour la détection et l'identification des défauts

En conclusion, nous recommandons de continuer nos travaux de recherche en explorant les perspectives suivantes pour améliorer les futures études :

Approfondir la détection et le diagnostic des défauts pour les onduleurs à plusieurs niveaux, notamment cinq et sept niveaux.

Examiner l'utilisation de techniques basées sur les réseaux neuronaux pour la détection et le diagnostic des défauts.

Compléter notre mémoire par une étude d'annexe et inclure une bibliographie pour référencer les sources consultées.

Ainsi, ces axes de recherche complémentaires pourraient contribuer à enrichir notre travail de mémoire et à approfondir notre compréhension des aspects liés à la détection et au diagnostic des défauts dans les systèmes d'onduleurs multi-niveaux.

Annexes

- Le tableau suivant donne les différents paramètres utilisés dans la simulation de la chaîne éolienne :

Elément de la chaîne	paramètres	Valeurs	Désignations , Unités
Turbine éolienne	R	3	Diamètre d'une pale [m]
	G	5.4	Gain du multiplicateur
	J_{Turbin}	0.042	Moment d'inertie de la turbine [$Kg. m^2$]
	F_{Turbin}	0.017	Coefficient de frottement [$Nm.s^{-1}$]
	ρ	1.22	Densité de l'air [Kg/m^3]
	λ_{opt}	8.1	Vitesse spécifique optimale
GSAP	F_{sn}	50	Fréquence de la tension d'alimentation [Hz]
	p	2	Nombre de pair de pôle
	L_d	0.0075	Inductance statorique direct [H]
	q	0.0075	Inductance statorique quadratique [H]
	R_s	0.45	Résistance statorique [Ω]
	φ_f	0.52	Flux de l'aimant permanent [Wb]
	J_g	0.00208	Moment d'inertie de la génératrice [$Kg. m^2$]
	F_g	0.00017	Coefficient de frottement [$N.m.S^{-1}$]
	C	1500e-6	Capacité [mF]
	L_F	0.014	Inductance [mH]
	R_F	1.4	Résistance [Ω]

• Conditions de simulations

Les différentes simulations ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les conditions adoptées lors des simulations sont les suivantes :

- La méthode : Onde1 (Euler),
- Le temps de calcul : $0.6\mu S$,
- Fixed step.

On donne le schéma bloc des différents éléments de la chaîne éolienne sous Matlab/simulink

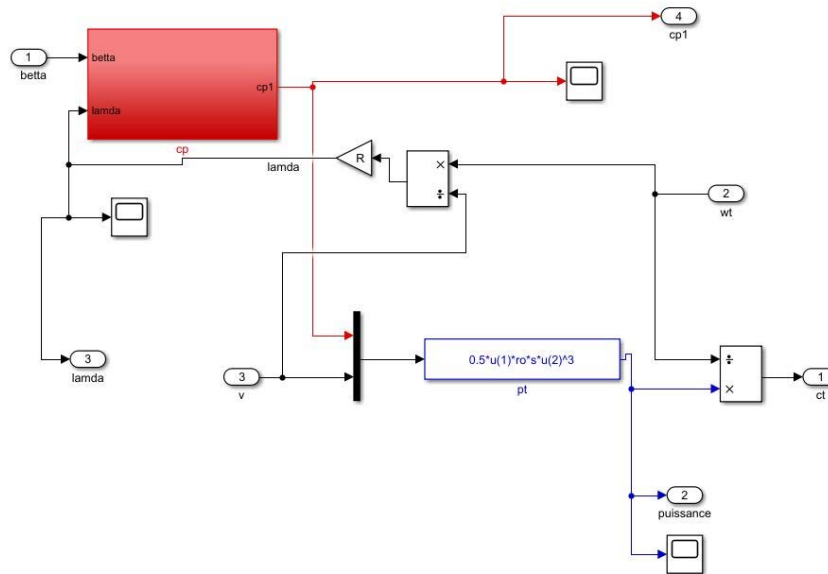


Figure 1 : Turbine

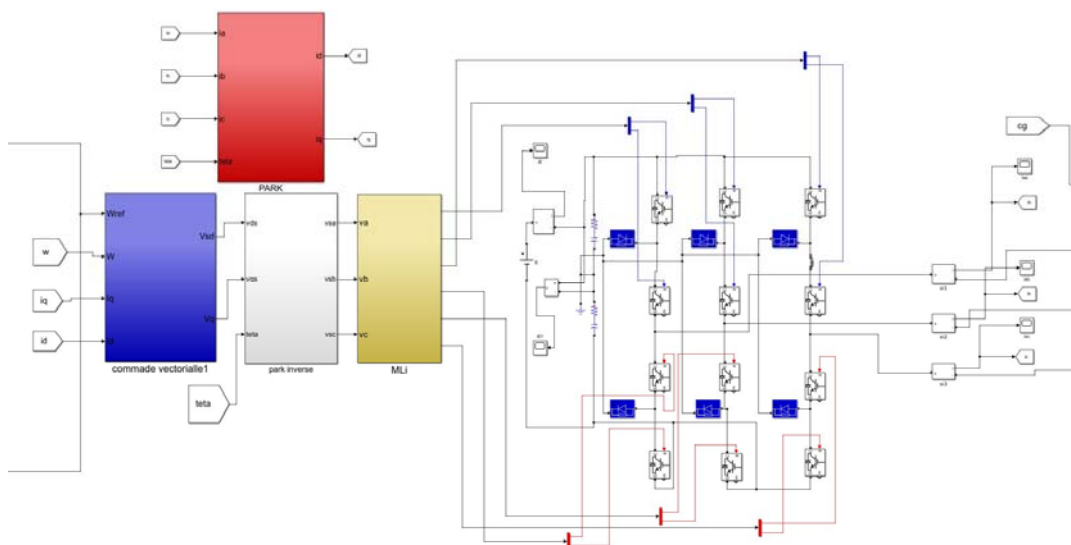


Figure 2 : Transformation de Park + Commande Vectorielle. + onduleur trois niveaux

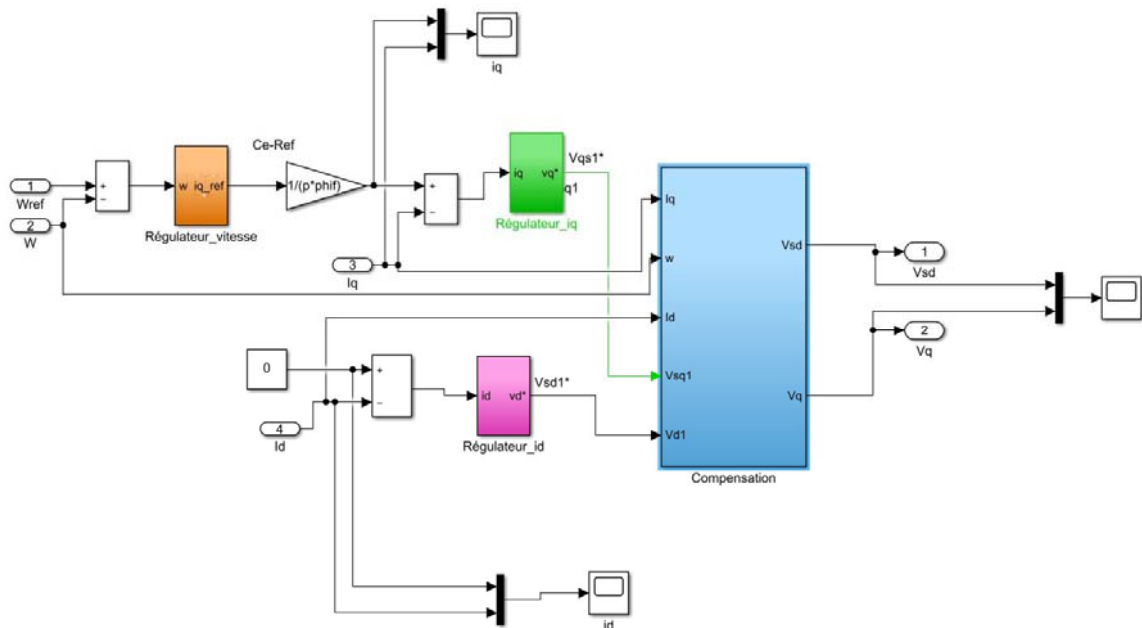


Figure 3 : La Commande Vectorielle.

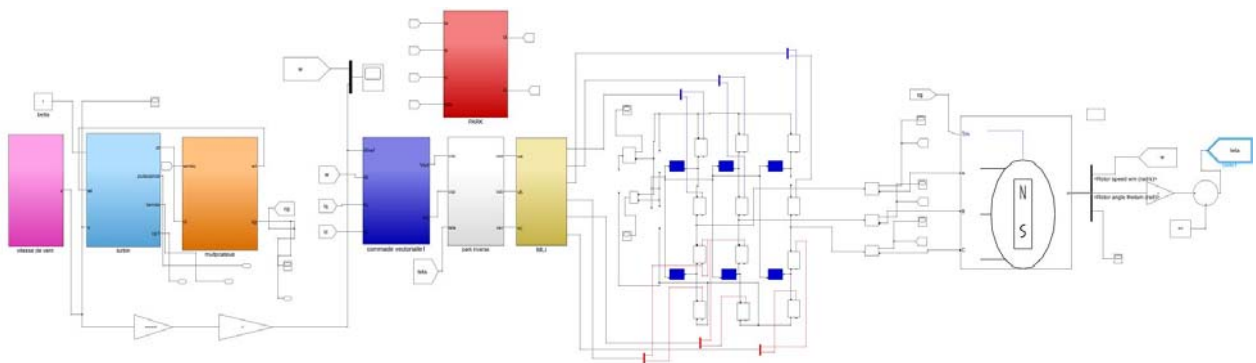


Figure 4 : La chaîne éolienne connecté à GSAP avec onduleur 3 niveaux

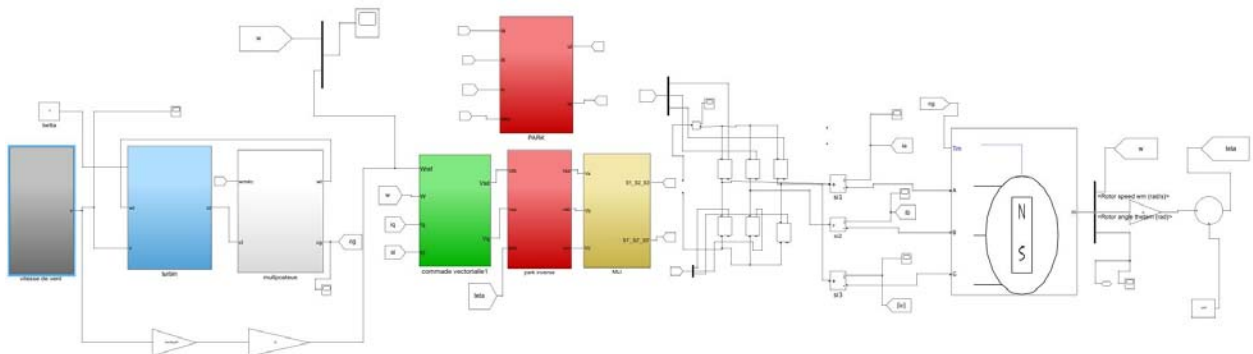


Figure 5 : La chaîne éolienne connecté à GSAP avec onduleur 2 niveaux

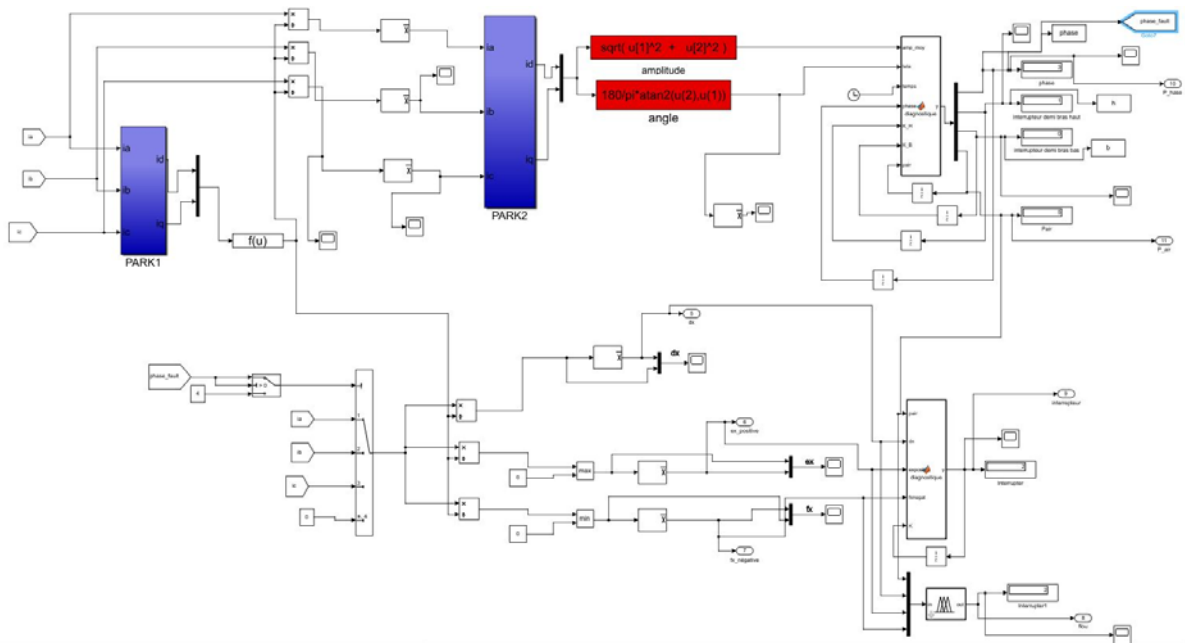


Figure 6 : Diagnostic d'onduleur trois niveaux par module et angle du vecteur de Park moyen. et par Fuzzy

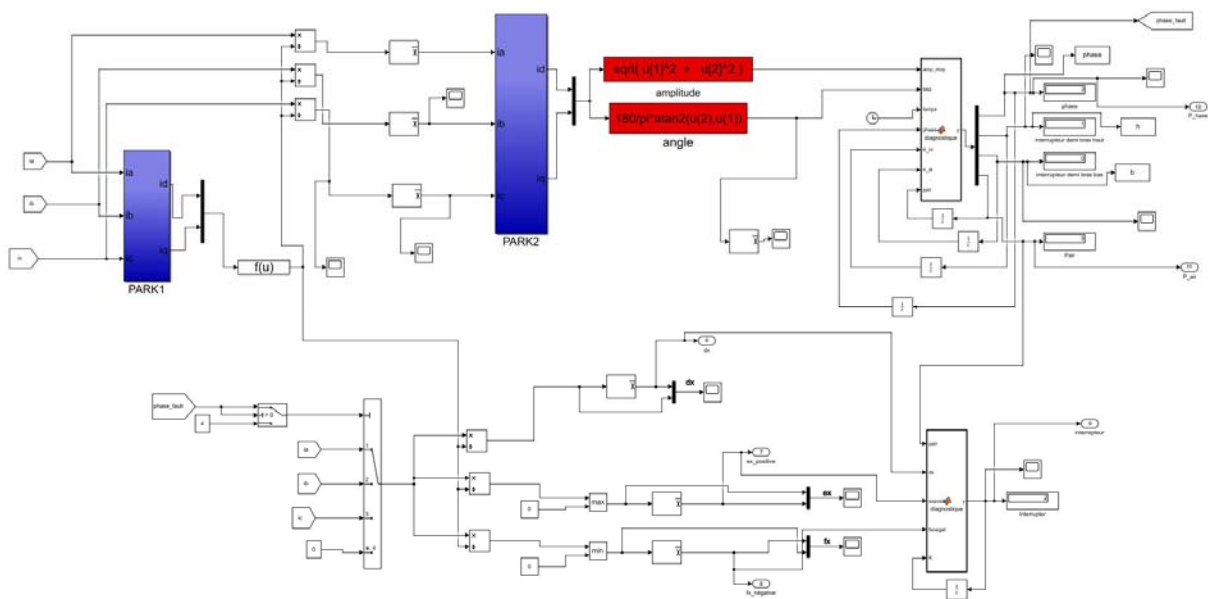


Figure 7 : Diagnostic d'onduleur deux niveaux par module et angle du vecteur de Park moyen.

Références bibliographique

- [1] Ziraoui Salah Eddine « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau » Mémoire Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [2] Assam Azzeddine, Mdm Ben Smail et S Boukerma Redouane, « Optimisation Et Commande D'une Chaîne De Conversion Eolienne Par La Logique Floue Adaptative » Thèse doctorat, 2019.
- [3] Belgharbi Nour el Houda, Torkia Belkaim Hanane, « Observation de la GSAP en vue de sa commande vectorielle dans un système de conversion d'énergie éolienne » Mémoire Master, 2020.
- [4] Latreche Mohammed Tahar, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Mémoire Master, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [5] Abdoula Yb, Mamadie Sylla, « Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation » Université Québec CANADA, 2013.
- [6] Naoual Tidjani, « Modélisation optimisation et dispositif de commande pour la production de l'énergie de source éolienne » Thèse doctorat Université BLIDA, 2011.
- [7] Tourqui Djamel Eddine, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'intégration des sources d'énergies renouvelables », thèse doctorat, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2017.
- [8] Abdelhadi Hakim, Bakki Abdelmadjid, « Commande d'un système éolien basé sur un GSAP alimentée par un convertisseur multicellulaire », Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.
- [9] A. Rabah, A. Rezki, « Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents A Attaque Directe », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [10] Zeghoudi Souhila, « Commande Par Passivité De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire De Master Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [11] Amoura Rabah, Arab Rezki, « Modélisation et Commande d'un Aérogénérateur Synchrone à Aimants Permanents à Attaque Directe », Mémoire Master, 2013.
- [12] OGUIBA Serra, HEROUALA Manal, « Contrôle et Diagnostic du convertisseur DC/AC d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une GSAP connectée au réseau », Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret 2022.
- [13] Azzeddine Dekhane, « Modélisation et contrôle d'une chaîne éolienne de conversion de l'énergie », Thèse doctorat, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2017.
- [14] Mesai Ahmed Hamza, Nadir Kais, « Contrôle et supervision des processus automatisés(CSPA)» Mémoire Master, Université Djilali Liabes, 2017.
- [15] Léa Riachy, « Contribution à la commande d'un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques » Thèse doctorat, Université Rouen Normandie, 2017.
- [16] Mesai Ahmed Hamza, Nadir Kais, « Contrôle et supervision des processus automatisés (CSPA)», Mémoire Master, Université Djilali Liabes, 2017.
- [17] Hamecha Samira, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.

- [18] Mansouri Mohamed, «Commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne» , Thèse doctorat à université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.
- [19] Beddek Karim, «Détection et localisation de défauts d'un système de conversion d'énergie éolienne» , thèse du doctorat , Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017.
- [20] Boudjema Abderaouf, «Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents MSAP » , Mémoire Master, université Mohamed Khider Biskra, juin 2014.
- [21] Deboucha Louiza, Achacha Radia, «Commande vectorielle des machine synchrones à aimants permanents (MSAP) » , Mémoire de master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, juin 2022.
- [22] Belhamdi Saad, «Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Technique de Commande», Thèse doctorat, université Mohamed Khider – BISKRA, 2014.
- [23] Mahdaoui Hamza, «Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP » , Mémoire master, Université AHMED DRAIA –ADRAR, 2016.
- [24] Noureddine BOUNASLA, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», Mémoire Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [25] Himer Hamza Toufik, « Commande par mode glissant floue d'une machine asynchrone » Mémoire de Master, Université de M'sila, 2018.
- [26] Kambiz Arab Tehrani, « Conception, Synthèse et Application d'une Nouvelle Commande Robuste par PID Fractionnaire pour Les Onduleurs Multiniveaux » , Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [27] Hadji Larbi Elyamine, Benyahia Sabah, « Commande en position et en vitesse d'un moteur synchrone à aimants permants » , Mémoire de Master à Université de M'sila, 2011.
- [28] Limane Mohamed Ziad Rida, « Commande vectorielle d'une machine synchrone polyphasée » , Mémoire académique, université Kasdi Merbah –Ouargla, 2012.
- [29] Taibi Imen, Djedid Imane, « Détection et Localisation des Défauts dans les Onduleurs à MLI par la Logique Floue » , Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret 2014.
- [30] Battane Hanane, Benaissa Zohra, « Détection et Diagnostic de Défauts d'un Onduleur par la Technique des Réseaux de Neurones » , Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret, 2019.
- [31] BOURAIYOU Ahmed, « Diagnostic de défaut Par logique flou » , Mémoire Master, Universite Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [32] Younes Hadji, Yaser Gadi, « Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une machine asynchrone » , Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2014.
- [33] Olivier Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes application a un ensemble convertisseur machine asynchrone » , Thèse doctorat, L'école Doctorat électronique, électrotechnique, automatique Lyon, 2006.
- [34] Khadem Messaoud, ZINE Boubaker et ATTAR Achraf Eddine, « Détection des Défauts dans les Machines Asynchrones en Utilisant l'analyse des Vecteurs de Park » , Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2022.

- [35] Benkaddour Mouhammed Walid, « Diagnostic de défauts et reconfiguration d'onduleur Pour la commande directe de couple d'un moteur à induction Par la logique floue », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah Ouargla 2017.
- [36] Ghefsi Yassine, « Détection Des Défauts Dans L'association Convertisseur Machine A Induction » Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [37] Si Hali Myriam, « Diagnostic de défauts à base d'observateurs à entrées inconnues : Application au système hydraulique », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2019.
- [38] Ouraiou Ahmed, « Diagnostic par logique Flou », Mémoire Master, Université Badji Mokhtar, 2010.
- [39] Rebah Maamouri, « Diagnostic et Commande Tolérante aux Défauts Appliqués à un Système de Conversion Électromécanique à Base d'une Machine Asynchrone Triphasée », Thèse doctorat, École Doctorale ED184 – Université de Sousse Tunisie, 2017 .
- [40] M.Ould Brahim, Mahmoud Fewzi, « Diagnostic De Convertisseur Ac-Dc Alimentant Un Moteur A Courant Continu A Excitation Séparée », Mémoire Master, Université De M'sila, 2014.
- [41] Bakkar Zakaria, « Détection de défauts d'une éolienne », Mémoire Master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [42] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. Silva, And A. M. N. Lima, “Compensation Strategies In The Pwmvsi Topology For A Fault Tolerant Induction Motor Drive System” , 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED'2003, Pp. 211–216.
- [43] Abdellaoui Hassina, « Amélioration des performances des convertisseurs électromécanique basée sur la machine synchrone à aimants permanents », Thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou, 2013.
- [44] Zeghoudi Souhila, « Commande Par Passivite De La Machine Synchrone A Aimants Permanents » Mémoire Master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- [45] Andre M. Santos Mendes, Mohsen Bandar Abadi, 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, pp 1127-1137, 2014.

ملخص

كان الهدف من هذا المشروع دراسة وتشخيص الأعطال في محولات الطاقة الإلكترونية المستخدمة في نظام توربينات الرياح. ركزنا على دراسة المكونات الميكانيكية، بما في ذلك العنفة، وعلبة التروس، والتحكم MPPT، من أجل تحديد استراتيجية التحكم المثلى لمولد الرياح. تم تطوير تقنية تحكم بالحاكاة، بناءً على طريقة التحكم الشعاعي في المولد لاستيعاب سرعات الرياح المتغيرة. علاوة على ذلك، تناولنا الكشف عن الأعطال وتشخيصها، وتحديدًا أعطال الدائرة المفتوحة، في كل من المحولات الطاقة ثنائية وثلاثية المستوى المستخدمة. تم اقتراح طريقتين وتقييمهما لاكتشاف الأخطاء وتشخيصها. تضمنت الطريقة الأولى اكتشاف الخطأ باستخدام عمدة وطاولة القيمة الوسطية للتيار الكهربائي في معلم 'بارك'. بعد ذلك، تم استخدام المنطق الغامض لتشخيص الأخطاء. من خلال الجمع بين الجوانب الميكانيكية والكهربائية لنظام توربينات الرياح، جنبًا إلى جنب مع تقنيات اكتشاف الأخطاء وتشخيصها، يهدف هذا المشروع إلى تعزيز الأداء العام والموثوقية وصيانة محولات الطاقة الإلكترونية في تطبيقات طاقة الرياح.

Résumé

Le projet avait pour objectif d'étudier et diagnostiquer les défauts des convertisseurs d'électronique de puissance utilisés dans une chaîne éolienne. Nous avons examiné la partie mécanique comprenant la turbine, le multiplicateur et le contrôle MPPT afin de déterminer le meilleur contrôle pour l'éolienne. Un dispositif de contrôle avec simulation a été développé, basé sur la commande vectorielle du générateur pour une vitesse variable du vent.

Enfin, nous avons abordé la détection et le diagnostic des défauts tels que les circuits ouverts dans un onduleur MLI à deux niveaux et à trois niveaux utilisés dans un système d'entraînement électrique. Deux techniques ont été proposées et évaluées pour la détection et le diagnostic des défauts. La première méthode consiste à détecter le défaut en utilisant le module, l'angle du vecteur de Park et la valeur moyenne du courant. Ensuite, nous avons utilisé la logique floue pour le diagnostic des défauts.

Abstract

The aim of the project was to study and diagnose faults in power electronics converters used in a wind turbine chain. We looked at the mechanical part including the turbine, gearbox and MPPT control to determine the best control for the wind turbine. A control device with simulation has been developed, based on vector control of the generator for variable wind speed.

Finally, we covered the detection and diagnosis of faults such as open circuits in a two-level and three-level PWM inverter used in an electric drive system. Two techniques have been proposed and evaluated for fault detection and diagnosis. The first method consists in detecting the fault using the modulus, the angle of the Park vector and the average value of the current. Then, we used fuzzy logic for fault diagnosis