

UNIVERSITE IBN-KHALDOUN TIARET

FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commande Des Systèmes Electriques

THEME

Contribution à l'étude des convertisseurs statiques
tolérants aux défauts utilisés dans les systèmes
éoliens

Préparé par :

Mr. Abdellah Abderrahmane.

Mr. Abdi Mohamed.

Devant le Jury :

Nom et Prénoms

Mr. ALLAOUI TAYEB.

Mr. SAIBI ALI.

Mr. TOUMI DJILALI.

Melle. TAMER AMINA.

Grade

PR

MAA

MCB

Magister

Qualité

Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

PROMOTION 2015/2016



Dédicaces

Nous dédions ce humble travail avec grand amour ,sincérité,fierté:

A nos chères parents, source de tendresse noblesse et affection .

*A nos frères et nos sœurs en témoignage de la fraternité avec nos
souhails de bonheur, de santé et de succès.*

A tout les membres de nos familles,

*A tous nos amis ,tous nos professeurs
et à tout qui compulse ce modeste travail.*

Abderrahmane et Amine

Remerciements

Louange à ALLAH, notre grand seigneur, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de nous avoir donné la bonne volonté et la patience pour l'achèvement de ce travail.

Que le salut d'ALLAH soit sur son prophète MOHAMMED, notre éducateur et guide du bon chemin.

*Nous remercions vivement Monsieur **Toumi Djilali** pour L'honneur qu'il nous fait en encadrement, et son entière disponibilité durant toutes les étapes de notre projet.*

*Ensuite nous adressons nos vifs remerciements et notre sincère gratitude au Monsieur **Allaoui Tayeb** de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à Monsieur **Saïbi Ali** pour avoir accepté la tâche d'examiner ce mémoire et pour le jugement scientifique qu'il a bien voulu y porter.*

*nos vifs remerciements sont adressés à Mademoiselle **Tamer Amina**, pour son aide précieuse.*

Un grand Merci aux enseignants ainsi que l'administration de génie électrique.

En fin nous adressons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué par leurs conseils ou leurs encouragements à l'aboutissement de ce travail.

Liste des symboles :

Symbole	Signification
V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
ρ	densité de l'air 1,225 kg.m ⁻³
s	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
P_m	Puissance extraite par le rotor éolien
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
C_{p-max}	Coefficient de puissance de l'éolienne maximal de la turbine.
λ	Vitesse relative de l'éolienne
λ_{opt}	Vitesse relative optimale de l'éolienne
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de l'arbre du générateur
G	Gain du multiplicateur
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'éolienne
C_g	Couple résistant issue du multiplicateur.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
R	Rayon de la turbine
f	Coefficient des frottements visqueux de l'éolienne et de sa génératrice.
J	Inertie totale de l'arbre
s, r	Indices correspondant au stator et au rotor.
a, b, c	Indices correspondant aux trois phase a, b, c.
d, q	Axes correspondant au référentiel lié au champ tournant.
L_s, L_r	Inductances cycliques statorique et rotorique par phase.
l_s, l_r	Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.
M	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
M_s	Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator.
M_r	Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du rotor.
M_{sr}	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor lorsque les axes sont alignés.
R_s, R_r	Résistances d'enroulement statorique et rotorique par phase.
σ	Coefficient de fuite totale.
p	Nombre de paire de pôle.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
ω_s, ω_r	Pulsations électriques statorique et rotorique.
S	Operateur de LAPLACE
Ω	Vitesse mécanique du rotor.
ϕ_s, ϕ_r	Flux statorique, rotorique.
P	Puissance active statorique.
Q	Puissance réactive statorique.
K_p	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur
K_i	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
g	Le glissement.

Liste des symboles

v_{iom}	la tension de pôle mesurée.
v_{ioes}	la tension de pôle estimée.
ε_{io}	erreur de tension.

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
<i>MADA</i>	Machine Asynchrone à double alimentation
<i>GADA</i>	Génératrice Asynchrone à double alimentation
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking
<i>MLI</i>	Modulation de largeur d'impulsion.
<i>PI</i>	Action Proportionnel Intégral

INTRODUCTION GENERALE	1
I ChapitreI: Généralités sur le système éolien.....	3
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Systèmes éoliens :.....	3
I.2.1 Avantages & inconvénients de l'énergie éolienne.....	4
I.3 Les différents types des turbines éoliennes	5
I.3.1 Les différents types d'éoliennes :	6
I.3.2 Composants de turbines horizontales comprennent.....	6
I.4 Types de générateurs d'éoliennes :	8
I.5 Conversion électromécanique	8
I.5.1 Utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans la conversion électromécanique	8
I.5.2 Définition	9
I.5.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :.....	9
I.5.4 Différentes structures d'alimentation de la MADA.....	11
I.5.5 Domaine d'applications de la MADA.....	13
I.6 Description du système éolienne :.....	13
I.6.1 Avantages et inconvénients	14
I.6.2 Différents Défauts dans les systèmes éoliens :	15
I.7 Conclusion :.....	16
II Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA	18
II.1 Introduction :.....	18
II.2 Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique.....	18
II.2.1 Loi de Betz	18
II.2.2 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable :	20
II.3 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable :.....	21
II.3.1 Modèle du multiplicateur :	24
II.3.2 Equation dynamique de l'arbre :	24
II.4 Bilan de puissance :.....	26
II.4.1 Conception du correcteur de vitesse :.....	28
II.5 Résultats de simulation :.....	29
II.6 Modélisation de machine asynchrone double alimentation :.....	30
II.6.1 Hypothèses du travail.....	30
II.6.2 Modèle de la MADA dans le plan riphassé abc.....	31
II.6.3 Modèle de la MADA dans le plan dq :	34

II.7	Modélisation de l'onduleur de tension triphasé « côté rotor»	39
II.7.1	Stratégie de commande	41
II.8	Conclusion :	42
III	Commande vectorielle de la MADA.	43
III.1	Introduction :	43
III.2	Principe de la commande vectorielle :	43
III.2.1	Procédé d'orientation du flux:.....	44
III.2.2	Modèle de la MADA à flux statorique oriente:	45
III.2.3	Expressions des puissances statoriques active et réactive :	47
III.2.4	Expressions des tensions rotoriques:	48
III.2.5	Commande indirecte avec boucle de puissance:.....	50
III.2.6	Résultats de simulation	51
III.3	Conclusion.....	54
IV	Chapitre III: Continuité de service des convertisseurs statiques d'un système éolien basé sur une MADA.....	55
IV.1	Introduction :	55
IV.2	Différents défauts dans un convertisseur statique :	55
IV.2.1	Défaut d'ouverture d'un interrupteur.....	56
IV.2.2	Défaut de court-circuit.....	59
IV.3	Méthodes de détections des défauts :	61
IV.4	Commande tolérante aux défauts de circuit ouvert et court circuit dans les convertisseurs statiques:	63
IV.5	Topologie de convertisseur avec bras redondant:	63
IV.5.1	Détection et compensation des défauts de circuit ouvert et court circuit:..	64
IV.6	Conclusion:	76
	CONCLUSION GENERALE.....	77

Figure I 1: Principe Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I 2: Types d'éolienne.....	6
Figure I 3: Composantes de l'éolienne horizontale.....	6
Figure I 4: Types de générateurs pour la conversion de l'énergie éolienne.....	8
Figure I 5: Stator à induction	Figure I 6: Rotor bobiné.....
9	9
Figure I 7: Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.....	10
Figure I 8: Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone.....	10
Figure I 9: Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone.....	10
Figure I 10: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	11
Figure I 11: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée.....	11
Figure I 12: MADA, structure de Kramer.....	12
Figure I 13: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....	12
Figure I 14: Structure de Scherbius avec MLI.....	13
Figure I 15: La configuration de la MADA.....	14
Figure I 16: Différents types de défauts de la génératrice.....	16
Figure II 1: Tube de courant autour d'une éolienne.....	19
Figure II 2: Coefficient de puissance.....	19
Figure II 3: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	20
Figure II 4: Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.....	21
Figure II 5: Schéma de la turbine éolienne.....	22
Figure II 6: Coefficients définissant l'évolution de C_p	23
Figure II 7: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	24
Figure II 8: Schéma bloc du modèle de la turbine.....	25
Figure II 9: Diagramme de conversion de puissance.....	26
Figure II 10: Stratégies de commande de la turbine étudié.....	27
Figure II 11: Fonctionnement optimal de la turbine.....	28
Figure II 12: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	29
Figure II 13: Schéma bloc du modèle de la Turbine.....	29
Figure II 14: variation de la vitesse du vent.....	30
Figure II 15: Allure de vitesse de référence et la vitesse Mécanique.....	30
Figure II 16: Modèle triphasé de la MADA.....	32
Figure II 17: Modèle équivalent de Park de la MADA.....	34
Figure II 18: Schéma de principe de l'onduleur à MLI.....	40
Figure II 19: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse.....	41
Figure III 1: Principe de la commande vectorielle.....	44
Figure III 2: Position du référentiel par rapport au flux.....	44
Figure III 3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	49
Figure III 4: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.....	50
Figure III 5: Vitesse de rotation de la MADA avec variation de la puissance réactive.....	51
Figure III 6: La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	52
Figure III 7: Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	52
Figure III 8: Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	52
Figure III 9: Les courants rotorique abc pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	53

Figure III 10: Le flux statorque selon l'axe dq pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.....	53
Figure IV 1: Schéma synoptique des différents types de défaut dans le convertisseur statique.....	55
Figure IV 2: Défaut de circuit ouvert.....	56
Figure IV 3: Puissance active dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.	57
Figure IV 4: Puissance réactive dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrepteur..	57
Figure IV 5: Courants rotorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.	57
Figure IV 6: Les courants statorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrepteur.....	58
Figure IV 7: Vitesse de rotation dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.	58
Figure IV 8: Défaut de court circuit.	59
Figure IV 9: Puissance active dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.....	59
Figure IV 10: Puissance réactive dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.	60
Figure IV 11: Vourants rotoriques dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.	60
Figure IV 12: Courants statoriques. dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur	60
Figure IV 13: vitesse de rotation dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.	61
Figure IV 14: Tension de bus continu dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.	61
Figure IV 15: Topologie de convertisseur avec bras redondant.....	64
Figure IV 16: Le défaut de circuit ouvert dans K3.	65
Figure IV 17: Le défaut de circuit ouvert dans K3'.	66
Figure IV 18: Algorithme pour la reconfiguration en cas de circuit ouvert.....	67
Figure IV 19: La commande envoyé à l'interrupteur K3.....	68
Figure IV 20: Le temps de détection au niveau de l'interrupteur K3.	68
Figure IV 21: Compensation des défaut au niveau des courants rotorique.....	68
Figure IV 22: Compensation des défaut au niveau de la puissance active	69
Figure IV 23: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état sain	70
Figure IV 24: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état d'un défaut dans l'interrupteur K1.....	71
Figure IV 25: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état d'un défaut dans l'interrupteur K1'.....	71
Figure IV 26: le défaut de court circuit dans K1.	72
Figure IV 27: La différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} pour K1 fermée. '.....	72
Figure IV 28: le défaut de court circuit dans K1'.....	72
Figure IV 29: La différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} pour K1' fermée.	73
Figure IV 30: Algorithme pour la reconfiguration en cas de court circuit.	74
Figure IV 31: La commande envoyé à l'interrupteur K1.....	74
Figure IV 32: Le temps de détection au niveau de l'interrupteur K1.	75
Figure IV 33: Compensation des défaut au niveau des courants rotorique.....	75
Figure IV 34: Compensation des défaut au niveau des puissances active et réactive.....	75



Introduction Générale

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Cette augmentation se traduit, en réalité, par une augmentation des prix du pétrole qui représente la source la plus importante de l'énergie. La réserve mondiale du pétrole diminue de plus en plus et dans les années qui suivent il n'y aura pas assez de pétrole pour couvrir la demande. Le climat de la terre évolue vers le mauvais et les sources naturelles d'eau se raréfient. L'énergie nucléaire n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique. L'utilisation de ces sources conventionnelles est alors limitée ou n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement. Pour toutes ces raisons le monde se dirige vers les sources renouvelables, le soleil, le vent, les courants sous-marins et d'autres pour produire de l'électricité [1].

L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme, portant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde [2].

La génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne, a fait de la MADA la machine la plus attractive et spécialement à bord des éoliennes à vitesse variable et fréquence fixe (VSCF : variable speed constant frequency). En effet, le caractère très aléatoire du vent a imposé cette configuration à la plupart des constructeurs d'éoliennes. L'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire le maximum de puissance tel que le vent le permet. Le progrès des chercheurs en génie électrique qui a été fait dans ces dernières décennies, a conduit aux investigations afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité d'énergie fournie.

Dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, les convertisseurs statiques triphasés de tension sont des éléments essentiels car ils permettent de contrôler les puissances active et réactive injectées sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent.

Les défaillances d'un convertisseur statique, qu'elles proviennent des drivers de sa commande rapprochée, d'un des composants de puissance ou d'un des capteurs mis en œuvre, conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase donc des puissances injectées sur le réseau.

Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements pouvant dans certains cas mettre en danger le système. Donc pour réduire ces risques, une détection de défaut ainsi

qu'une isolation et une compensation du défaut doivent être mises en œuvre très rapidement afin que l'éolienne puisse continuer à produire dans des conditions nominales, en attendant une future opération de maintenance [3].

Ce travail est destiné à l'étude des topologies des convertisseurs statiques triphasés tolérants aux défauts et à leurs commandes associées permettant de garantir la continuité de service d'un système éolien à base d'une MADA.

Afin de pouvoir approcher cet objet, notre mémoire est organisé en quatre parties :

La première partie est consacrée à la description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie et la présentation des différentes défaillances affectant la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

La deuxième partie inclut la modélisation des différentes parties de la chaîne éolienne : Turbine, Machine asynchrone à double alimentation, L'onduleur de tension et sa stratégie de commande.

Dans la troisième partie nous présentons la commande vectorielle par l'orientation du flux statorique suivant l'axe ' d ' du repère de Park afin de contrôler la puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans la quatrième partie nous intéressons à voir les conséquences des défauts de circuit ouvert et court circuit, puis nous assurons la continuité de service par la commande tolérante aux défauts exactement la topologie de convertisseur avec bras redondant.

Chapitre I

- *Généralités sur le système éolien*

I.1 Introduction :

Pour réduire la consommation d'énergie traditionnelle ou bien non-renouvelable conduit au problème de la pollution environnementale et écologique et la détérioration de l'environnement, et d'améliorer le développement des énergies renouvelables est la clé du développement durable [5].

L'énergie éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables qui est aussi une sorte d'énergie propre à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire [6].

Ses caractéristiques remarquables sont non-polluantes et propre et il est très favorable à la protection de l'environnement.

Dans ce chapitre, on présentera des généralités sur le système éolienne ; l'état de l'art sur la turbine, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, la MADA et différents défauts qui peuvent affecter les systèmes éoliens.

I.2 Systèmes éoliens :

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (Fig.I.1). Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. Pour cette raison, on va présenter ses éléments. D'abord, il est nécessaire de choisir un site de vent à une vitesse importante et une meilleure quantité d'énergie annuelle. Pour récupérer cette énergie il y a deux capteurs intéressants : un vertical et l'autre horizontal. Le plus répandu dans la pratique, c'est le capteur horizontal. Pour que l'énergie extraite soit optimale il existe différentes techniques. Grâce à une génératrice l'énergie mécanique captée sera transformée en énergie électrique. On doit aussi tenir compte du choix de cette génératrice selon les modes de fonctionnement. Par la suite, l'énergie électrique sera injectée au réseau ou bien elle sera stockée dans un dispositif de stockage (batteries) ou bien elle sera utilisée pour le pompage de l'eau.

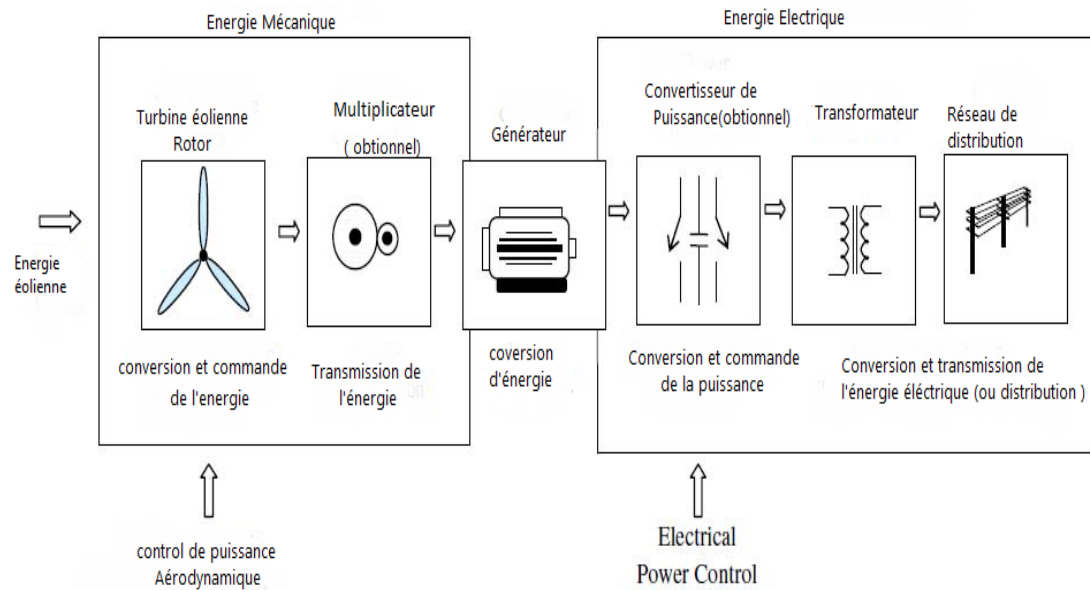


Figure I 1: Principe Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.2.1 Avantages & inconvénients de l'énergie éolienne

I.2.1.1 Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

I.2.1.2 Inconvénients :

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit: la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ✓ Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue.
- ✓ Les oiseaux : Les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles [4]

I.3 Les différents types des turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau 1.9 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIAMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

I.3.1 Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux types d'éolienne :

I.3.1.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et générateur) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [7] [8].

I.3.1.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multipales.

La voile peut être placée avant la nacelle (upwind) et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (downwind). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. La figure 1.2 montre les deux procédés [9].



a) à axe verticale,



b) à axe horizontal

Figure I 2: Types d'éolienne.

I.3.2 Composants de turbines horizontales comprennent [5]:

À l'heure actuelle, l'éolien à axe horizontal domine le marché. Les Composants de turbines horizontales sont illustrés dans la figure I.3.

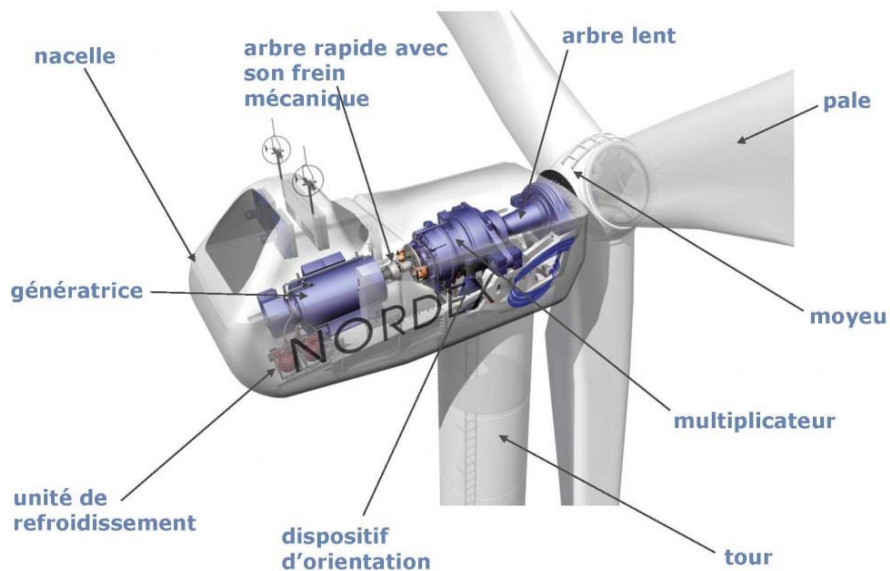


Figure I 3: Composantes de l'éolienne horizontale

I.3.2.1 Le Rotor:

La zone du générateur de vent qui accumule de l'énergie du vent est connue comme les lames qui tournent à un taux déterminé par la vitesse du vent et la conception de vos lames. Les lames sont fixées au centre, ce qui par conséquent est fixé à la base principale [10].

I.3.2.2 Les pales:

Les pales sont généralement en fibre de verre, Leur diamètre varie en fonction de la puissance désirée (entre 7m et 72m). Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor.

Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations [11].

I.3.2.3 Le multiplicateur :

C'est l'un des clés dans une éolienne à engrenage assurant la tâche à transférer la puissance de l'arbre à faible vitesse relié au rotor à l'arbre à grande vitesse connecté au générateur. Comme turbines deviennent plus grands, plus de puissance est exigée et le multiplicateur avec une capacité de charge plus élevée doivent être conçus [12].

I.3.2.4 La génératrice :

C'est un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être synchrone ou asynchrone [13].

I.3.2.5 La nacelle:

Les grandes éoliennes utilisent des moteurs électriques ou hydrauliques pour faire pivoter la nacelle face au vent [13].

I.3.2.6 Le système de refroidissement :

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

I.3.2.7 Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.4 Types de générateurs d'éoliennes :

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories (Fig.I 4) [10] :

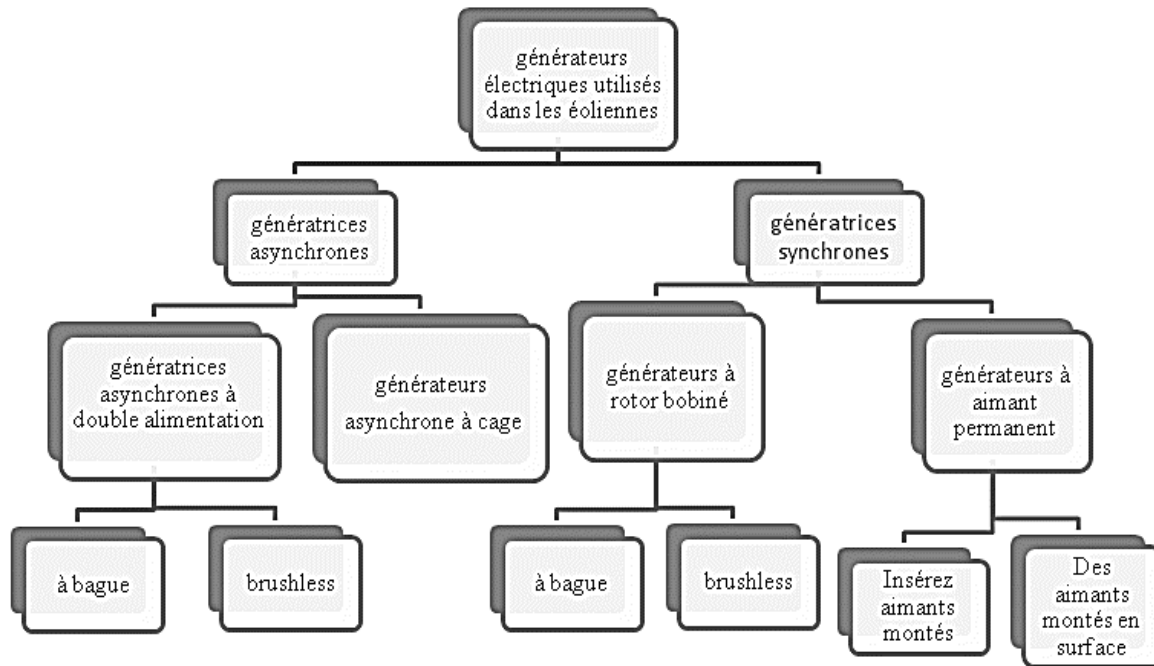


Figure I 4: Types de générateurs pour la conversion de l'énergie éolienne.

I.5 Conversion électromécanique

La production de l'énergie éolienne se base sur le principe de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique de rotation. Cela se fait grâce à la turbine à axe horizontal décrite précédemment. La conversion de l'énergie mécanique en électrique implique une génératrice couplée à la turbine.

I.5.1 Utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans la conversion électromécanique

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur). Dans ce qui suit, nous allons présenter une étude générale sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages.

I.5.2 Définition

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques (Fig.I.5) et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (Fig.I.6), cette machine peut fonctionner comme génératrice ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un onduleur [14] [15].

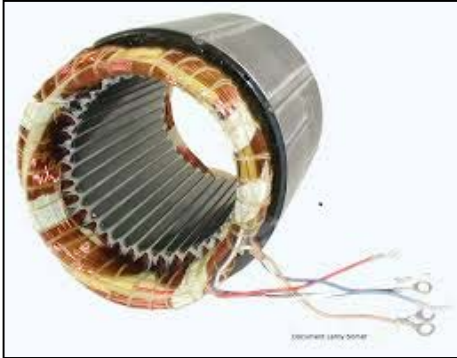


Figure I 5: Stator à induction



Figure I 6: Rotor bobiné

I.5.3 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA :

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor.

Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme en générateur, il existe quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.

Nous allons présenter successivement des différents modes de fonctionnement.

I.5.3.1 Fonctionnement en moteur hypo synchrone

La figure (I.7) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

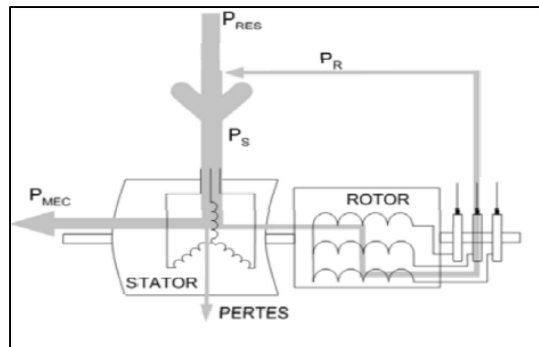


Figure I 7: Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone.

I.5.3.2 Fonctionnement en moteur hypersynchrone

La figure (I.8) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

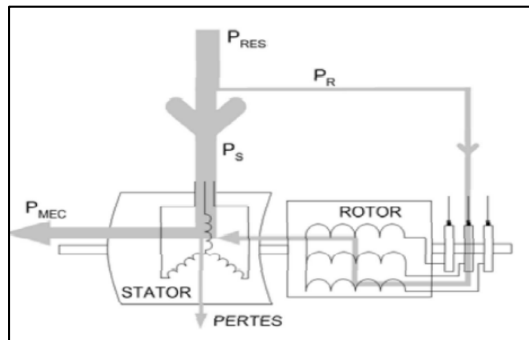


Figure I 8: Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone .

I.5.3.3 Fonctionnement en génératrice hypo synchrone :

La figure (I.9) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. Et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

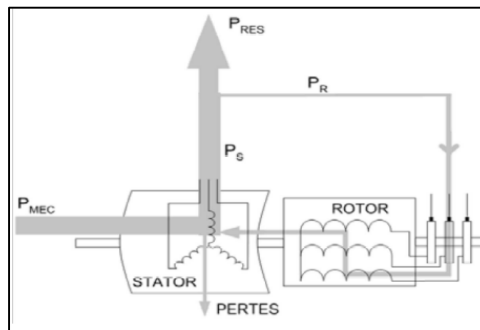


Figure I 9: Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone .

I.5.3.4 Fonctionnement en génératrice hyper synchrone :

La figure (I.10) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur en dessus de la vitesse de synchronisme [16] [17] [18].

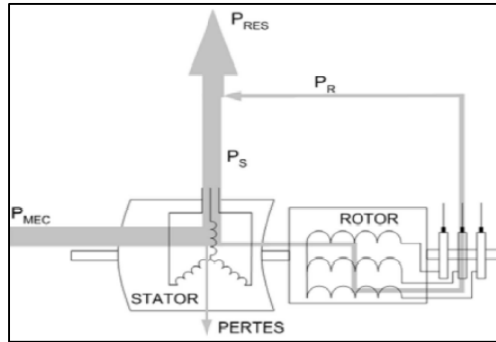


Figure I 10: Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone .

I.5.4 Différentes structures d'alimentation de la MADA

I.5.4.1 Machine asynchrone à double avec alimentation à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. (Fig.I.11). Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation de la machine.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R .

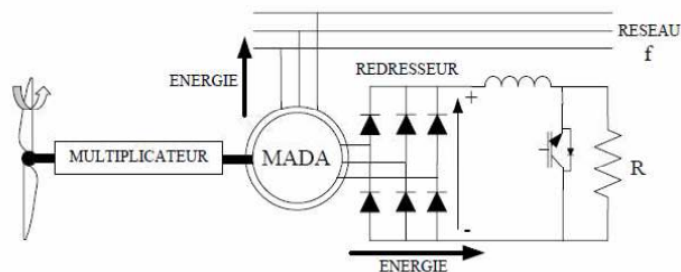


Figure I 11: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

I.1.9.2. Structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (Fig.1.12).

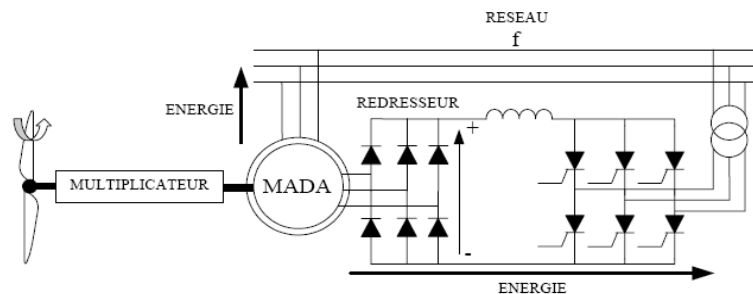


Figure I 12: MADA, structure de Kramer.

I.5.4.2 Structure Scherbius avec cycloconvertisseur :

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor, on utilise un cycloconvertisseur (Fig.I.13). L'ensemble est appelé structure Scherbius.

L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de forts composants harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance.

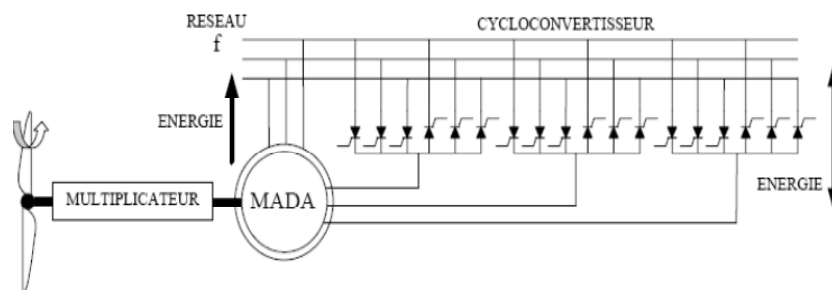


Figure I 13: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

I.5.4.3 Structure Scherbius avec convertisseur MLI :

L'utilisation de ce type de convertisseur (Fig.1.14) permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premières harmoniques non nuls vers des fréquences élevées).

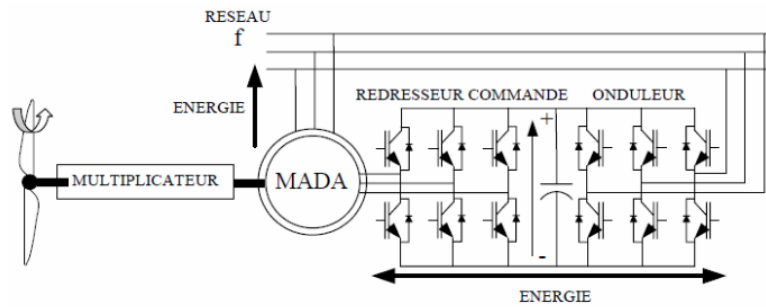


Figure I 14: Structure de Scherbius avec MLI.

I.5.5 Domaine d'applications de la MADA

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone classique et synchrone, surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [19].

I.6 Description du système éolienne :

La configuration de base de MADA utilisée dans notre travail est représentée sur la (Fig.I.15). La turbine éolienne est reliée mécaniquement au générateur asynchrone à double alimentation à travers un multiplicateur et un système d'arbre de couplage. Le générateur asynchrone à rotor bobiné est alimenté à partir de deux côtés stator et de rotor. Le stator est directement relié au réseau de distribution, tandis le rotor est alimenté par des convertisseurs de puissance (dite "back-to-back" en anglais). Ces convertisseurs côtés MADA et Réseau, notés respectivement (CCM et CCR) sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) reliés par une batterie de condensateur de liaison [13].

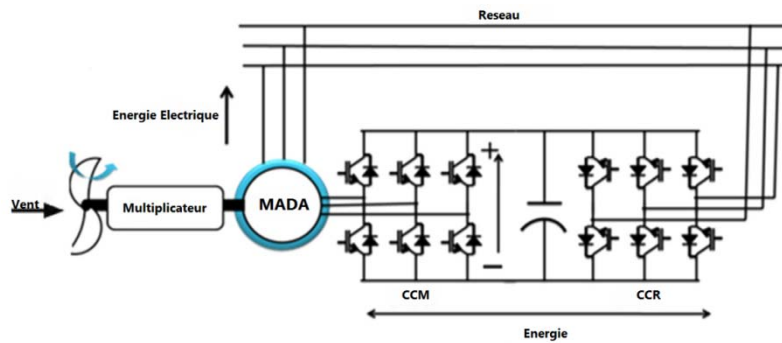


Figure I 15: La configuration de la MADA.

Les stratégies de commande ont été développées pour but d'extraire la puissance maximale du vent. Une façon de faire de turbines plus contrôlables à vitesse variable. Les turbines à vitesse variable sont devenus le type le plus dominant du début des éoliennes installées; car ils peuvent stocker une partie des fluctuations de puissance dues aux turbulences en augmentant la vitesse du rotor, de tangage des pales de rotor, ces turbines peuvent contrôler la puissance du moteur à une vitesse donnée du vent. Il existe deux principales techniques de contrôle: la commande vectorielle (CV) et la commande directe du couple (CDC) utilisé pour les applications de haute performance. Basée sur les machines asynchrones, la commande vectoriel (CV) des machines à courant alternatif est devenu la technique de contrôle la plus adoptée dans le monde entier.

I.6.1 Avantages et inconvénients

Dans les topologies d'éoliennes modernes, celles qui emploient les machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont les plus populaires en raison de leurs nombreux avantages qui sont citées par la suite [2][21] :

I.6.1.1 Avantages :

- ✓ Vitesse variable à environ $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme.
- ✓ Puissance extraite optimisée.
- ✓ Électronique de puissance dimensionné à seulement 30% de P_n .
- ✓ Connexion au réseau plus facile à gérer.
- ✓ Faible taille de convertisseur et de coût.
- ✓ Et un rendement plus élevé

I.6.1.2 Inconvénients :

- ✓ La machine à induction à double alimentation (MADA) a le célèbre inconvénient de la présence de bagues collectrices qui nécessitent des coûts d'entretien élevés et conduire à une durée de vie réduite.
- ✓ Maintenance de la boîte de vitesse et des contacts glissants.
- ✓ Système de contrôle très complexe.
- ✓ Coût d'électronique de puissance relativement élevé [2][21].

I.6.2 Différents Défaits dans les systèmes éoliens :

I.6.2.1 Défaut de pale:

Le diamètre des pales d'éoliennes devient plus grand, il est facile de conduire à des défauts directement sur les pales, comme le déséquilibre du rotor, pales et la corrosion du moyeu, fissure....[22].

I.6.2.2 Défaut de multiplicateur :

En raison de la longue durée dans des conditions de travail médiocres tels que la charge lourde, rafales ou de la corrosion de la poussière, les échecs de la boîte de vitesses de l'éolienne sont diverses, telles que l'arbre déséquilibre, désalignement arbre, les dommages de l'arbre, des dommages à billes, des dommages aux engrenages, arbre cassé, fuite d'huile, température d'huile élevée et une mauvaise lubrification, etc..... [23]

I.6.2.3 Défaut au niveau des convertisseurs statiques :

Le convertisseur de fréquence contient divers et nombreux composants électroniques; Ainsi, les défaillances sont variées et sont pour la plupart des courts-circuits ou circuits ouvertes des résistances, des condensateurs et des interrupteurs de puissance.

Les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) sont des commutateurs de puissance populaires dans les convertisseurs de fréquence d'éoliennes [54].

I.6.2.4 Défaut de la génératrice :

La machine asynchrone à rotor bobiné peut présenter différents types de défauts. La figure (I.16) suivante représente les défauts qui peuvent affecter le fonctionnement de la machine asynchrone [24].

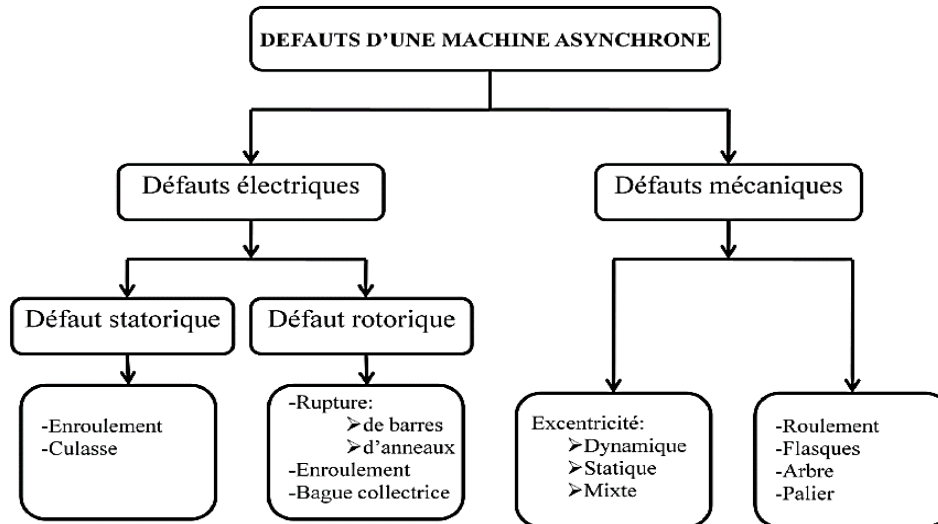


Figure I 16: Différents types de défauts de la génératrice.

I.6.2.5 Les défauts actionneurs :

Les défauts actionneurs agissent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système [24], [26].

I.6.2.6 Défauts capteurs :

Le défaut capteur engendre une mauvaise image de l'état physique du système. Il existe deux types de défauts capteurs qui sont le défaut capteur partiel et le défaut capteur total [25] [24] [26].

I.6.2.7 Les défauts composants ou systèmes

Ce type de défaut provient du système lui-même, souvent les défauts n'appartiennent pas à un défaut capteur ou actionneur. Un défaut procédé résulte de la casse d'un composant du système et réduit les capacités de celui-ci à effectuer une tâche [24] [26].

I.7 Conclusion :

En premier lieu, ce chapitre est consacré aux généralités sur le système éolien. En second lieu, nous avons mentionné les Types de générateurs pour la conversion de l'énergie éolienne

et en particulier nous avons étudiées les modes de fonctionnement; les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation qui est proposée comme un bon compromis entre la plage de variation de vitesse. En dernier lieu, nous avons présenté les différentes défaillances affectant la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre II

- ***Modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA***

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons expliquer le fonctionnement général d'une éolienne, et on expliquera le phénomène de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz) et aussi on va citer les différentes zones de fonctionnements de l'éolienne à vitesse variable.

Dans ce chapitre, nous allons présenter :

- ✓ La modélisation du Système de conversion d'énergie éolienne : la turbine, La machine asynchrone à double alimentation, Son alimentation (Onduleur) et sa stratégie de commande.

II.2 Energie cinétique du vent - conversion en énergie mécanique

II.2.1 Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Figure II.1) 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 V , soit $\frac{(V_1+V_2)}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \rho S \frac{(V_1+V_2)}{2} \quad (\text{II.1})$$

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) :

$$P_m = m \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (\text{II.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.1):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot \left(\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \right) \quad (\text{II.3})$$

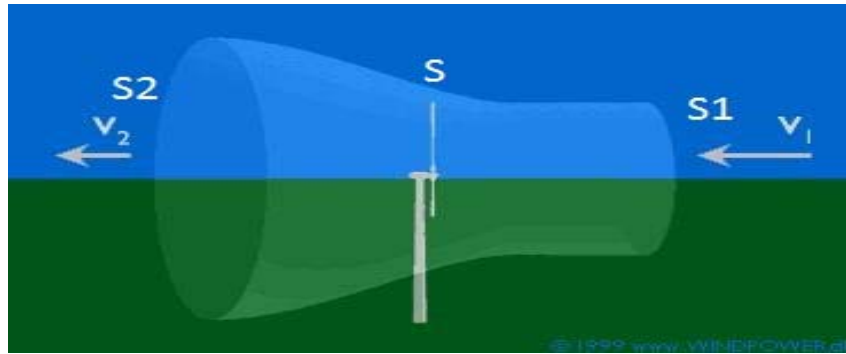


Figure II 1 Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \quad (\text{II.5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure.II.2), on s'aperçoit que le ratio (P_m/P_{mt}) appelé aussi coefficient de puissance C_P présente un maximum de $16/27$ est **0,59**. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

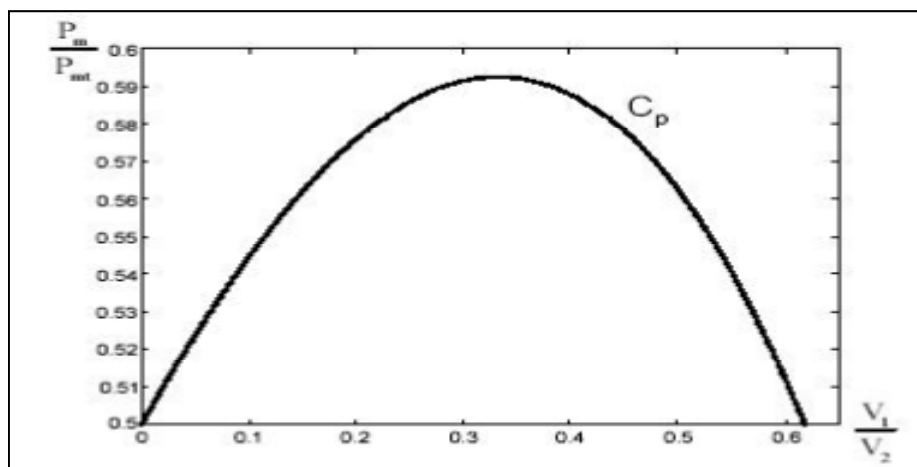


Figure II 2: Coefficient de puissance [27].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance (fig II.2) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 80m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

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 (fig II.3) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3m/s [27].

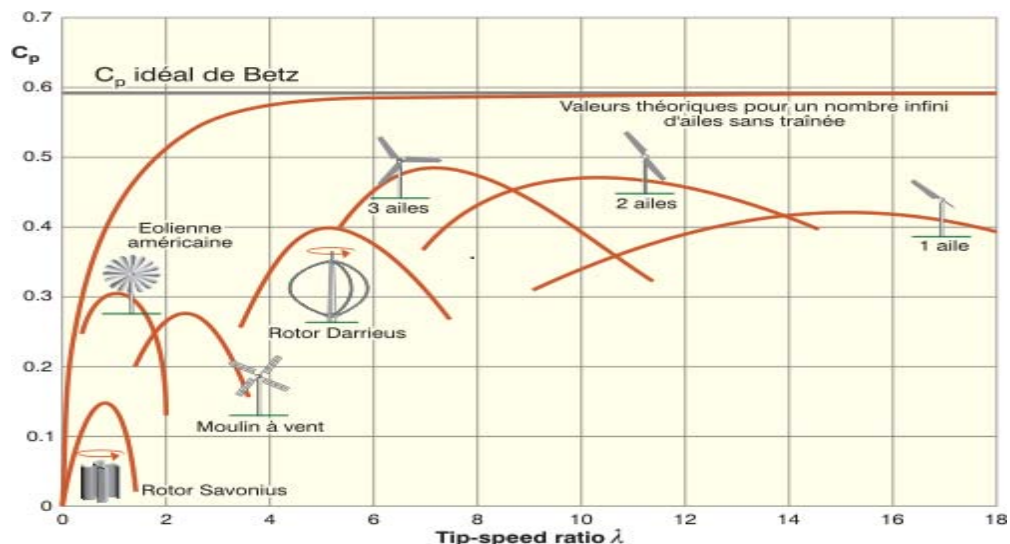


Figure II 3: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

II.2.2 Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable :

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . Cette dernière est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale de l'éolienne [28].

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre (4) zones présenté dans la (Fig II.4) [11] [29].

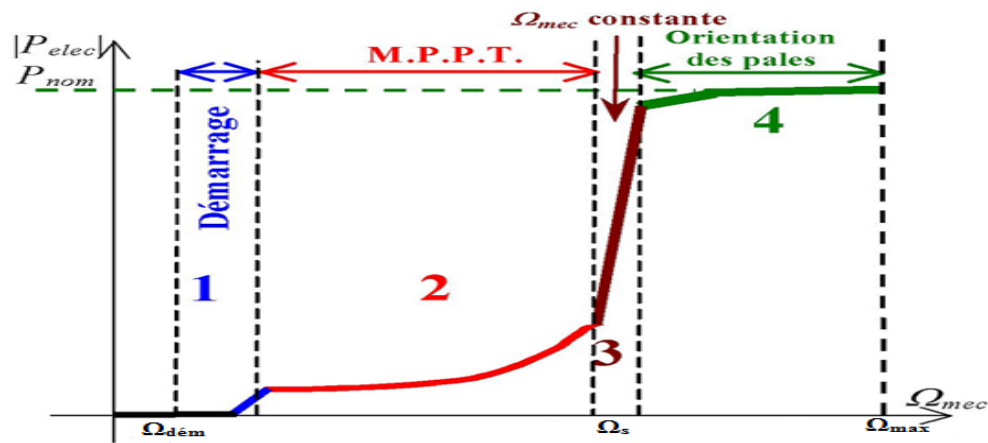


Figure II 4:Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse de démarrage Ω_{dem} . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. Au-delà de la vitesse Ω_{max} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

II.3 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable :

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent [27].

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G , le schéma de la turbine éolienne est illustrée dans la Figure (II.5)

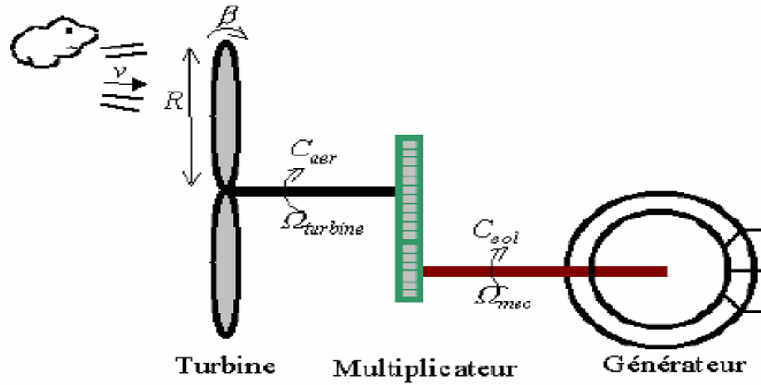


Figure II 5:Schéma de la turbine éolienne.

La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [28] [31]:

$$P_{aéro} = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.6)$$

Avec:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_1} \quad (II.7)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_{mec}}{G \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.8)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par [1]:

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.9)$$

Avec:

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle d'inclinaison des pales [°].

ρ : Densité de l'air.

R : Longueur de la pale.

V_1 : Vitesse du vent.

Ω_{turbine} : Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

G : Rapport du multiplicateur.

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés. L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [6] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II.10})$$

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

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.11})$$

Les six coefficients définis, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dépendent de la turbine considérée sont présenté dans le tableau suivants [6]:

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

Figure II 6: Coefficients définissant l'évolution de C_p .

Le Tableau II.6 représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (II.10), en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal λ_{opt} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale [31]. Cette figure montre le λ_{opt} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette

condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{opt}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (II.7).

Sur cette figure, plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt} = 8.1$, $C_{p \max} = 0.48$ et $\beta = 0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée [15].

Nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p (Fig II.7); et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

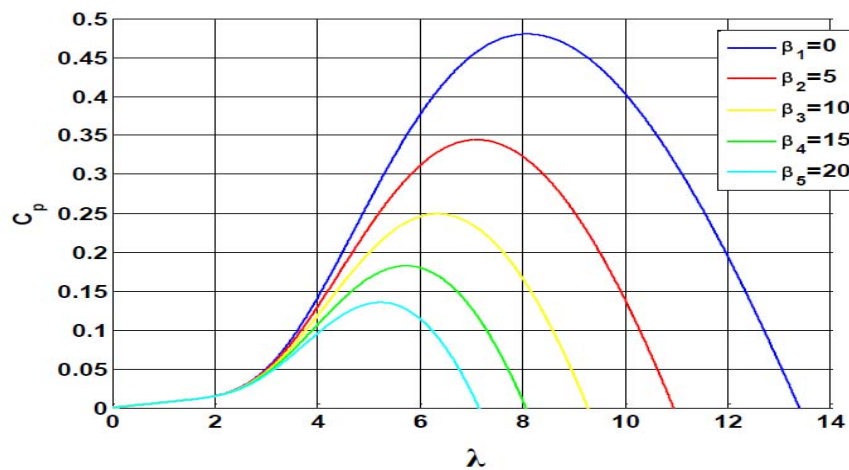


Figure II 7: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

II.3.1 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Fig II.5). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (II.11)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.12)$$

II.3.2 Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle

mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [30].

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \quad (\text{II.13})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.15})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec: } f = \frac{f_{\text{turbine}}}{G^2} + f_g \quad (\text{II.17})$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté par la Figure (II.8).

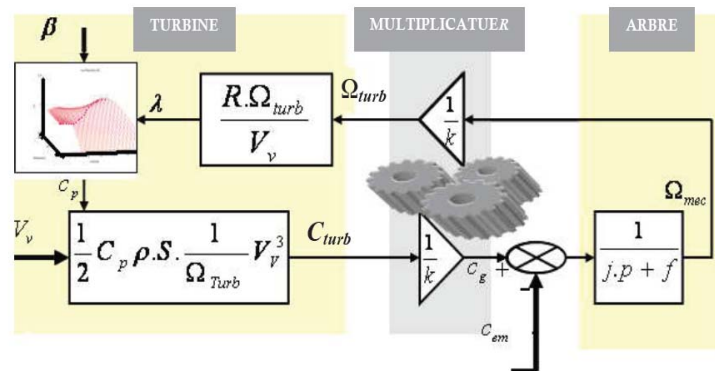


Figure II 8:Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.4 Bilan de puissance :

L'équation (II.6) quantifie la puissance captée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse λ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser la puissance électrique générée (le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aér}$ diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est converti directement en puissance électrique (Figure II.9).

$$P_{elec} = P_{aér} - P_{ertes} \quad (II.18)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique (C_{mec}) et la vitesse (Ω_{mec}). $P_{elec} = P_{aér} - P_{ertes}$

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.19)$$

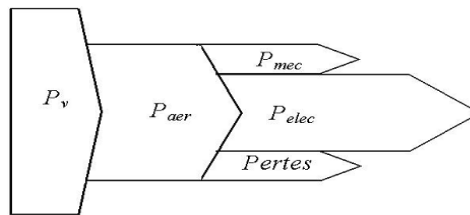


Figure II 9: Diagramme de conversion de puissance.

Dans cette partie, nous présentons l'une des différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [29]:

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.



Figure II 10: Stratégies de commande de la turbine étudiée.

Dans notre mémoire, nous sommes intéressés au contrôle du couple électromagnétique par asservissement de la vitesse mécanique en utilisant le simple régulateur classique PI. La synthèse de ce régulateur est détaillée dans (l'annexe B).

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em\,ref} \quad (II.20)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Comme a été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (II.21)$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence

Le couple électromagnétique de référence $C_{em\,ref}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{em\,ref} = G_{PI} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I.22)$$

G_{PI} : est la fonction de transfert du régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine\ ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G. (\Omega_{turbine\ ref}) \tag{II.23}$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{Cp\ max}$ (à β constant et égal à 0°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p .figure (II.11).

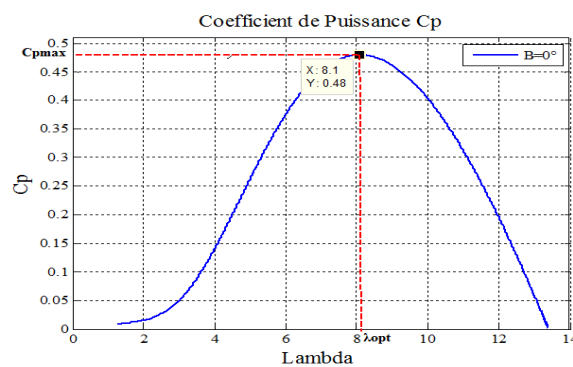


Figure II 11: Fonctionnement optimal de la turbine.

Elle est obtenue à partir de l'inversion de l'équation (II.7):

$$\Omega_{turbine\ ref} = \frac{\lambda_{Cp\ max} . V_l}{R} \tag{II.24}$$

II.4.1 Conception du correcteur de vitesse :

L'action de correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence,
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation se simplifie sous forme du schéma blocs présenté dans la figure (II.12).

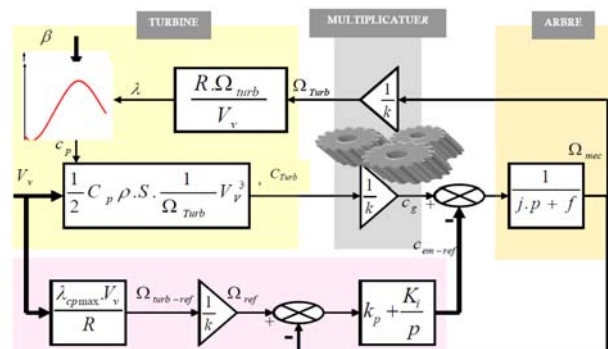


Figure II 12: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

Différentes technologies de correcteur peuvent être considérer pour l'asservissement de vitesse.

II.5 Résultats de simulation :

La simulation du modèle de la turbine ainsi que toute la structure de commande est faite sous l'environnement Matlab/Simulink (figure II.13). Pour cela on a utilisé une turbine de 10KW dont les paramètres sont présentés en annexe A.

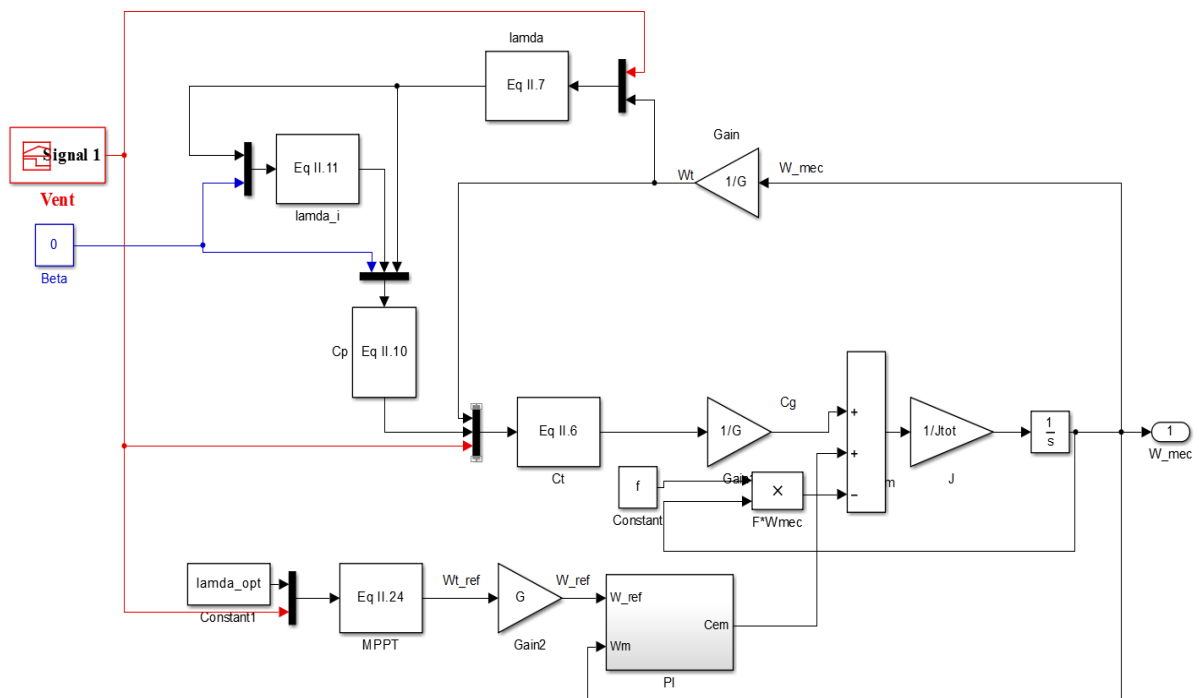


Figure II 13: Schéma bloc du modèle de la Turbine avec MPPT.

Sur un laps temps de 10 secondes, la figure (II.14) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne dont la valeur moyenne est autour de (6.5m/s). Cette vitesse est estimée en Algérie et en particulier a l'ouest du pays [32].

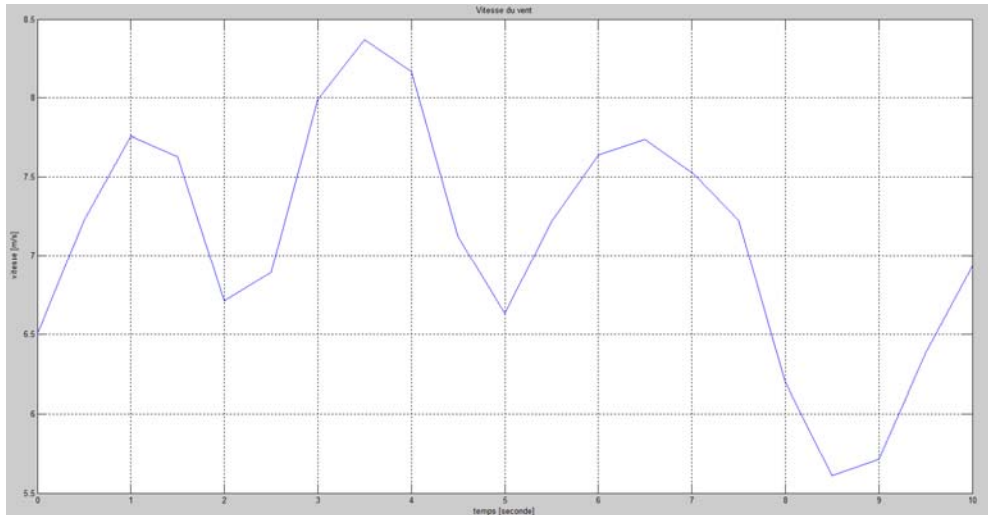


Figure II 14: variation de la vitesse du vent.

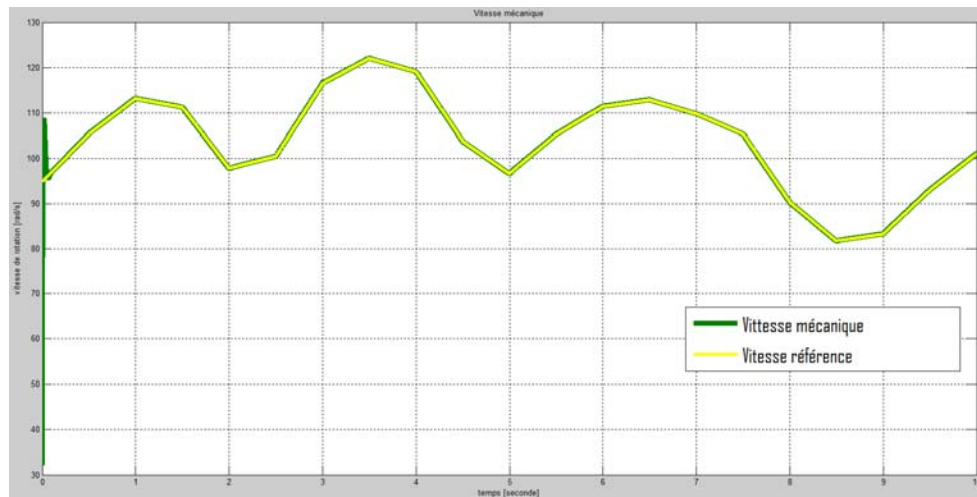


Figure II 15: Allure de vitesse de référence et la vitesse Mécanique.

La figure (II.15) montre l'allure de la vitesse mécanique obtenue par le profil du vent représenté sur la Figure (II.14). On constate que la vitesse mécanique suit à chaque instant sa valeur de référence, ce qui montre le bon choix des coefficients du régulateur PI.

Les résultats de simulation montrent que la variation de la vitesse mécanique (du rotor) (Fig II.15) à la même allure que la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent.

II.6 Modélisation de machine asynchrone double alimentation :

II.6.1 Hypothèses du travail

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors

nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices. Plus le nombre de ces hypothèses est grand, plus simple et moins précis sera le modèle.

- ✓ On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- ✓ On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- ✓ Il est considéré négligeables l'effet de la température (Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température), le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault.
- ✓ Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures. On considère que la machine fonctionne en régime équilibré. et est considérée bipolaire ;
- ✓ On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques. [33]

II.6.2 Modèle de la MADA dans le plan riphassé abc

Dans ces conditions, les équations des circuits électriques font intervenir des inductances propres et mutuelles permettant de définir les flux en fonction des courants. Elles se présentent naturellement sous forme matricielle.

II.6.2.1 Représentation schématique des enroulements

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (figure II.16). Les phases rotoriques ne sont pas court-circuitées sur elles même. θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase 'a' statorique et la phase 'a' rotorique.

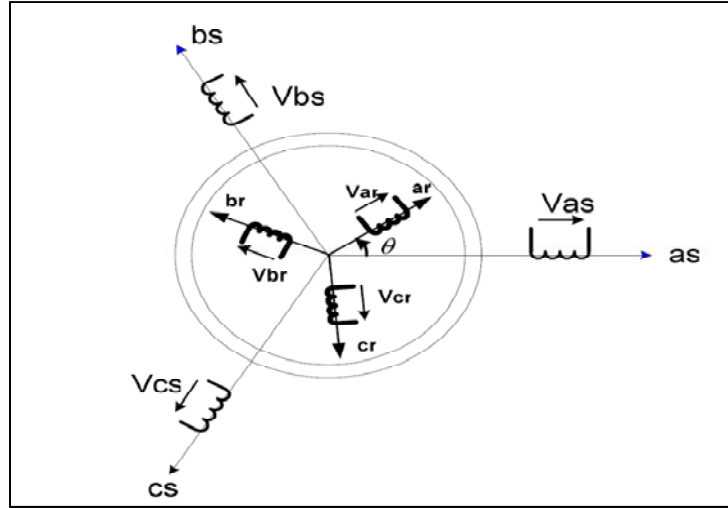


Figure II 16: Modèle triphasé de la MADA.

II.6.2.2 Equations de la machine

A. Equations électriques et magnétiques :

➤ Equations des tensions :

D'après la loi de Faraday, on a :

$$v = R_i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.25})$$

De là, on déduit celle des phases statoriques et rotoriques sous forme matricielle (simple et condensée) :

- au niveau du stator :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[v_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.26})$$

- Au niveau du rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (\text{II.27})$$

Avec :

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} Les tensions simples triphasées au stator ;

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} Les courants statoriques ;

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$ Les flux propres au stator ;

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} Les tensions simples triphasées au rotor ;

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} Les courants rotoriques ;

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi$ Les flux propres au rotor ;

R_s La résistance des enroulements statoriques ;

R_r La résistance des enroulements rotoriques.

➤ **Equations des flux :**

On définit le vecteur flux par :

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Les vecteurs courants par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne. La forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} = l_s \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} = l_r \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$$[M_{sr}] = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

l_s : L'inductance propre d'une phase statorique ;

m_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ($m_s = -\frac{l_s}{2}$) ;

l_r : L'inductance propre d'une phase rotorique ;

m_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotorique ($m_r = -\frac{l_r}{2}$);

M_{max} : Le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

B. Équations mécaniques :

L'équation fondamentale de la mécanique qui lie le couple électromagnétique et la vitesse de rotation est:

$$C_{em} = \frac{1}{2} P [i_{abc}]^2 \frac{\partial [M_{sr}(\theta)]}{\partial \theta} [i_{ABC}] \quad (\text{II.34})$$

$$C_{em} - C_r = J \frac{\partial \Omega}{\partial t} + f \Omega$$

II.6.3 Modèle de la MADA dans le plan dq :

II.6.3.1 Introduction :

Les modèles des machines électriques sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes $dq, \alpha\beta$

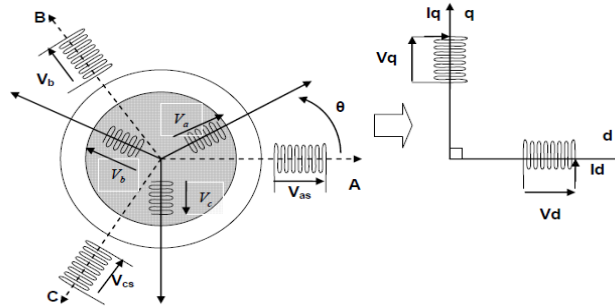


Figure II 17: Modèle équivalent de Park de la MADA.

II.6.3.2 Transformation diphasée

La transformation de Park, définie par la matrice de rotation $[P(\Psi)]$, permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, o) . Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par :

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

$$[P(\Psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos\left(\Psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\Psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\Psi) & -\sin\left(\Psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\Psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$\Psi = \theta_s$ Pour les grandeurs statoriques ;

$\Psi = \theta_r$ Pour les grandeurs rotoriques.

II.6.3.3 Application de la transformation aux équations de la MADA

Le rotor et le stator de la machine, alors désignés ‘machine de Park’, tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants soient liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires :

A. Equations électriques et magnétiques

➤ Equations des tensions

$$\begin{cases} [v_{sdqo}] = [R_s][i_{sdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{sdqo}] + \omega_s[\lambda][\phi_{sdqo}] \\ [v_{rdqo}] = [R_r][i_{rdqo}] + \frac{d}{dt}[\phi_{rdqo}] + \omega_r[\lambda][\phi_{rdqo}] \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \\ v_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\phi_{so}}{dt} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd} \\ v_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d\phi_{ro}}{dt} \\ \omega = \omega_s - \omega_r = p\Omega \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

$$\text{D'où} \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \text{ et } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.38})$$

$$\theta = \theta_s - \theta_r \text{ Cela implique que } \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.39})$$

et :

$[v_{sdqo}]$ est le vecteur tension statorique dans le repère de Park ;

$[i_{sdqo}]$ est le vecteur courant statorique dans le repère de Park ;

$[\phi_{sdqo}]$ est le vecteur flux statorique dans le repère de Park ;

$[v_{rdqo}]$ est le vecteur tension rotorique dans le repère de Park ;

$[i_{rdqo}]$ est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park ;

$[\phi_{rdqo}]$ est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

➤ Equations des flux

La transformation de Park nous permet d'établir la relation entre les flux d'axes d, q, o et les flux d'axes a, b, c par l'intermédiaire de la matrice de rotation $[P(\Psi)]$.

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][\phi_{sabc}] \quad (\text{II.40})$$

$$\text{et } [\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][\phi_{rabc}] \quad (\text{II.41})$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent :

- au stator :

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)]([L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]) \quad (\text{II.42})$$

$$[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (\text{II.43})$$

- au rotor :

$$[\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)]([L_r][i_{rabc}] + [M_{sr}][i_{sabc}]) \quad (\text{II.44})$$

Soit :

$$[\phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] + [P(\theta_r)][M_{sr}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{sdqo}] \quad (\text{II.45})$$

On ne démontre que :

$$[P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

$$[P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

$$[P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1} = \frac{3M_{sr}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

Le nombre de paramètres magnétiques peut être réduit. On obtient ainsi :

$L_s = l_s - m_s$: est l'inductance cyclique du stator ;

$L_r = l_r - m_r$: est l'inductance cyclique du rotor ;

$M = \frac{3}{2}M_{sr}$: est l'inductance cyclique entre stator et rotor ;

$L_{so} = l_s + 2m_s$: est l'inductance homopolaire statorique ;

$L_{ro} = l_r + 2m_r$: est l'inductance homopolaire rotorique.

Ainsi, l'expression des flux dans le repère de Park prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{so} = L_{so} i_{so} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \\ \phi_{ro} = L_{ro} i_{sro} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Les systèmes d'équations peuvent ainsi se mettre sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \phi_{sdqo} \\ \phi_{rdqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdqo} \\ i_{rdqo} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

Les courants statoriques et rotoriques sur les axes d et q peuvent être déduits à partir des relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

B) Equations mécaniques

L'équation fondamentale de la mécanique qui lie le couple électromagnétique et la vitesse de rotation est:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (\text{II.53})$$

$$\text{Avec } \Omega_{mec} = \frac{\omega}{p}$$

J : Le moment d'inertie du rotor.

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

II.6.3.4 Choix du référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axes dq qui dépendent des objectifs de l'application.

A) Référentiel lié au stator

Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.54})$$

Les équations électriques prennent alors la forme suivante :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Remarque : Ce référentiel est préférable pour l'étude des grandeurs rotoriques.

B) Référentiel lié au rotor

Il se traduit par les conditions suivantes :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d\theta_s}{dt} = p\Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II.56})$$

Les équations des tensions deviennent alors :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_{rs} \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

Remarque : Ce référentiel est préférable pour l'étude des grandeurs statoriques.

C) Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - p\Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II.58})$$

Remarque : Ce choix est préférable pour l'étude de la commande où on a une orientation du flux, et ne résume aucune simplification.

II.6.3.5 L'expression des Puissance et du couple :

Dans le cas général, la puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques s'exprime dans le repère triphasé comme suite:

$$P_a = [v_{sabc}]^T [i_{sabc}] + [v_{rabc}]^T [i_{rabc}] \quad (\text{II.59})$$

Dans le repère de Park:

$$P_a = [v_{sdqo}]^T [i_{sdqo}] + [v_{rdqo}]^T [i_{rdqo}] \quad (\text{II.60})$$

Remplaçant les tensions par leurs expressions, on trouve:

$$P_a = \underbrace{[R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2)]}_{\text{Puissance dissipée}} + \underbrace{[i_{sd} \frac{d\phi_{sd}}{dt} + i_{rd} \frac{d\phi_{sq}}{dt} + i_{rd} \frac{d\phi_{rd}}{dt} + i_{rq} \frac{d\phi_{rq}}{dt}]}_{\text{Échanges de puissance magnétique}} + \underbrace{[(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd})\omega_{sp} + (\phi_{rd}i_{rq} - \phi_{rq}i_{rd})\omega_{rp}]}_{\text{Puissance mécanique}} \quad (II.61)$$

✚ Le premier terme: représente la puissance dissipée par effet joule.

✚ Le deuxième terme: représente les échanges de puissance magnétique entre les enroulements.

✚ Le troisième terme: représente la puissance mécanique regroupant l'ensemble de termes liés aux vitesses angulaires.

La puissance mécanique est égale à:

$$P_{mec} = (\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd})(\omega_{sp} - \omega_{rp}) \quad (II.62)$$

La vitesse $\omega_{sp} - \omega_{rp}$ est égale à la vitesse de rotation électrique du rotor $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

Quel que soit le référentiel choisi.

$$P_{mec} = C_{em}\Omega = C_{em} \frac{\omega}{p} \quad (II.63)$$

On trouve l'expression scalaire du couple électromagnétique suivante:

$$C_{em} = p(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \Rightarrow C_{em} = p(\phi_s \wedge i_s) \quad (II.64)$$

Des manipulations faites sur l'équation fondamentale du couple et les expressions du flux conduisent à l'établissement d'autres expressions du couple qui seront de point de départ dans la recherche d'une stratégie de sa commande.

$$\begin{aligned} C_{em} &= p(\phi_{rq}i_{rd} - \phi_r i_{rq}) \\ C_{em} &= pM_{sr}(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \\ C_{em} &= p \frac{M_{sr}}{L_s} (\phi_{sq}i_{rd} - \phi_{sd}i_{rq}) \\ C_{em} &= p \frac{M_{sr}}{L_s} (\phi_{rd}i_{sq} - \phi_{rq}i_{sd}) \\ C_{em} &= p \frac{1-\partial}{\partial M_{sr}} (\phi_{rd}\phi_{sq} - \phi_{rq}\phi_{sd}) \end{aligned} \quad (II.65)$$

II.7 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé « côté rotor »

L'onduleur de tension triphasé utilisé dans ce travail est celui de la figure (II.18). Si on désigne par « F » la fonction de connexion ou « F1 » désigne l'état de l'interrupteur T_i du demi bras en haut et « F0 » l'état de l'interrupteur T'_i du demi bras en bas, on peut alors généraliser le modèle de commande pour l'onduleur triphasé [34].

$$F_{i1} = 1 \text{ Quand } T_i \text{ est fermé} \quad F_{i1} = 0 \text{ (} T_i \text{ ouvert)}$$

$$F_{i0} = -1 \text{ Quand } T'_i \text{ est fermé} \quad F_{i0} = 0 \text{ (} T'_i \text{ ouvert)}$$

$$\text{Soit : } B_k = F_{i1} + F_{i0} \quad i = 1,2,3$$

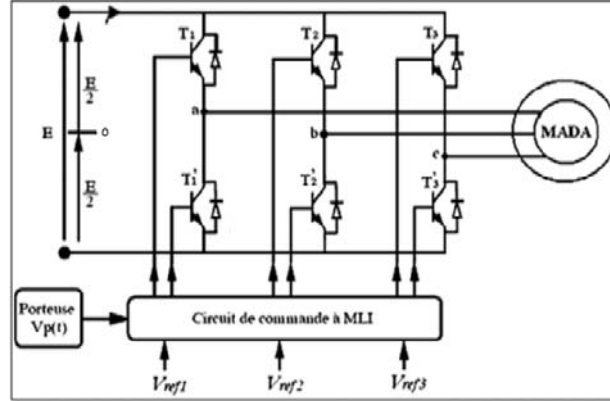


Figure II 18: Schéma de principe de l'onduleur à MLI.

A. Calcul des tensions des nœuds :

Les tensions des nœuds a , b , c par rapport au point milieu fictif « 0 » de l'onduleur s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{U_c}{2} (F_{11} + F_{10}) = \frac{U_c}{2} B_1 \\ V_{bo} = \frac{U_c}{2} (F_{21} + F_{20}) = \frac{U_c}{2} B_2 \\ V_{co} = \frac{U_c}{2} (F_{31} + F_{30}) = \frac{U_c}{2} B_3 \end{cases} \quad (\text{II.66})$$

B. Calcul des tensions simples :

Pour obtenir les valeurs instantanées de ces tensions on part des tensions des nœuds V_{a0} , V_{b0} , V_{c0} on aura donc :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_b = \frac{1}{3} (-V_{a0} + 2V_{b0} - V_{c0}) \\ V_c = \frac{1}{3} (-V_{a0} - V_{b0} + 2V_{c0}) \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

Les tensions V_a, V_b, V_c ont nécessairement une somme nulle.

L'équation (II.31) peut s'exprimer au moyen des fonctions de connexions comme :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} \frac{U_c}{2} \quad (\text{II.68})$$

C. Calcul des tensions composées :

Les tensions composées de l'onduleur triphasé sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} = \frac{U_c}{2} (B_1 - B_2) \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} = \frac{U_c}{2} (B_2 - B_3) \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} = \frac{U_c}{2} (B_3 - B_1) \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

II.7.1 Stratégie de commande

Le principe de la stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés, Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (FigII.19) [35].

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

❖ L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f_{ref} :

$$m = \frac{f_{ref}}{f_p} \quad (\text{II.70})$$

❖ Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (V_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (\text{II.71})$$

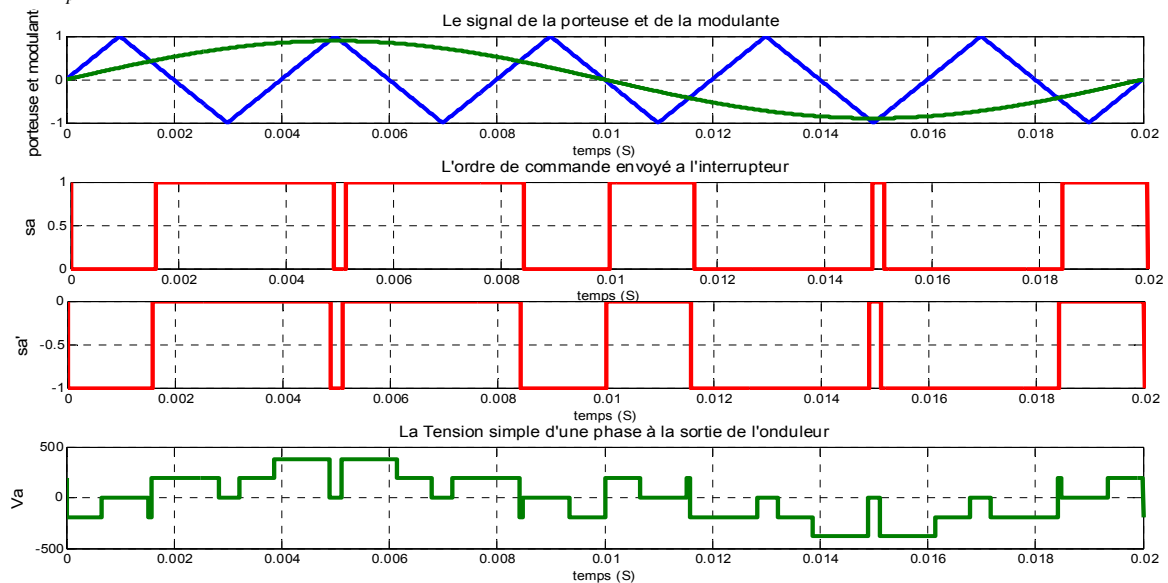


Figure II 19: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), la régulation mécanique de la puissance d'une éolienne a été décrite.

Nous avons présenté la modélisation de la turbine éolienne et leurs zones de fonctionnement, et le modèle mathématique de la génératrice asynchrone à double alimentation à l'aide de la transformation de Park. Nous avons modélisé aussi l'alimentation de cette machine (l'onduleur de tension), et sa stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Chapitre III

- ***Commande vectorielle de la MADA.***

III.1 Introduction :

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facilement commandable. Pour aboutir à un contrôle du même type que celui de la machine à courant continu, Blaschke avait donné naissance en 1971 aux bases de la nouvelle théorie de commande des machines à courant alternatif dite commande par flux orienté ou commande vectorielle [36].

Dans ce chapitre, nous allons présenter la commande vectorielle par l'orientation du flux statorique suivant l'axe 'd' du repère de Park afin de contrôler la puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation.

Ensuite, nous présenterons les résultats de simulation qui permettent d'analyser le comportement des grandeurs de la MADA intégrée dans le système éolien, sous environnement MATLAB/Simulink.

III.2 Principe de la commande vectorielle :

La technique du contrôle vectoriel repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) (Fig III.1). Pour le cas du contrôle vectoriel de la MADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau [36]. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est callé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur).

Dans ce travail, Il s'agit donc de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) (Fig III.2), ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par la composante quadrature [27].

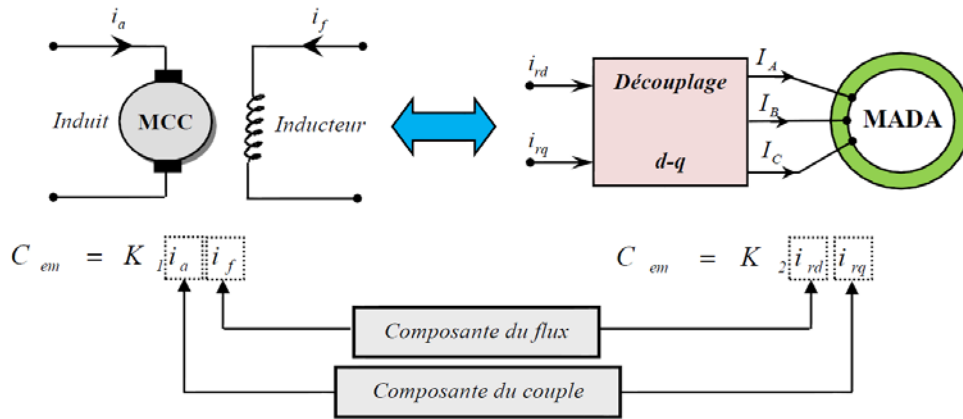


Figure III 1: Principe de la commande vectorielle.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu:

$$\begin{cases} C_{em} = K_t \varphi_f . I_a \\ \varphi_f = k . I_f \end{cases} \quad (III.1)$$

Couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation est le suivant :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (III.2)$$

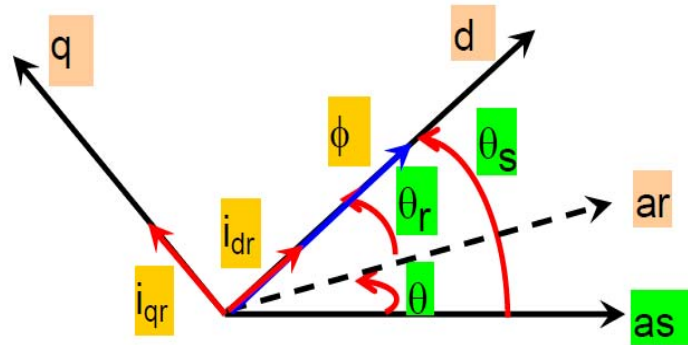


Figure III 2: Position du référentiel par rapport au flux.

III.2.1 Procédé d'orientation du flux:

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe «d». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes[11]:

III.2.1.1 Orientation du flux rotorique:

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

III.2.1.2 Orientation du flux statorique:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

III.2.1.3 Orientation du flux magnétisant:

$$\begin{cases} \Phi_d = \Phi \\ \Phi_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Dans le cadre de cette thèse, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d, q) suivant le flux statorique. Cette dernière se décompose en trois parties:

- ❖ Le contrôle du flux
- ❖ Le contrôle des courants statoriques
- ❖ Le découplage ou compensation.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont annulées.

III.2.2 Modèle de la MADA à flux statorique orienté:

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe «d» du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine[2].

Nous rappelons le système d'équations différentielles électrique et magnétique décrivant la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant qui est donné dans les systèmes d'équation (II. 37), (II. 49) et (II.50).

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine asynchrone à double alimentation. On oriente le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Φ_s .

Ainsi:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Les systèmes d'équation (II. 37), (II. 49) et (II.50) peuvent se simplifier sous la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante[2], [11]:

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = -P \frac{M_{sr}}{L_s} \Phi_s i_{rq} \quad (\text{III.10})$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (III.10) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique i_{rq} en quadrature.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique de d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques.

III.2.3 Expressions des puissances statoriques active et réactive :

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P = v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq} \\ Q = v_{sq}i_{sd} - v_{sd}i_{sq} \end{cases} \quad (III.11)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P = v_s i_{sq} \\ Q = v_s i_{sd} \end{cases} \quad (III.12)$$

Les puissances active P et réactive Q sont donc en fonction des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (III.13)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve:

$$\begin{cases} P = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (III.14)$$

Il ressort de l'expression (III.14) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe «q», et la puissance réactive sera proportionnelle au courant rotorique d'axe «d» à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ imposée par le réseau [2].

III.2.4 Expressions des tensions rotoriques:

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (III.13), on obtient:

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (III.15)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques, on trouve:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.16)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.17)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, il est possible d'établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. En examinant les équations (III.14) et (III.17), on peut imaginer le schéma bloc de la MADA qui est le système à réguler ; comportant en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives engendrées (Fig III.3).

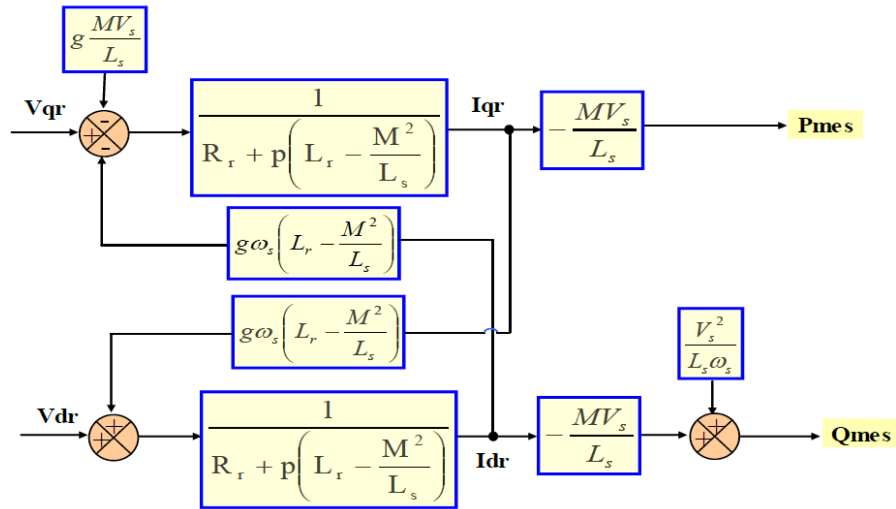


Figure III 3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Avec:

V_{rd} et V_{rq} : Les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'expression $\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature

Son influence entre les deux axes reste minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Le terme $g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car il entraîne une erreur de traînage.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe «q» rotorique et la puissance active pour l'axe «d» rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal[39][8].

Ainsi, il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [37] [38]:

- ❖ La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée **méthode directe**, car les régulateurs de puissances contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- ❖ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode, appelée **méthode indirecte**, découle directement des équations (III.14) et (III.17).

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple. Cependant, elle présente plus de perturbations entre les deux puissances. La méthode indirecte quant à elle, a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants, pour cette raison on s'intéresse avec la méthode indirecte (commande avec boucle de puissance).

III.2.5 Commande indirecte avec boucle de puissance:

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante [2].

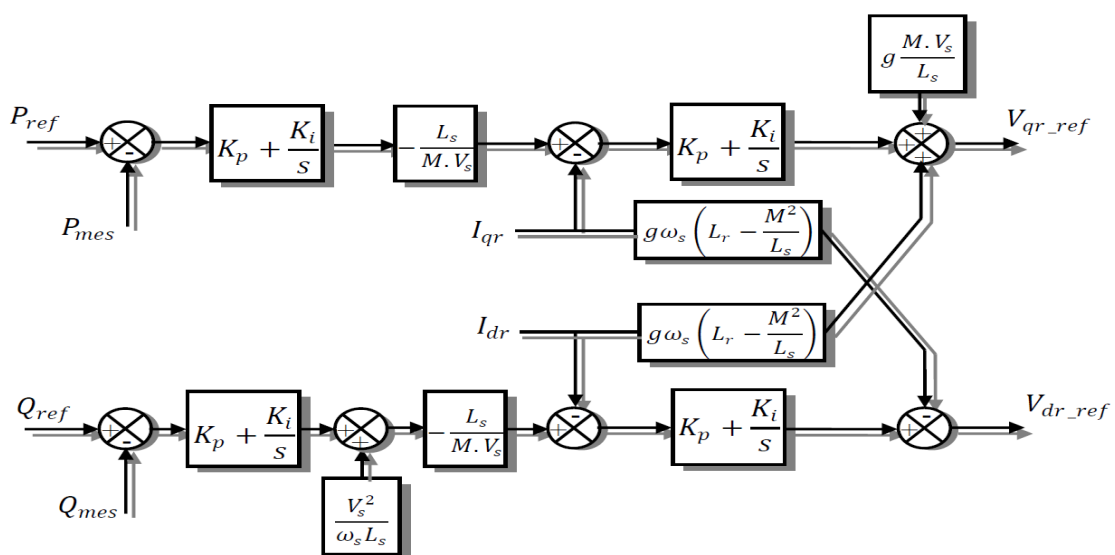


Figure III 4: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleur robustesse fasse aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. La synthèse des ces régulateurs est détaillée dans (l'annexe C).

III.2.6 Résultats de simulation

pour évaluer et tester la méthode de la commande indirecte des puissances actives et réactives par des régulateurs PI, une étude de simulation à été effectuée sous l'environnement MATLAB utilisant la méthode d'intégration de Bougacki-Shampine (ode3) avec un pas de calcul de $10^{-5}s$, les résultats de simulation sont effectués pour une variation de la référence de la puissance réactive et une vitesse du vent constante, puis pour une puissance réactive de référence nulle et on change la référence de la vitesse du vent comme il est présenté par le tableau suivant :

$T(s)$	0	1.5	2.5	3.5	4.5	6	10
$Vitesse(m/s)$	6	6	6	6	6	7	7
$Q(var)$	0	-3000	0	3000	0	0	0

Les resultants de simulation sont représentés par les figures (III.5) à (III.10).

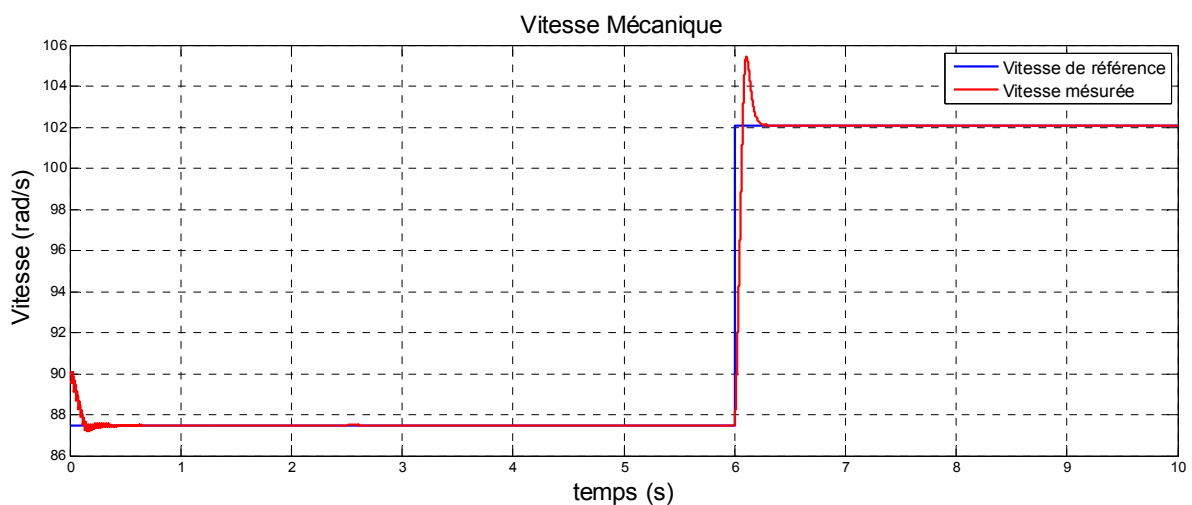


Figure III 5: Vitesse de rotation de la MADA avec variation de la puissance réactive.

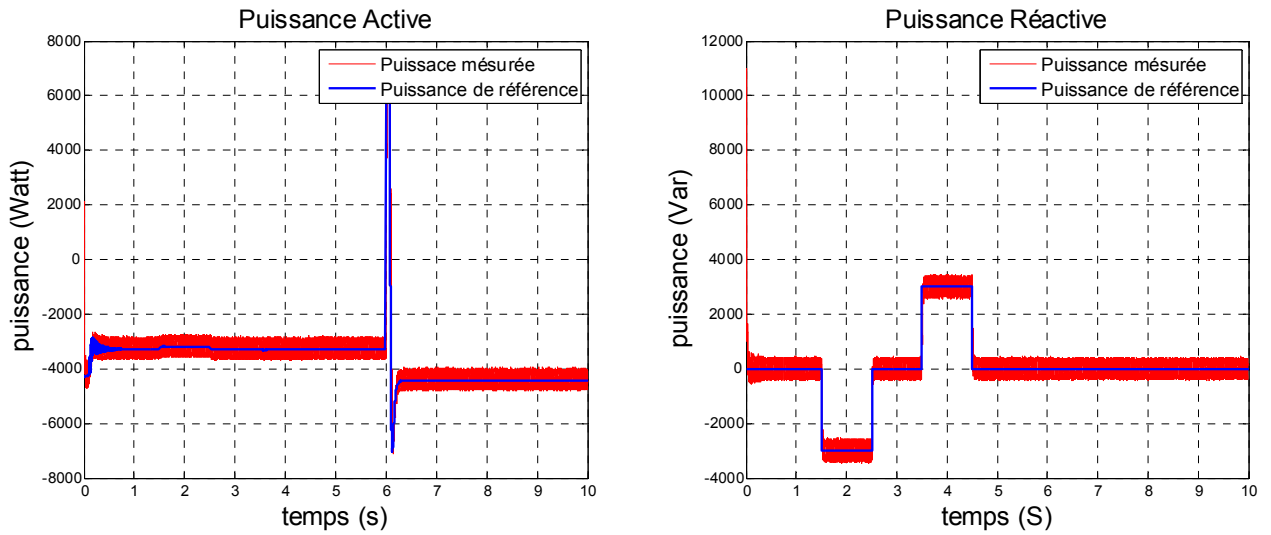


Figure III 6: La puissance active et réactive statorique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

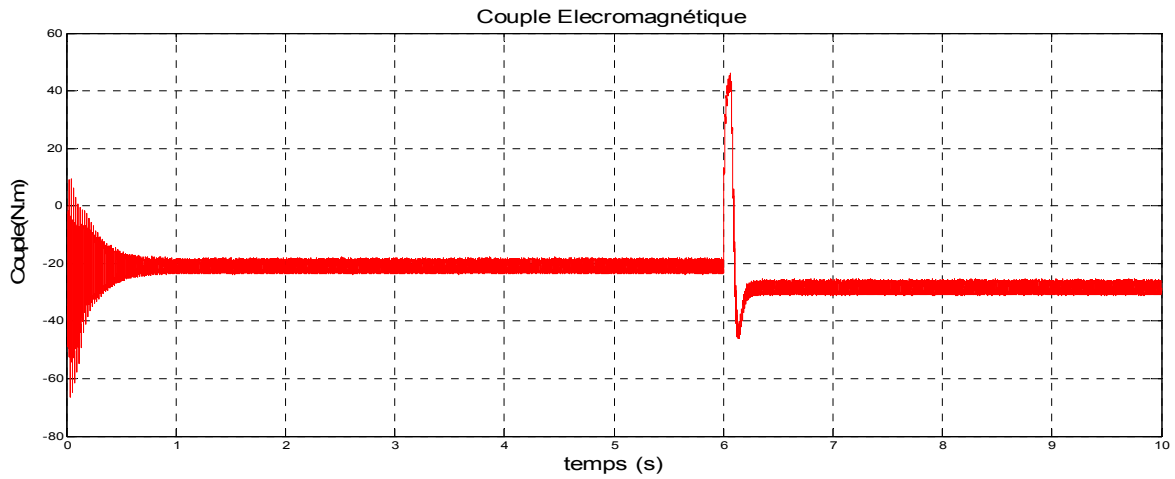


Figure III 7: Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

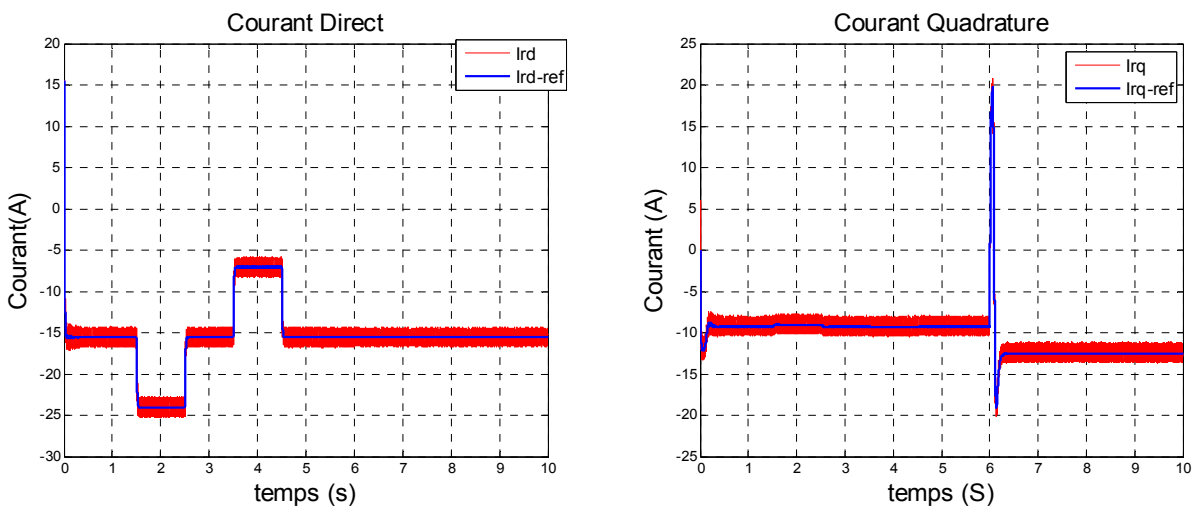


Figure III 8: Le courant rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

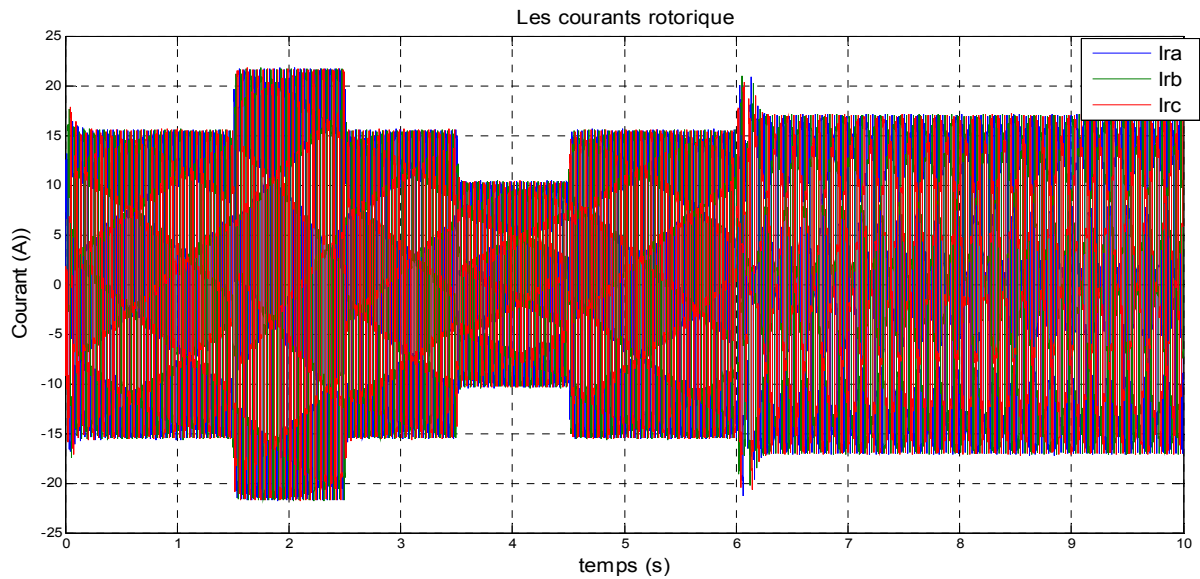


Figure III 9: Les courants rotorique abc pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

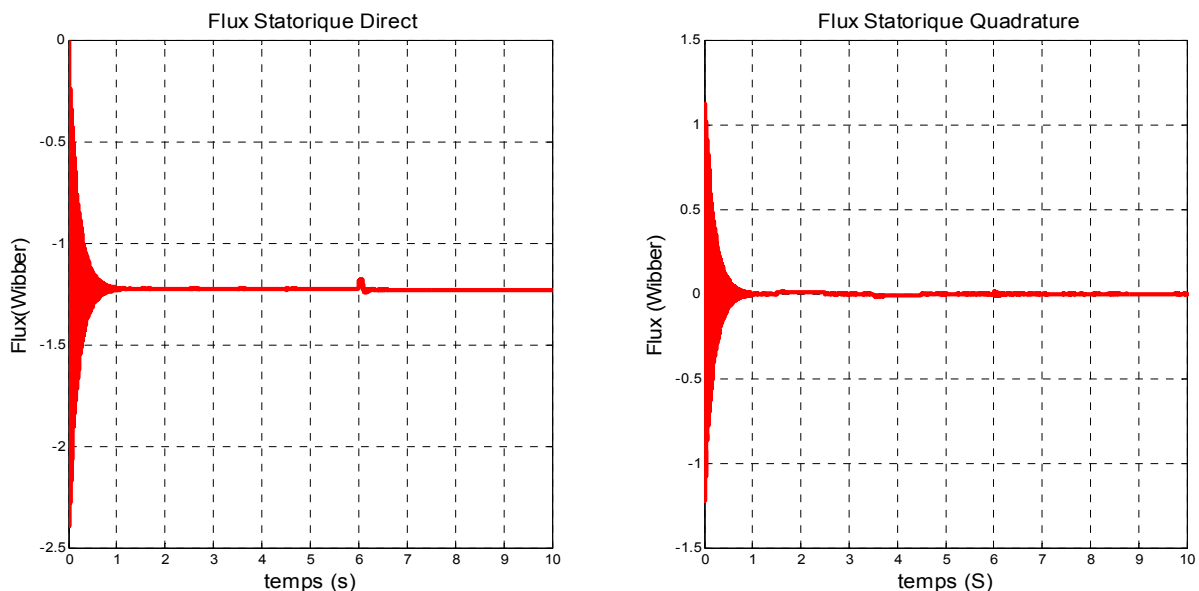


Figure III 10: Le flux statorique selon l'axe dq pour la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance.

D'après les résultats obtenue on constate que :

La figure III.5 montre l'allure de la vitesse de rotation de la génératrice, on voit bien dans le régime transitoire et à $t=6s$ (la variation de vitesse) un petit dépassement, mais la dynamique de la vitesse est rapide et elle suit sa référence en régime permanent avec erreur statique nulle.

La (figure III.6) présente les puissances active et réactive avec ces références, nous remarquons que la puissance active et réactive suivent parfaitement ces consignes avec des oscillations dues aux harmoniques injectés par l'onduleur au niveau du rotor

La puissance active est sensible aux variations de la vitesse du vent avec l'apparition des fluctuations (fig. III.6) à $t=6s$, pour assuré le fonctionnement dans la zone de stabilité (les

grandeurs reste inférieur à les grandeurs nominal), nous proposons d'améliorer le régulateur PI de la vitesse mécanique par saturation et l'anti-saturation.

La puissance active du côté statorique est négative au régime permanent ce qui signifie que la MADA fournit une énergie vers le réseau.

On constate que la variation de la vitesse est influée sur le couple électromagnétique (fig.III.7)

Les courbes de la figure III.8 présentent la composante directe et en quadrature du courant rotorique. Nous constatons que la première est l'image de la puissance réactive et la deuxième image de la puissance active. Ces deux composantes suivent leurs références en présentant des oscillations dues à l'onduleur.

La composante en quadrature de flux ϕ_{sq} figure III.10 est presque nulle en régime permanent ce qui confirme les hypothèses de la commande vectorielle.

On voit clairement que la composante quadrature du courant I_{rq} contrôle le couple électromagnétique donc la puissance active, et la composante directe du courant I_{rd} contrôle le flux donc la puissance réactive.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé la commande vectorielle de la MADA pour montrer les remarquables performances de celle-ci.

Un contrôle découplé de la puissance active et réactive a été obtenu et apporte une amélioration de la qualité de l'énergie fournie au réseau.

Chapitre IV

- **Continuité de service des convertisseurs statiques d'un système éolien basé sur une MADA**

IV.1 Introduction :

Les systèmes éoliens industriels sont typiquement des applications pour lesquelles la production d'énergie électrique est directement liée aux bénéfices économiques qui en découlent. De nombreuses topologies de convertisseurs statiques triphasés, reliant les systèmes éoliens au réseau, ont été étudiées dans la littérature; la plupart d'entre elles intègre des convertisseurs statiques à structure tension, généralement connectés entre eux par un bus continu. Sécurité, fiabilité, performance, qualité et continuité de service sont quelques-unes des préoccupations majeures lors de leur fonctionnement.

Les défauts qui peuvent survenir, qu'ils proviennent de la commande rapprochée des convertisseurs (drivers, par exemple) ou du composant de puissance lui-même (de type IGBT par exemple), conduisent à la perte de contrôle totale ou partielle du courant de phase. Ainsi, l'apparition du défaut conduit à un dysfonctionnement du système éolien qui l'oblige ainsi à se déconnecter du réseau, en attendant une future opération de maintenance. De plus, si le défaut n'est pas détecté et compensé rapidement, il peut entraîner la destruction des convertisseurs [41].

Afin de réduire ces risques, nous allons étudier la détection et la compensation de défauts afin de garantir la continuité de service de système éolien.

IV.2 Différents défauts dans un convertisseur statique :

La figure (IV.1) suivante, résume les différents types de défauts qui peuvent se produire dans le convertisseur statique

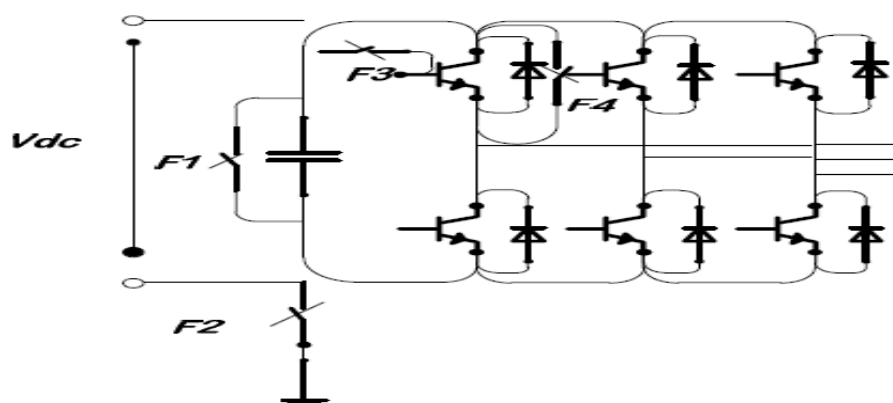


Figure IV 1: Schéma synoptique des différents types de défaut dans le convertisseur statique

Les défauts sont donnés comme suit :

- ❖ F1: Court-circuit du bus continu.

- ❖ F2 : Court-circuit du bus continu avec la masse.
- ❖ F3 : Circuit ouvert d'un IGBT.
- ❖ F4 : Court circuit d'un IGBT.

Pour un défaut dans un transistor de puissance IGBT, deux types de défaillances peuvent être distingués :

IV.2.1 Défaut d'ouverture d'un interrupteur

Le maintien à l'état ouvert d'un transistor (fig IV.2), dû par exemple à une défaillance de grille, entraîne une perte de réversibilité en courant de l'interrupteur et se manifeste en mode onduleur par la perte d'une alternance du courant de phase, qui est alors unipolaire et non sinusoïdal [40].

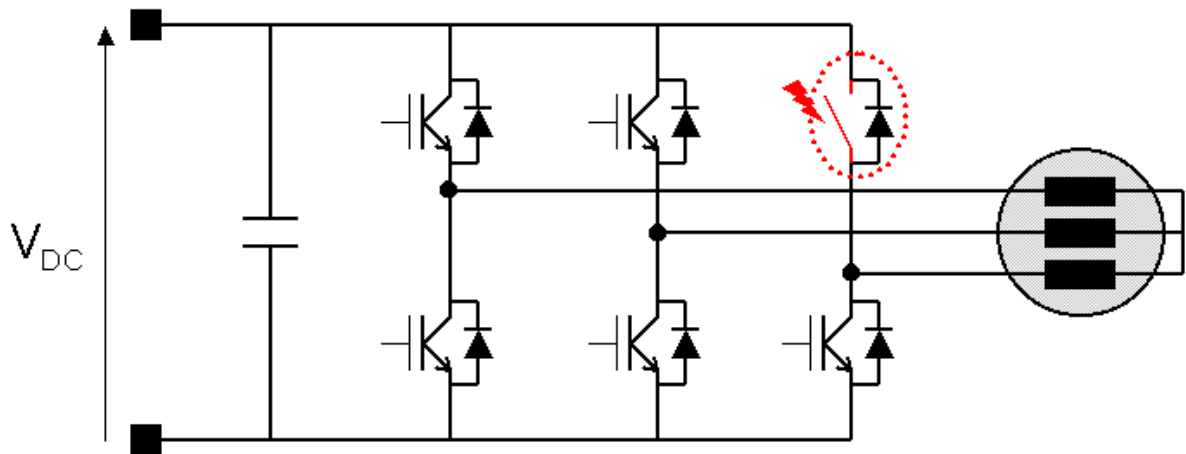


Figure IV 2: Défaut de circuit ouvert.

✓ Analyse des conséquences du défaut de circuit ouvert:

Les Figures ci dessous présente les résultats de simulation de la chaine éolienne sous l'environnement MATLAB obtenus lorsqu'un défaut du type circuit-ouvert se produit sur l'interrupteur K_2 du 2eme bras à l'instant $t = 1$ s. On va analyser le défaut pour une vitesse du vent constante égale à $7m/s$.

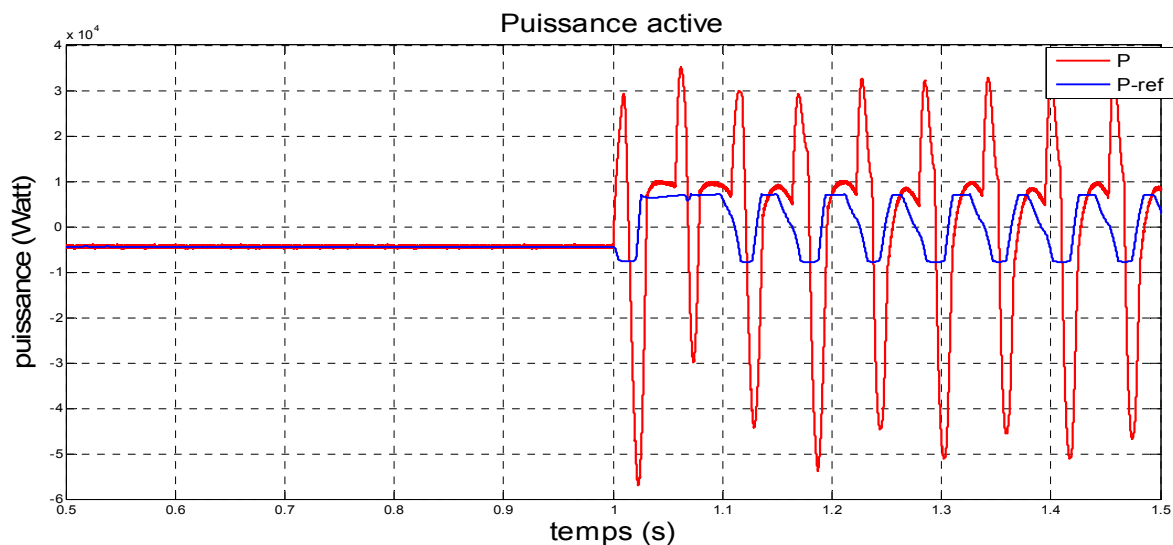


Figure IV 3: Puissance active dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

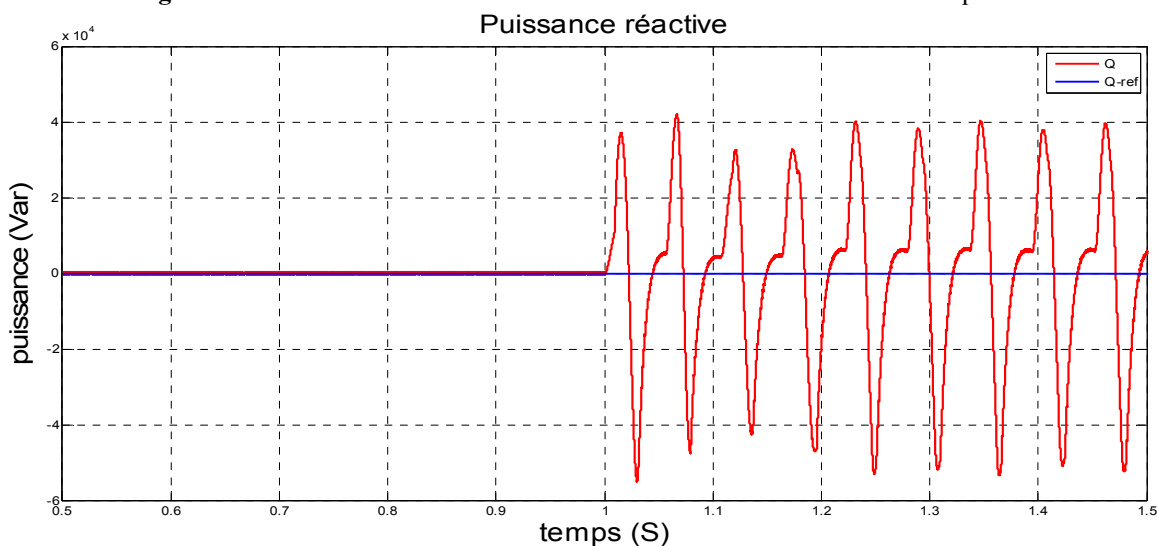


Figure IV 4: Puissance réactive dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

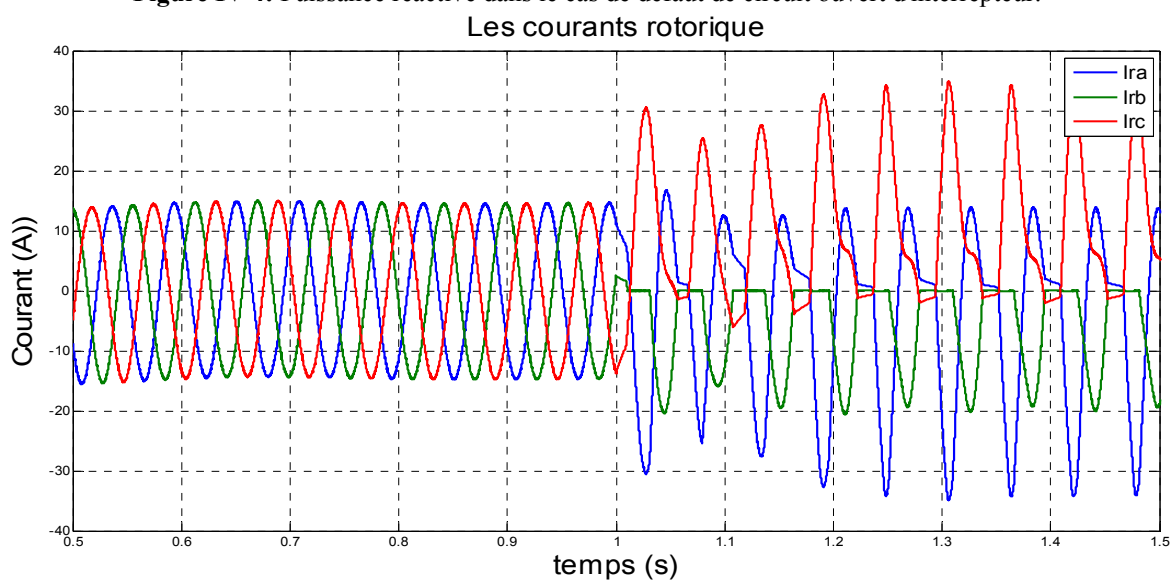


Figure IV 5: Courants rotorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

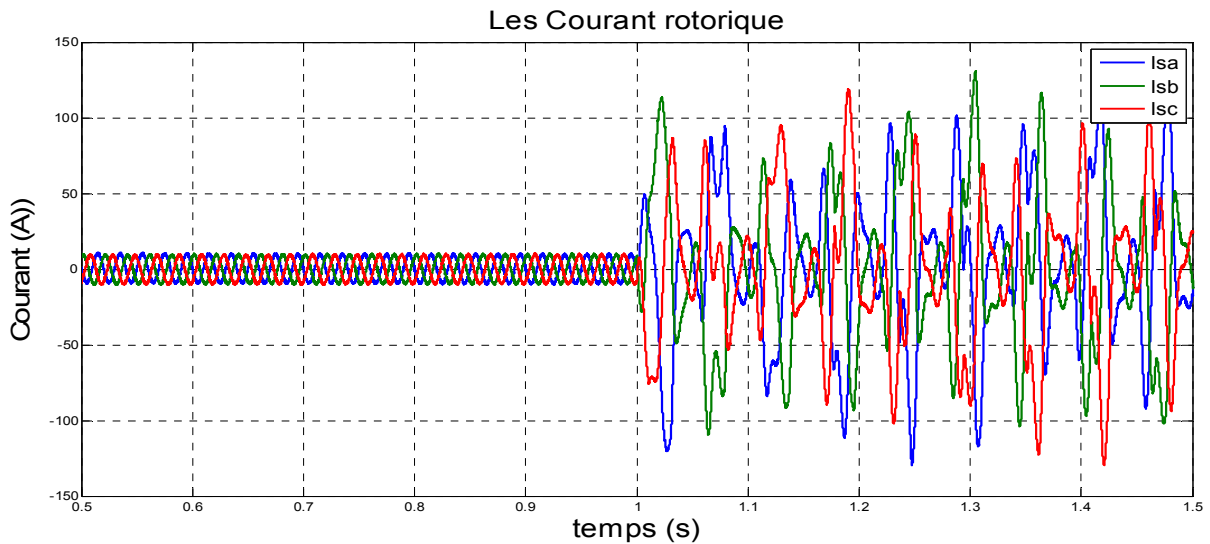
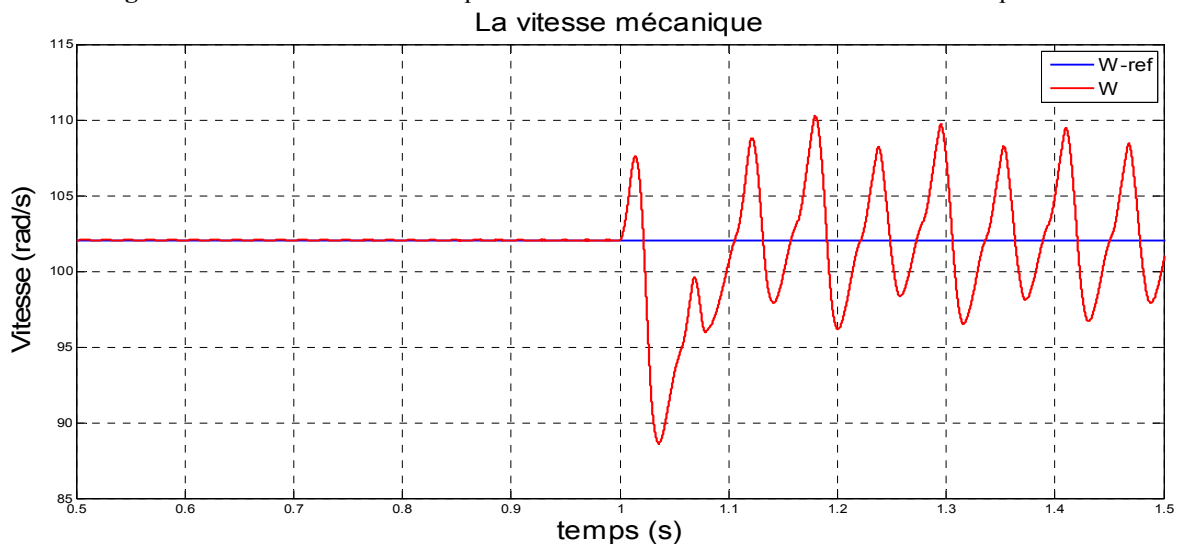


Figure IV 6: Les courants statorique dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.



+

Figure IV 7: Vitesse de rotation dans le cas de défaut de circuit ouvert d'interrupteur.

Nous pouvons observer que les courbes de puissance active (figure IV.3) et réactive (figure IV.4) présentent des oscillations importantes et fluctuations au moment d'application le défaut : en plus ils ne suivent pas ses références

Pour les courants rotoriques (figure IV.5) à l'instant de l'apparition de défaut nous remarquons que le courant dans la phase concernée s'annule pendant la moitié de la période de modulation. ainsi que les courants statorique (figure IV.6), et la vitesse de rotation (figure IV.7) présentent des oscillations importantes. au moment d'application de défaut

On peut conclure sur le circuit ouvert que cela affecte toute la chaîne éolienne et injecter au réseau des puissances fluctuantes pouvant ainsi entraîner des perturbations pour les utilisateurs du réseau.

IV.2.2 Défaut de court-circuit

Quelle que soit l'origine du défaut de court-circuit (fig IV.8), la défaillance d'un interrupteur provoque la mise en court-circuit de la source de tension lorsque le second interrupteur de la cellule est commandé à la fermeture. L'impédance de la maille, condensateur de filtrage (C) cellule en défaut, étant très faible, cela se traduit par un fort courant de court-circuit circulant à travers la cellule défaillante[40] [43].

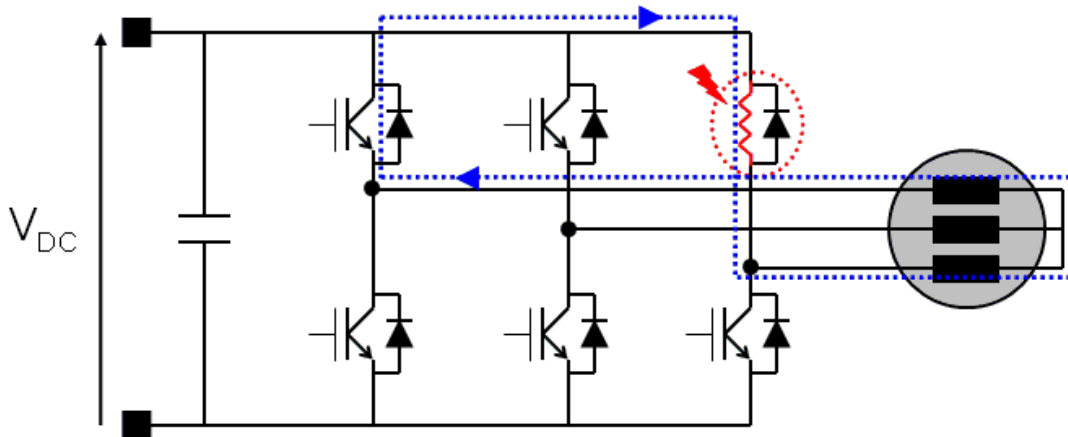


Figure IV 8: Défaut de court circuit.

✓ Analyse des conséquences du défaut de court circuit:

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation de la chaîne éolienne pour le fonctionnement avec défaut de court circuit de l'interrupteur K_2 du 2eme bras à l'instant $t = 1$ s. On va analyser le défaut à partir de la vitesse du vent à une valeur constante égale à 7m/s .

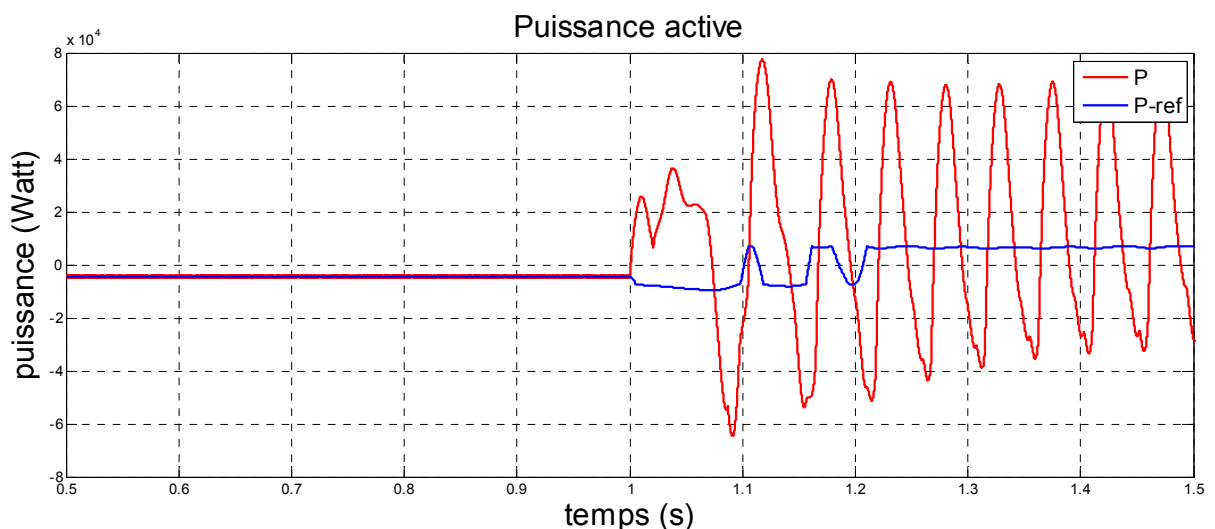


Figure IV 9: Puissance active dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.

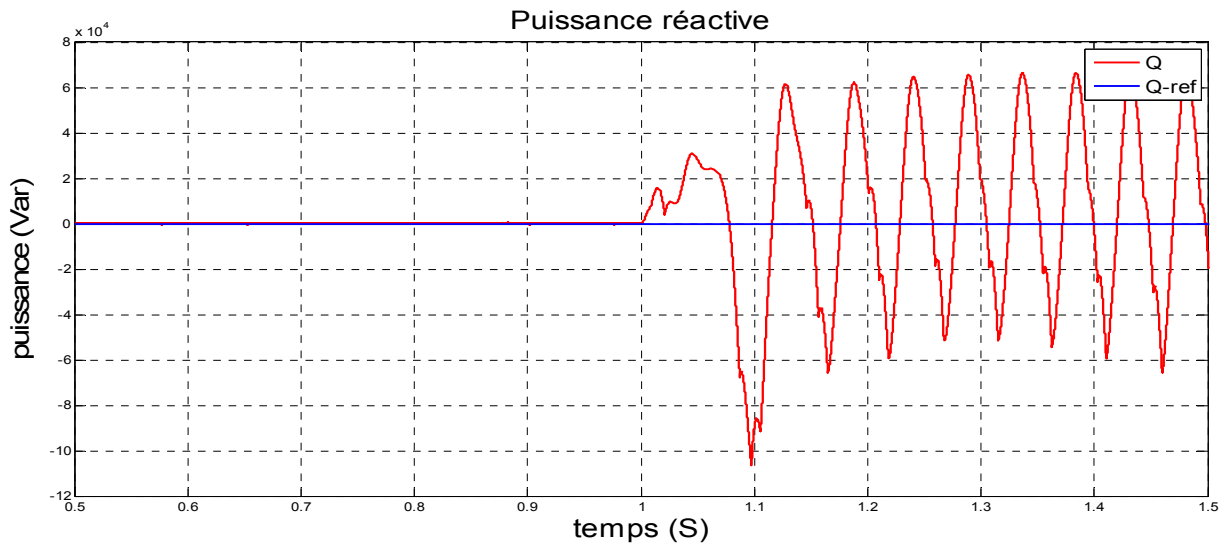


Figure IV 10: Puissance réactive dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.

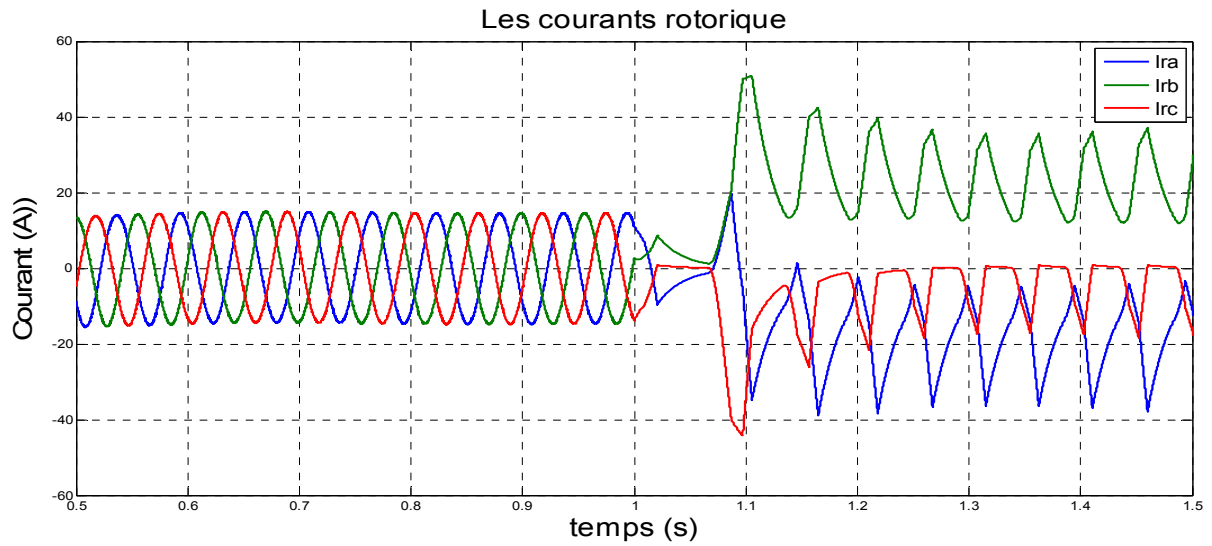


Figure IV 11: Courants rotoriques dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.

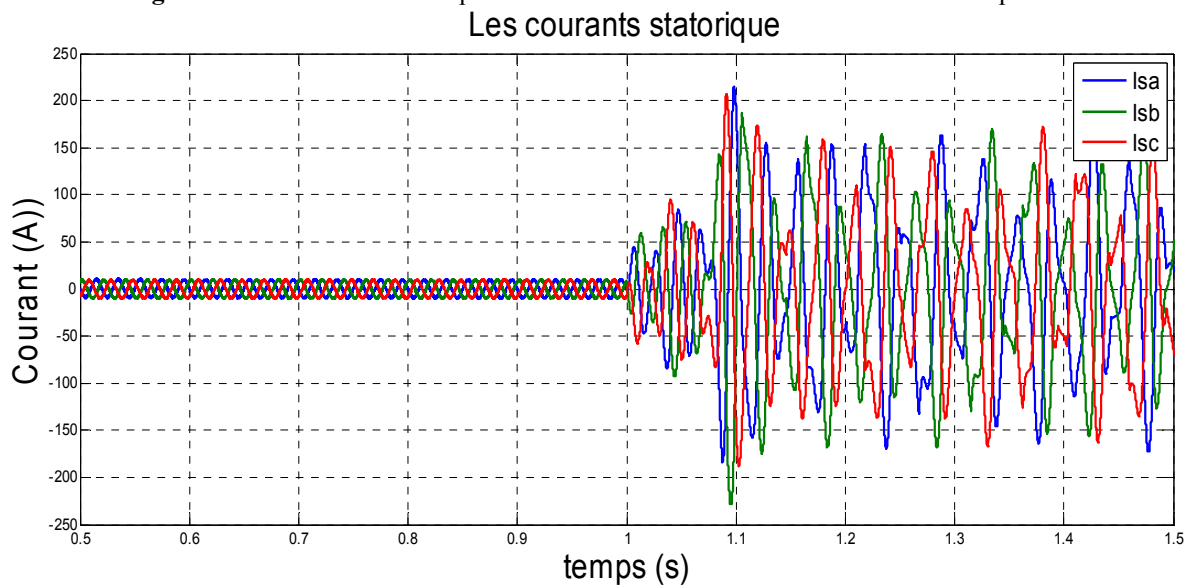


Figure IV 12: courants statoriques. dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur

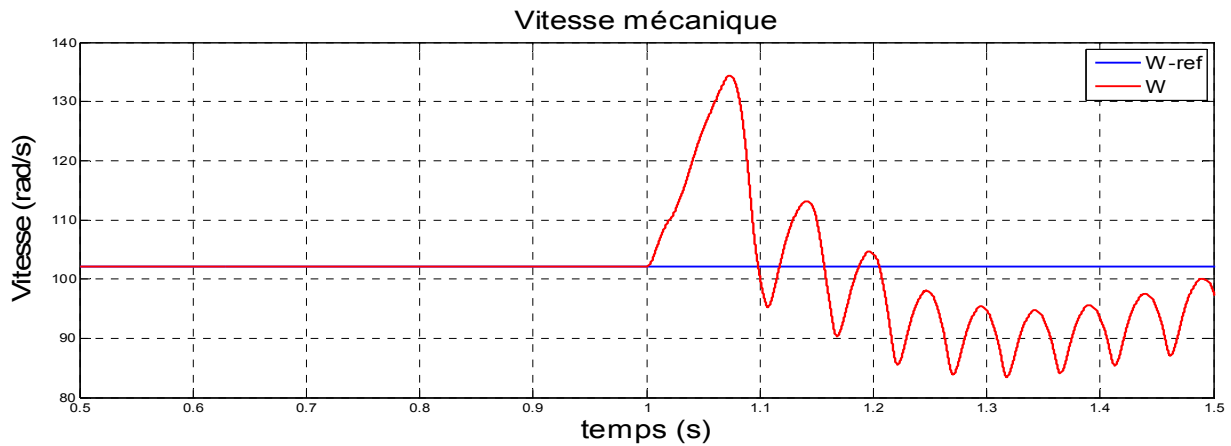


Figure IV 13: vitesse de rotation dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.

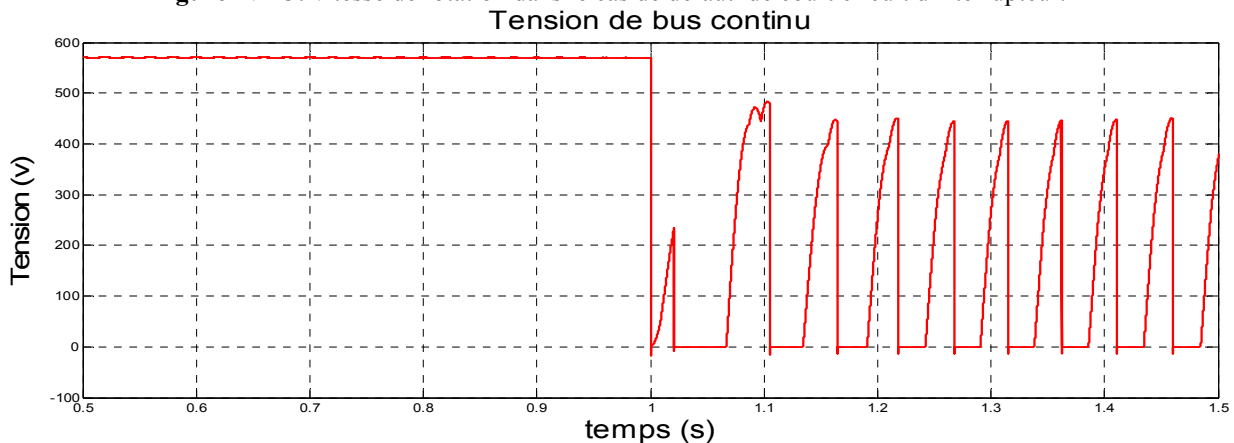


Figure IV 14: Tension de bus continu dans le cas de défaut de court circuit d'interrupteur.

nous pouvons constater que les courbes des puissances, courants statoriques et vitesse de rotation présentent des oscillations plus importantes après l'apparition de défaut de court circuit par rapport au résultat obtenu pour le fonctionnement avec défaut de circuit ouvert.

Les amplitudes des courants de phase rotorique peuvent atteindre plusieurs fois celles des courants en fonctionnement normal (figure IV.11). Cela engendre à risque également d'endommager les autres composants de l'onduleur. Ce type de défaut d'onduleur est alors beaucoup plus critique que celui du défaut circuit-ouvert.

IV.3 Méthodes de détections des défauts :

Aujourd'hui les convertisseurs de puissance dans les entraînements électriques conçus pour une utilisation industrielle sont équipés avec plus ou moins complets des systèmes de protection. Ils permettent la protection contre les perturbations et d'exécuter un arrêt en cas de fautes graves d'éviter des dégâts [43]. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à ce sujet, ainsi, de nombreux travaux ont pu voir le jour. Seulement les méthodes les plus couramment utilisées seront présentées par la suite. On y trouve donc :

A. Méthode de Vecteur de Park :

En utilisant la valeur moyenne des courants de phase dans le repère de Park pour le diagnostic de défaut de type circuit-ouvert. Les méthodes proposées ci-dessus ont été appliquées au seul cas des convertisseurs triphasés alimentant des machines électriques et nécessitent au moins une période du fondamental des courants de phase pour détecter le défaut [41][44].

B. suivi de la trajectoire du vecteur de Park:

En condition normale (sans défaut) la trajectoire de ce vecteur courant dans le repère $\alpha\beta$ est un cercle. Par exemple, ce cercle devient un demi-cercle lors d'un défaut de type circuit-ouvert d'un bras, occasionné par une défaillance au niveau d'un interrupteur bloqué à l'état ouvert. La position de ce demi-cercle dans le repère $\alpha\beta$ permet d'identifier l'interrupteur défectueux dans ce procédé, [41] [44] [45].

C. Méthode de la valeur moyenne du courant.

Cette méthode utilise la valeur moyenne de courant de phase pour détecter le défaut [46][44].

D. Analyse spectrale de courant :

Le spectre du courant est analysé pour détecter le défaut d'interrupteur, Une transformée de Fourier rapide est utilisé pour la l'analyse du spectre [44].

E. Méthode de la tension de pôle estimée et mesurée :

Plus récemment encore, la réduction du temps nécessaire à la détection du défaut, il a alors proposé d'utiliser des capteurs de tension supplémentaires pour la détection de défauts de types circuit-ouvert ou court-circuit Il a montré qu'à l'aide de la mesure des trois tensions entre chaque phase du convertisseur et le point milieu des deux condensateurs de la source continue(tensions appelées conventionnellement "pole voltages" en anglais) et leurs comparaisons avec les tensions estimées, le défaut peut être alors détecté en un quart de période du fondamental des courants de phase [47].

F. Réseaux de neurones artificiels :

Cette méthode est placée dans la famille des intelligences artificielles qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions en s'appuyant d'avantage sur la conception que sur le raisonnement logique formel [48].

✚ Dans la suite de ce chapitre, nous sommes intéressés par deux méthodes efficaces pour détecter les défauts au niveau des interrupteurs de puissance, la première est la méthode de la valeur moyenne du courant qui est utilisée pour la détection de circuit ouvert, et la

deuxième est la méthode de la tension de pôle estimée et mesurée qui est utilisée pour la détection de court circuit.

IV.4 Commande tolérante aux défauts de circuit ouvert et court circuit dans les convertisseurs statiques:

La tolérance aux fautes est la capacité de continuer l'opération après une faute. Donc, une éolienne tolérante aux fautes pourrait continuer l'opération après qu'une faute et l'éolienne pourraient être réparés à un moment approprié sans diminuer la disponibilité [50],[51].

Pour augmenter la sûreté de fonctionnement de l'onduleur, il y a deux topologies tolérantes la défaillance d'un interrupteur:

- ✓ Topologie de convertisseur avec bras redondant [41],[52].
- ✓ Topologie de convertisseur sans bras redondant [41],[53].

✚ Dans cet mémoire, nous sommes intéressés à la topologie de convertisseur avec bras redondant (3 bras avec bras redondant) selon la figure(IV.15).

IV.5 Topologie de convertisseur avec bras redondant:

Une topologie classique d'onduleur triphasé intégrant des interrupteurs d'isolement peut tolérer une défaillance interne. L'adjonction à l'onduleur d'une redondance interne permet d'améliorer les performances du fonctionnement reconfiguré. Il est préférable que l'élément additionnel soit une cellule de commutation plutôt qu'un diviseur capacitif, pour des raisons d'intégration comme de performances : la plage de tension que l'onduleur peut appliquer à la machine après reconfiguration est ainsi plus importante [42].

Ainsi après reconfiguration le fonctionnement reste celui d'un onduleur triphasé ;aucune modification de l'algorithme de commande n'est requise et l'intégralité de la puissance nominale peut être fournie [41],[53]

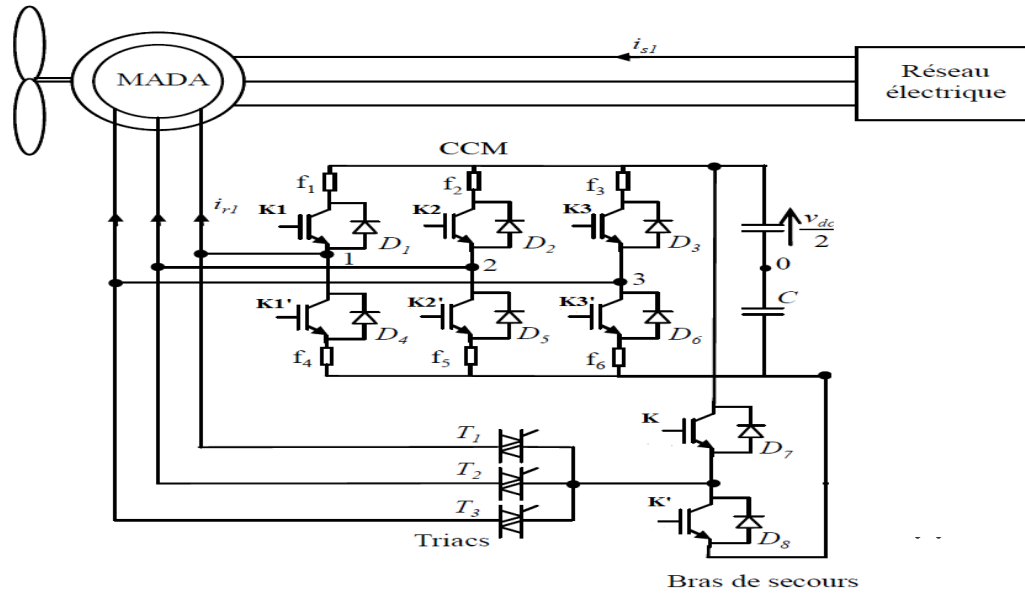


Figure IV 15: Topologie de convertisseur avec bras redondant.

IV.5.1 Détection et compensation des défauts de circuit ouvert et court circuit:

IV.5.1.1 Détection et reconfiguration de circuit ouvert

IV.5.1.1.1 Détection d'un circuit ouvert par la méthode de la valeur moyenne du courant:

Cette méthode utilise la valeur moyenne de courant de phase pour détecter le défaut . La première méthode de diagnostic consiste à calculer les valeurs moyennes de ces courants. A partir de ces valeurs le défaut peut être détecté.

Le tableau suivant, résume les caractéristiques de défaut de circuit ouvert de IGBT d'un convertisseur statique coté machine [49].

Etat	Phase A	Phase B	Phase C
Sans défaut	0	0	0
K ₁ ouvert	I _a (moy)<0	I _b (moy)>0	I _c (moy)>0
K ₂ ouvert	I _a (moy)>0	I _b (moy)<0	I _c (moy)>0
K ₃ ouvert	I _a (moy)>0	I _b (moy)>0	I _c (moy)<0
K ₁ 'ouvert	I _a (moy)>0	I _b (moy)<0	I _c (moy)<0
K ₂ 'ouvert	I _a (moy)<0	I _b (moy)>0	I _c (moy)<0
K ₃ 'ouvert	I _a (moy)<0	I _b (moy)<0	I _c (moy)>0

On peut alors observer la modification de la forme des courants statoriques après l'introduction d'un défaut d'un IGBT et automatiquement les valeurs moyennes correspondantes, ce qui nous permet facilement de déterminer et localiser les défauts.

Simulation des résultats :

Les Figures ci dessous présente les résultats de la méthode de la valeur moyenne du courant lorsqu'un défaut du type circuit ouvert se produit sur l'interrupteurs K_3 et K_3' du 3ème bras à l'instant $t = 1$ s, à partir de la vitesse du vent à une valeur constante égale à 7m/s .

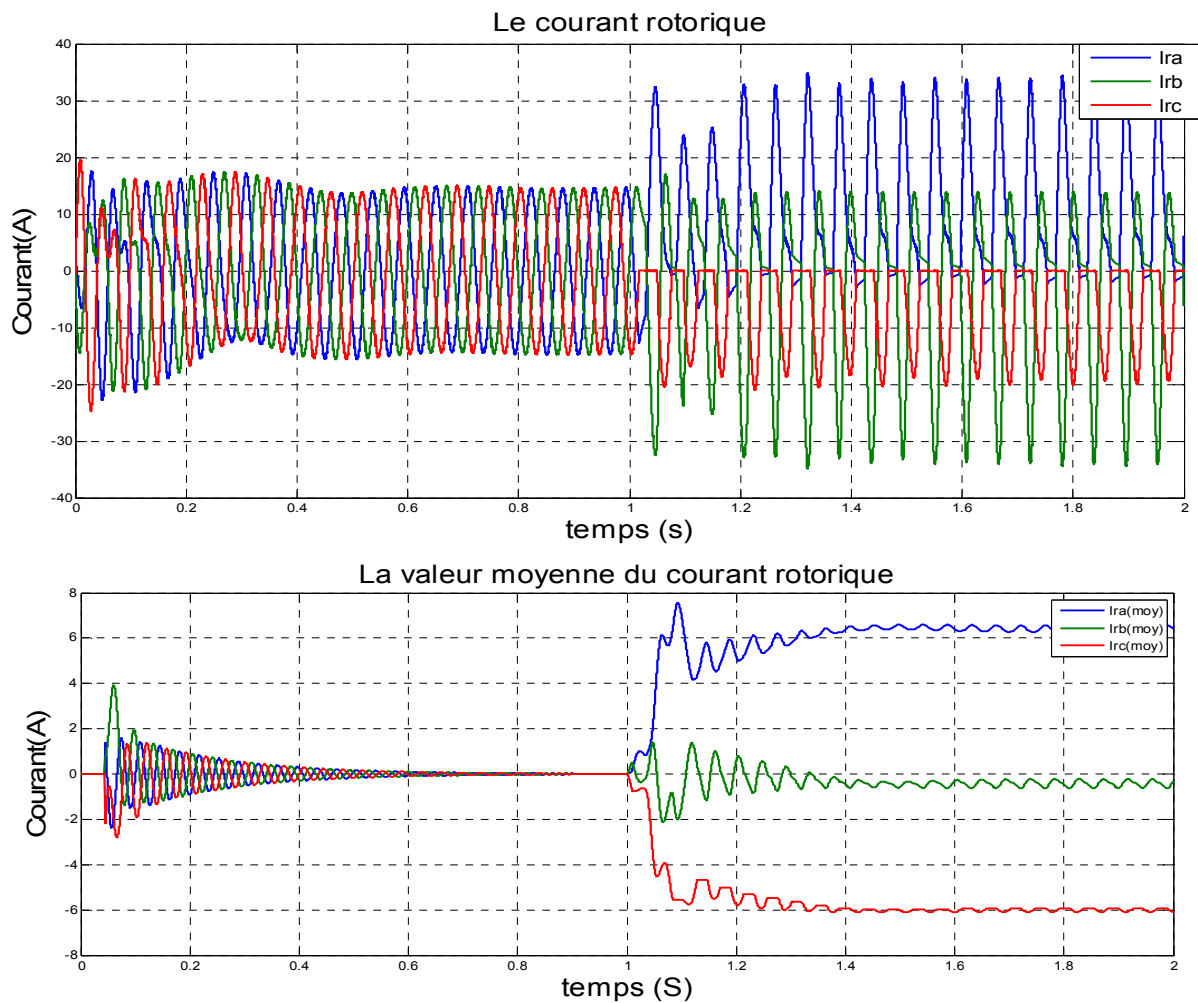


Figure IV 16:Le défaut de circuit ouvert dans K3.

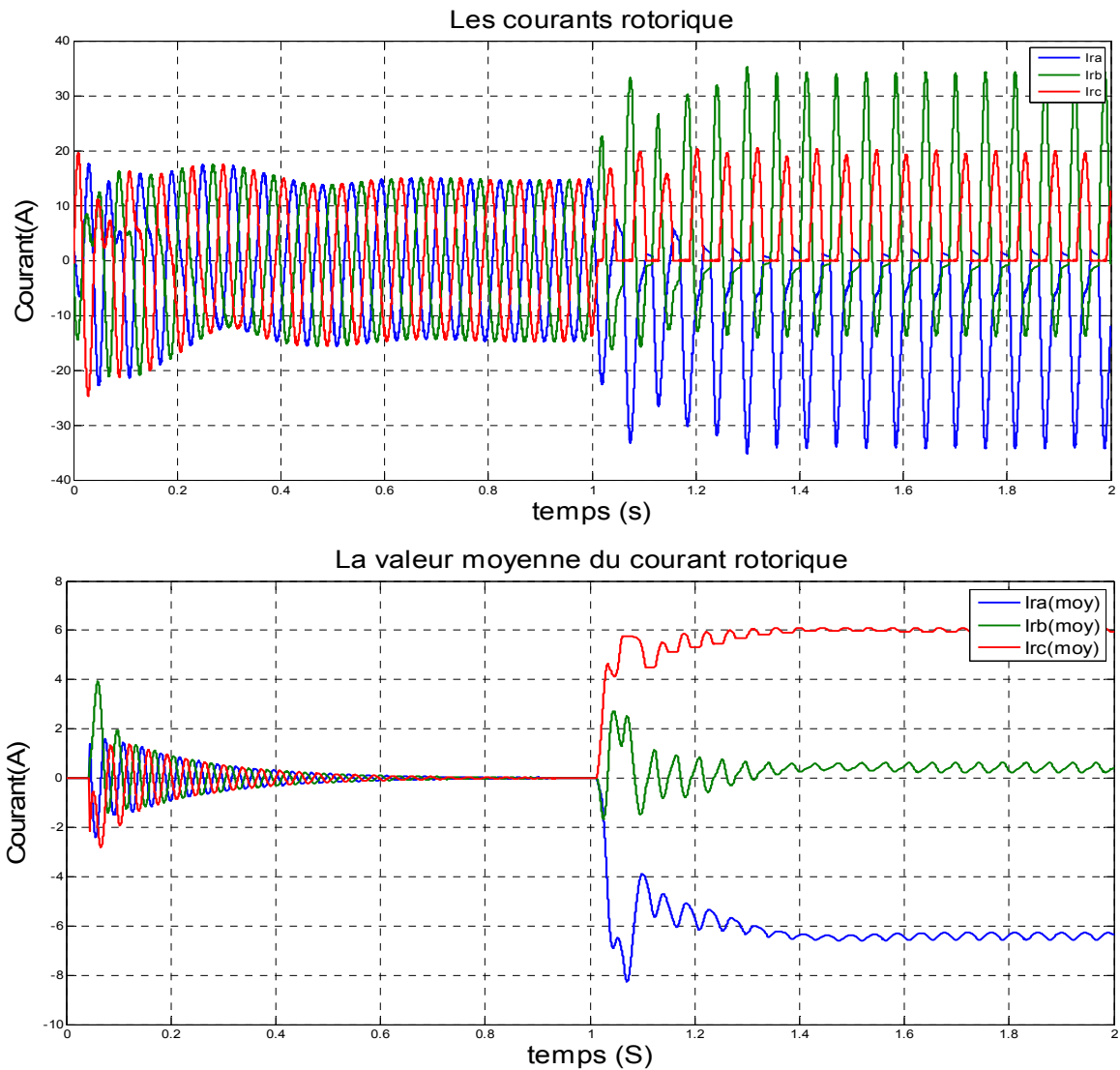


Figure IV 17: Le défaut de circuit ouvert dans K3'.

On remarque à l'instant de l'apparition du défaut que si il y a un défaut dans l'interrupteur du demi bras en haut (figures IV.16) alors la valeur moyenne du courant de la phase défaillante est négative et les autres valeurs sont positives, par contre si il y a un défaut dans l'interrupteur du demi bras en bas (figures IV.17) alors la valeur moyenne du courant de la phase défaillante est positive et les autres valeurs sont négatives.

La dynamique de la valeur moyenne du courant de la phase défectueux est plus rapides que les autres phases.

IV.5.1.1.2 Continuité de service en cas de circuit ouvert:

Pour assurer la continuité de service dans les systèmes éoliens en cas de circuit ouvert, nous appliquons les étapes suivantes::

- ✓ Calculer la valeur moyenne des courants rotoriques.

- ✓ Comparer cette dernière avec le courant de seuil ,pour un fonctionnement normal de l'interrupteur du demi bras en bas, la valeur moyenne de courants rotoriques est inférieure au seuil et pour le fonctionnement avec défaut la valeur moyenne des courants rotoriques est supérieure au seuil, et pour un fonctionnement normal de l'interrupteur du demi bras en haut la valeur moyenne de courants est supérieure au -seuil et pour le fonctionnement avec défaut la valeur moyenne de courants est inférieure au -seuil, cette étape pour localisé le défaut puis
- ✓ Puis directement l'isolation du bras défectueux.
- ✓ La reconfiguration par la fermeture de l'un des interrupteurs bidirectionnels (triac) correspond à la phase défectueux.
- ✓ Et en même temps l'application des ordres de commande des interrupteurs du bras défectueux aux deux interrupteurs du bras redondant
- ✓ Arrêt de la fonction "détection de défaut".

Le diagramme ci dessous expliquera brièvement les étapes précédentes :

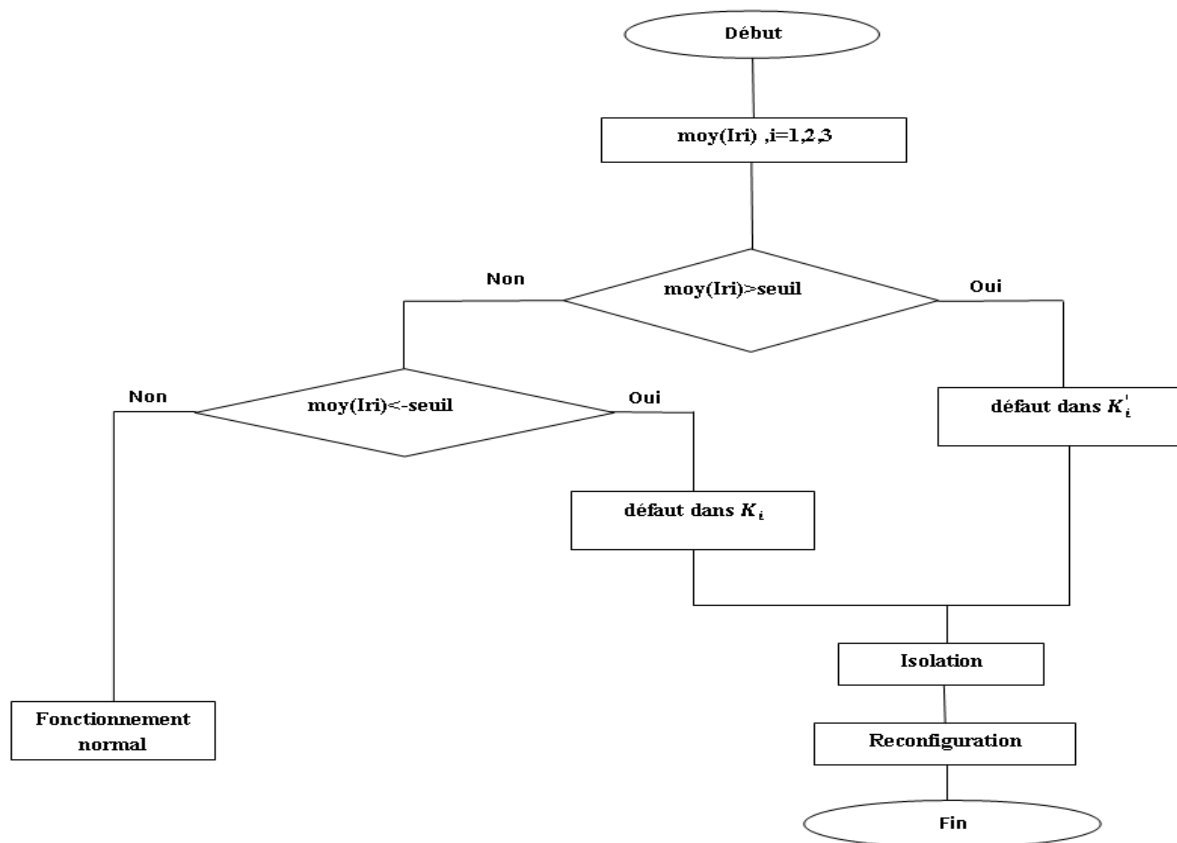


Figure IV 18:Algorithme pour la reconfiguration en cas de circuit ouvert.

Les figures suivantes présentent les résultats de simulation de la détection et reconfiguration de convertisseur pour le défaut de circuit ouvert a l'instant t=1s (figure IV.19)

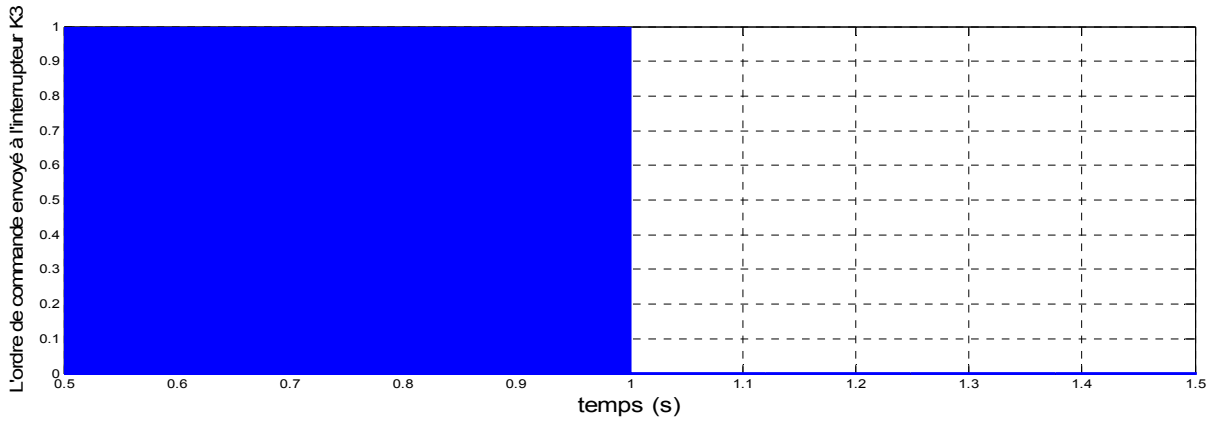


Figure IV 19: La commande envoyée à l'interrupteur K3.

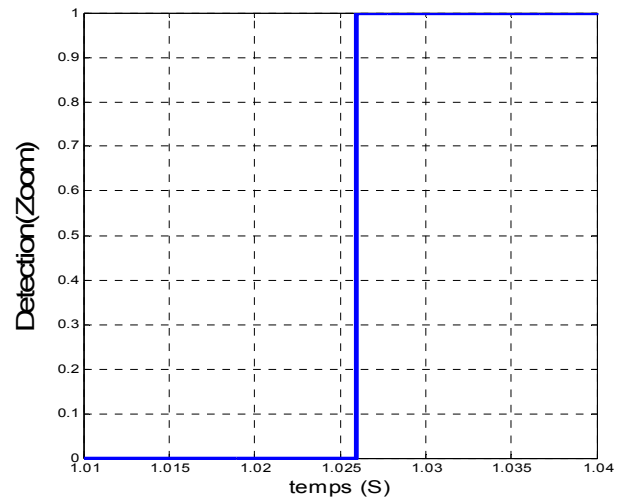
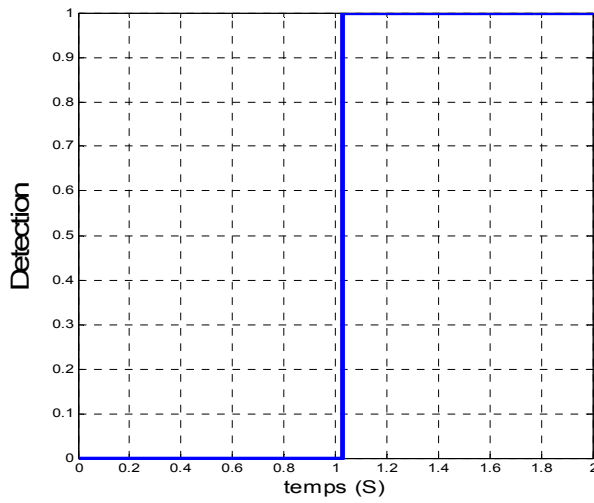
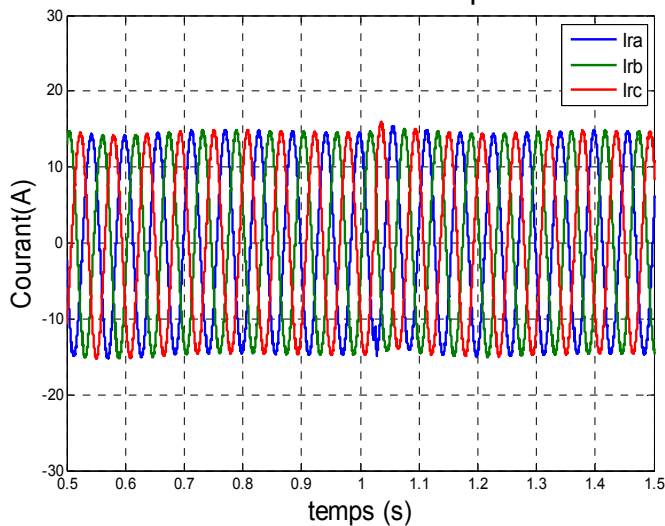


Figure IV 20: Le temps de détection au niveau de l'interrupteur K3.

Les Courant rotorique



Les courants rotorique avec zoom

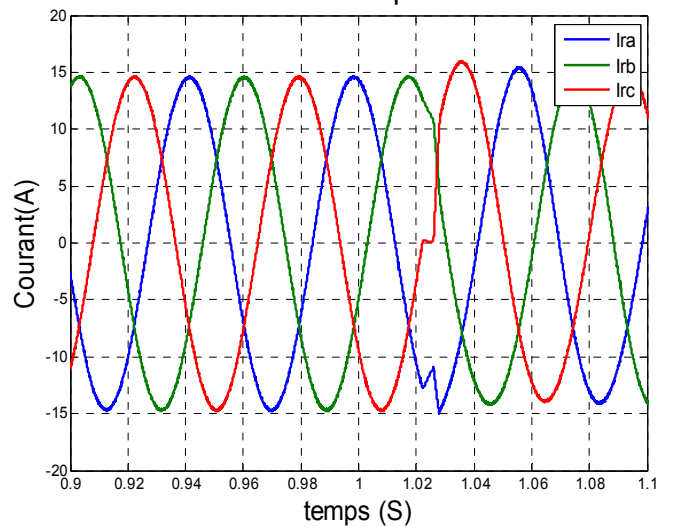


Figure IV 21: Compensation des défaut au niveau des courants rotorique.

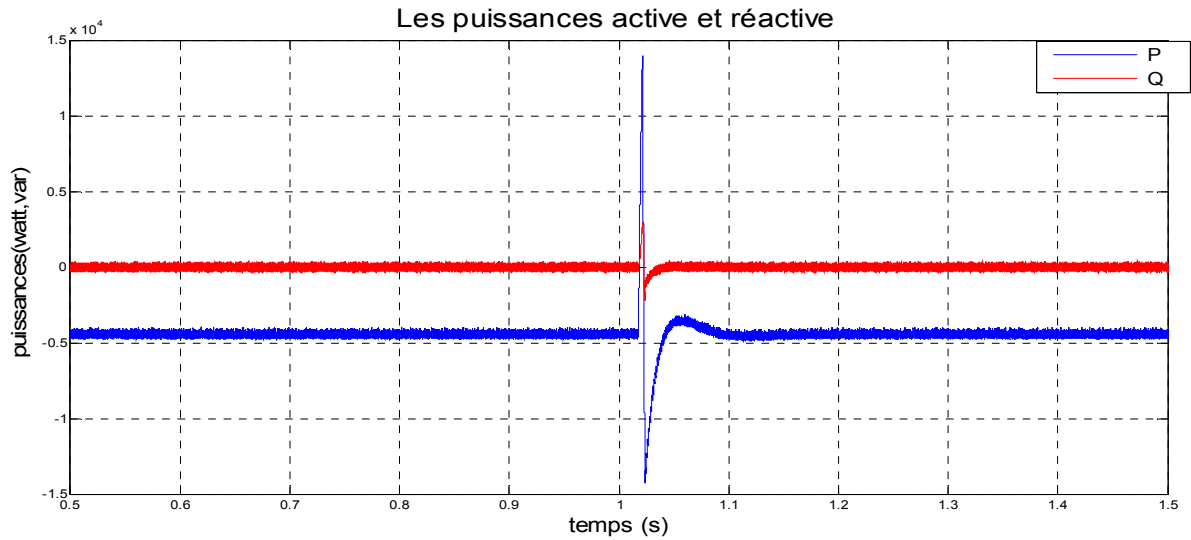


Figure IV 22: Compensation des défaut au niveau de la puissance active .

La figure (IV.20) présente le temps de détection par la méthode de la valeur moyenne .

Nous pouvons noter qu'avec un temps de détection court ,la reconfiguration de convertisseur avec bras redondant annule l'apparition du défaut voir les figures (IV.21, IV22)

IV.5.1.2 Détection et reconfiguration de court circuit.

IV.5.1.2.1 Détection du court circuit par la méthode de la tension de pôle estimée et mesurée) :

La méthode de détection de défaut de court circuit d'un interrupteur de puissance du CCM, proposée dans ce chapitre, est basée sur la comparaison entre les tensions v_{io} avec ($i = \{1,2,3\}$) mesurées et estimées, respectivement notées v_{iom} et v_{ioes} [41] Chaque tension estimée v_{ioes} est obtenue selon la relation :

$$v_{ioes} = (2\delta_i - 1) \frac{v_{dc}}{2} \quad (IV.1)$$

Avec:

- $\delta_i = \{0,1\}$:l'orde de commande envoyé à l'interrupteur K_i avec ($i = \{1,2,3\}$) du haut du bras i.
- v_{dc} : Tension de bus continu.

Le défaut éventuel peut alors être détecté par l'analyse de la différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} . Cette erreur de tension notée ε_{io} , est donc définie par :

$$\varepsilon_i = v_{iom} - v_{ioes} \quad (IV.2)$$

Dans un premier temps, nous supposons que les interrupteurs de puissance K_i avec ($i = \{1,2,3\}$) sont idéaux. Dans cette hypothèse et dans des conditions normales de

fonctionnement (sans défaut), les tensions v_{iom} et v_{ioes} sont égales et, par conséquent, le signal d'erreur ε_{io} est toujours égal à zéro.

On va étudier Méthode de la tension de pôle estimée et mesurée pour tous les cas :

- Avant l'apparition de défaut
- Après l'apparition de défaut
- A l'instant de l'apparition de défaut

A. Avant l'apparition de défaut (état sain):

Les figures suivantes montrent les tensions v_{1om} et v_{1oes} . par rapport à l'ordre de commande envoyé à l'interrupteur K1 sans défaut

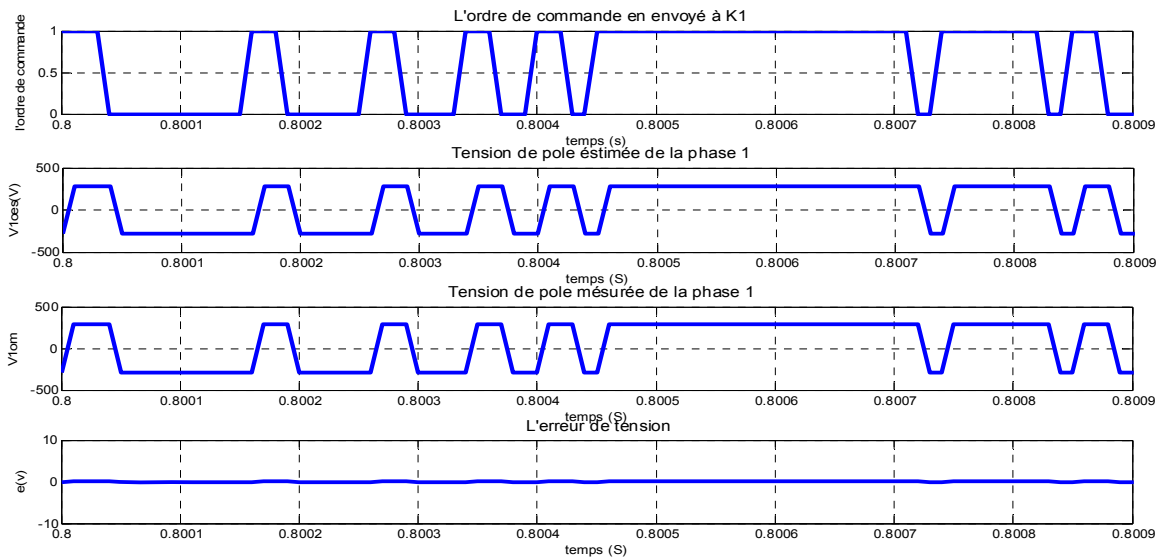


Figure IV 23: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état sain

A l'état sain, on remarque $V_{1om} = V_{1oes}$

Le tableau suivant expliquer les résultats de la figure (IV.23) :

L'interrupteur	δ_i	v_{iom}	v_{ioes}	ε_{io}
K_i	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0
	1	$\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$	0
K_i'	0	$\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$	0
	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0

B. Après l'apparition de défaut:

Les figures suivantes montrent les tensions v_{1om} et v_{1oes} . par rapport à l'ordre de commande de l'interrupteur K1 et K1' avec défaut

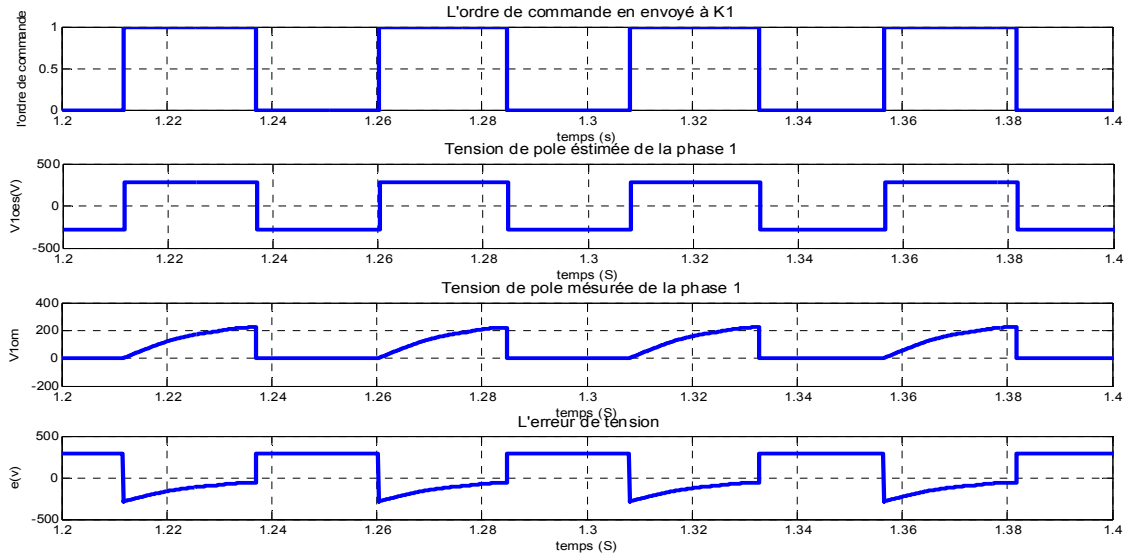


Figure IV 24: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état d'un défaut dans l'interrupteur K1.

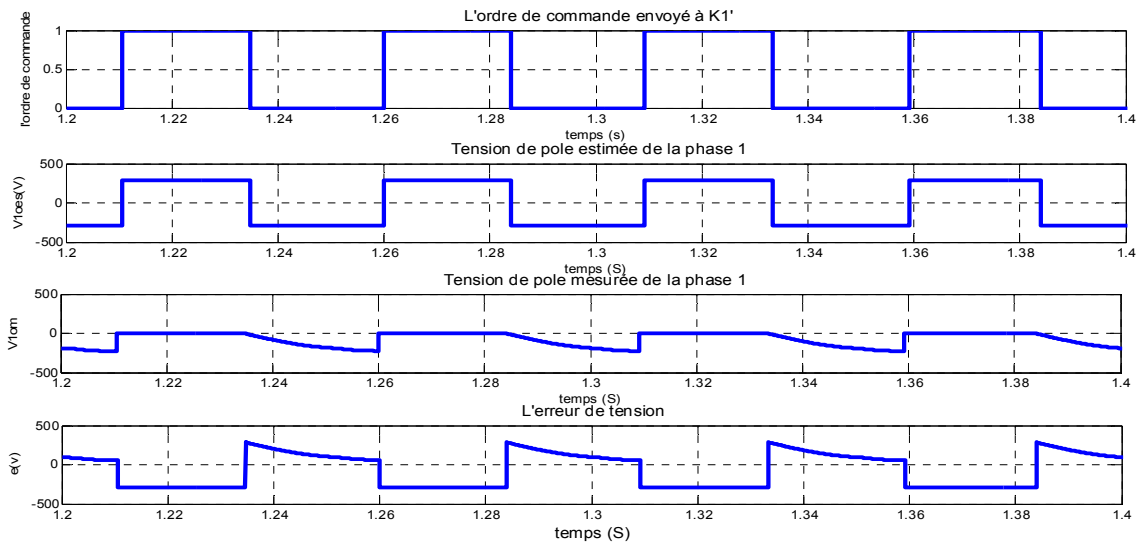


Figure IV 25: Comparaison entre v_{1om} et v_{1oes} à l'état d'un défaut dans l'interrupteur K1'.

On peut expliquer la méthode de la tension de pôle estimée et mesurée pour le cas d'un défaut de court circuit par le tableau suivant :

L'interrupteur	δ_i	v_{iom}	v_{ioes}	ε_{io}
K_i	0	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$
	1	$\frac{V_{dc}}{2}$	$\frac{V_{dc}}{2}$	0
K_i'	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$
	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$	$-\frac{V_{dc}}{2}$	0

C. A l'instant de l'apparition de défaut

Les Figures ci dessous présente les résultats de la Méthode de la tension de pôle estimée et mesurée lorsqu'un défaut du type court circuit se produit sur l'interrupteurs K_1 et K_1' du 1er bras à l'instant $t=1$ s, à partir de la vitesse du vent à une valeur constante égale à $7m/s$.

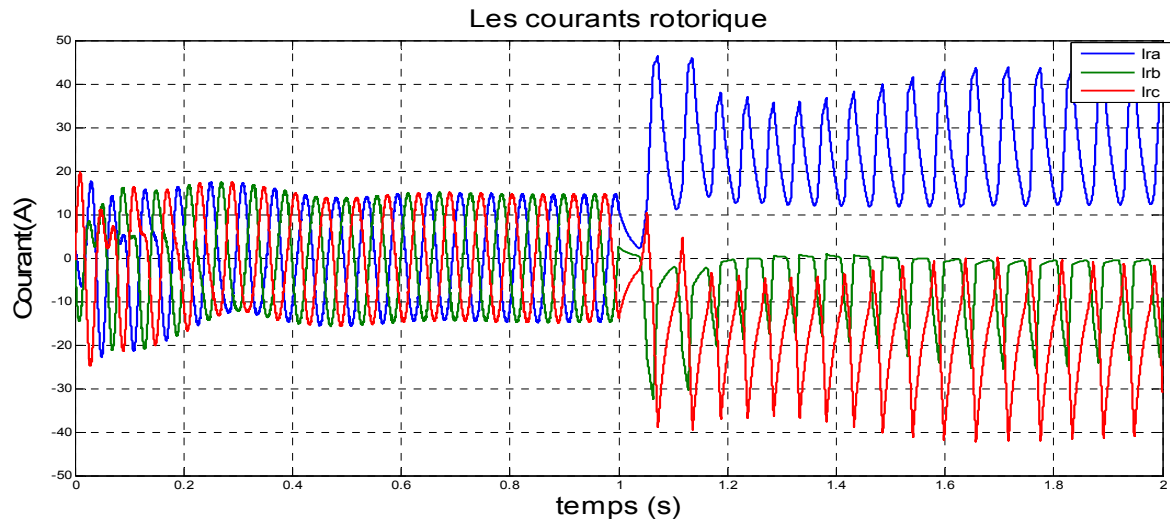


Figure IV 26: le défaut de court circuit dans K1.

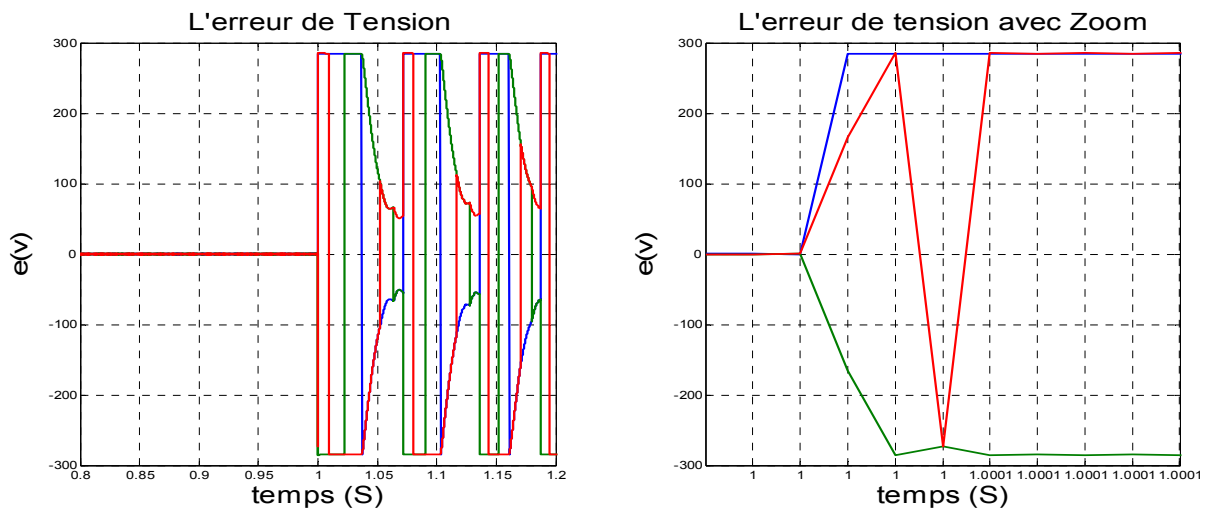


Figure IV 27: La différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} pour K1 fermée.

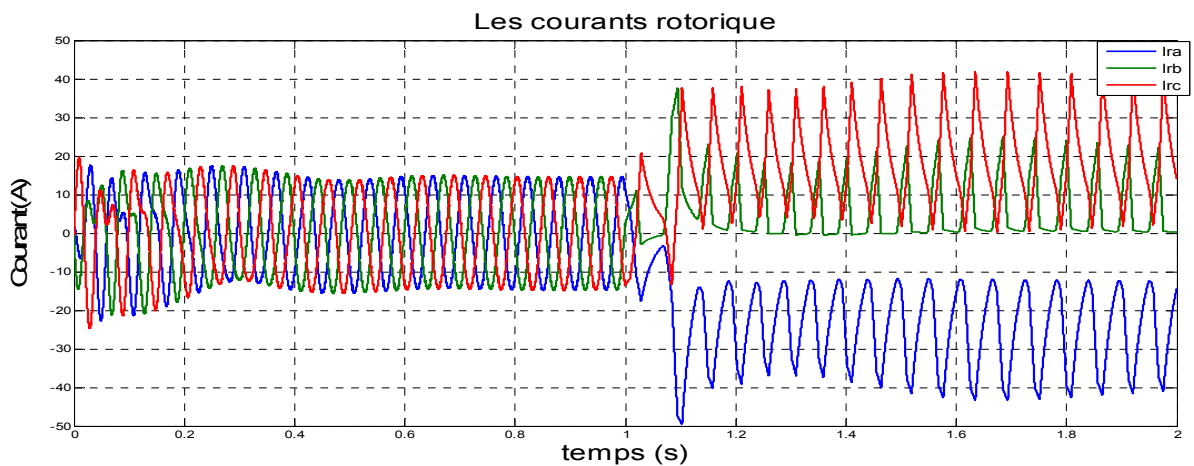


Figure IV 28: le défaut de court circuit dans K1'.

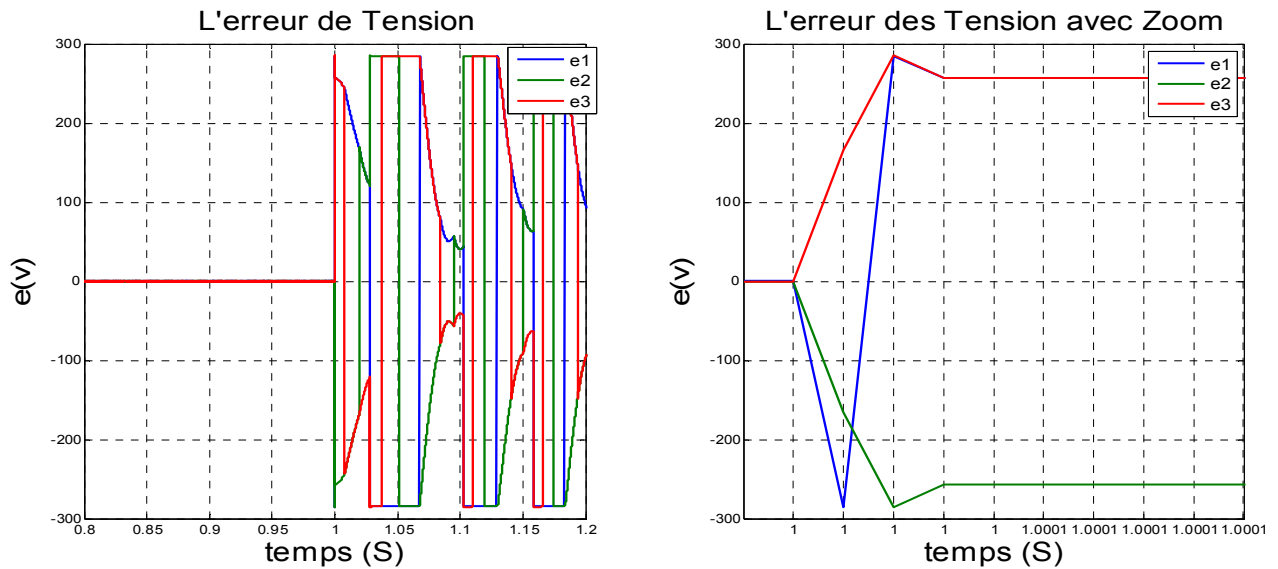


Figure IV 29: La différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} pour K1' fermée.

On remarque à l'instant de l'apparition du défaut ($t=1s$) que si il y a un défaut dans l'interrupteur du demi bras en haut illustré dans la figure(IV.25) alors l'erreur entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} (figure IV.26) de la phase défaillante est positif atteindre $\frac{V_{dc}}{2}$ et plus rapide que les autres erreurs, puis pour les figures(IV.27, IV.28 on remarque que si il y a un défaut dans l'interrupteur du demi bras en bas alors l'erreur des tension de la phase défaillante est négatif atteindre $-\frac{V_{dc}}{2}$ et aussi plus rapide que les autres.

IV.5.1.2.2 Continuité de service en cas de court circuit:

Pour assurer la continuité de service dans les systèmes éoliens en cas de circuit ouvert, nous appliquons les étapes suivantes:

- ✓ Calculer l'erreur ε_{io} par la différence entre les tensions v_{iom} et v_{ioes} .
- ✓ Comparer l'erreur avec un seuil, pour un fonctionnement normal de l'interrupteur du demi bras en haut l'erreur ε_{io} est inférieur au seuil et pour le fonctionnement avec défaut l'erreur ε_{io} est supérieur au seuil, et pour un fonctionnement normal de l'interrupteur du demi bras en bas l'erreur ε_{io} est supérieur au -seuil et pour le fonctionnement avec défaut l'erreur ε_{io} est inférieur au -seuil, cette étape pour localisé le défaut de court circuit.
- ✓ puis isolé le bras défectueux.
- ✓ La reconfiguration par la fermeture de l'un des interrupteurs bidirectionnels (triac) correspond à la phase défectueux.

- ✓ Et en même temps l'application des ordres de commande des interrupteurs du bras défectueux aux deux interrupteurs du bras redondant
- ✓ Arrêt de la fonction "détection de défaut".

Le diagramme ci dessous expliquera brièvement les étapes précédentes :

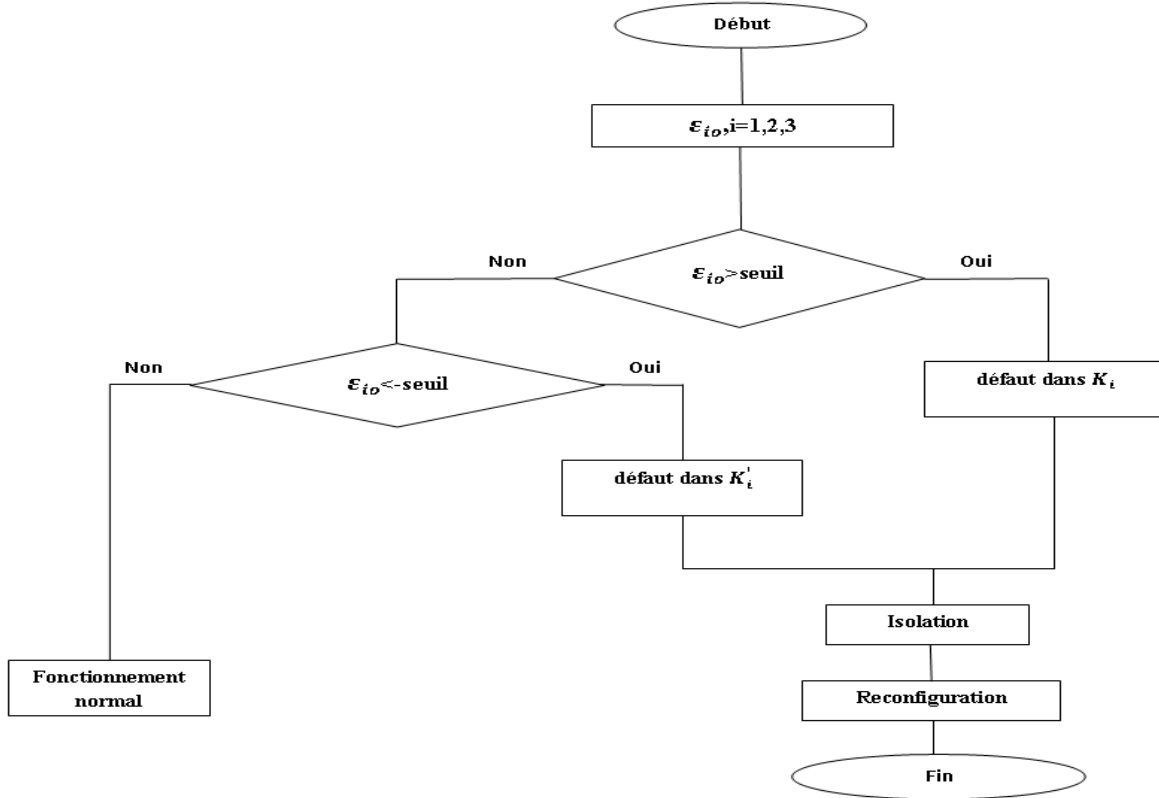


Figure IV 30:Algorithme pour la reconfiguration en cas de court circuit.

Les figures suivantes présentent les résultats de simulation de la détection et reconfiguration de convertisseur pour le défaut de court circuit a l'instant $t=1s$ (figure IV.30) .

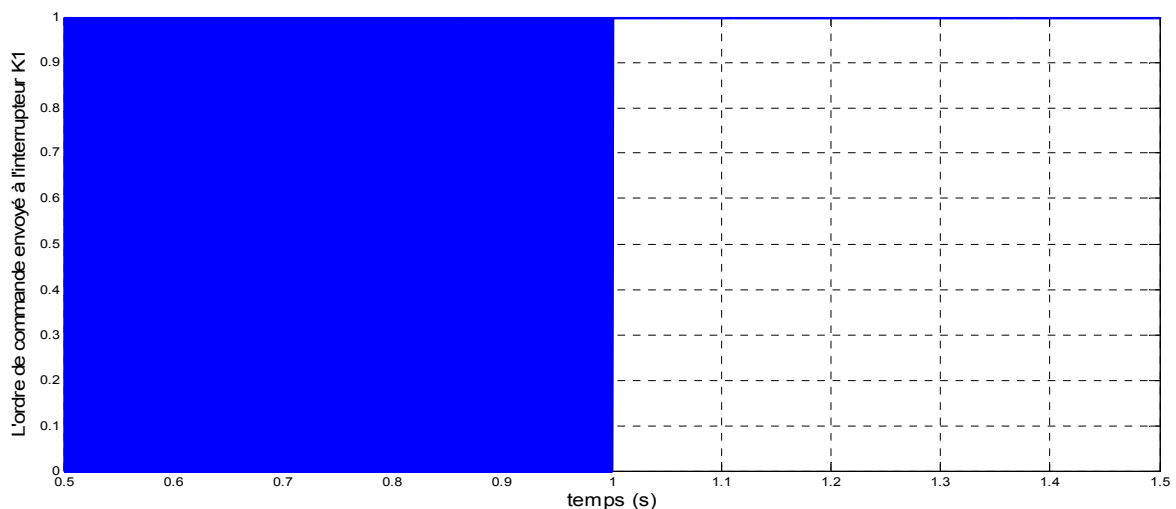


Figure IV 31:La commande envoyée à l'interrupteur K1.

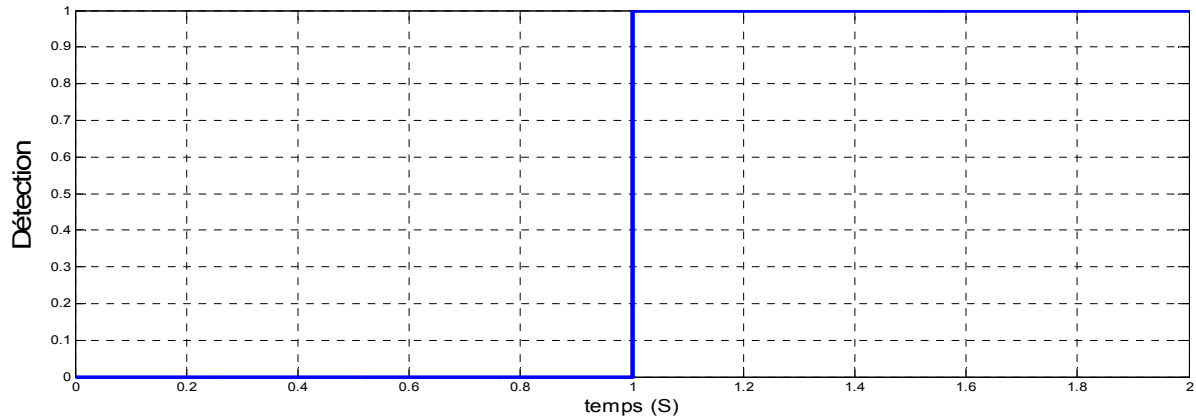


Figure IV 32: Le temps de détection au niveau de l'interrupteur K1.

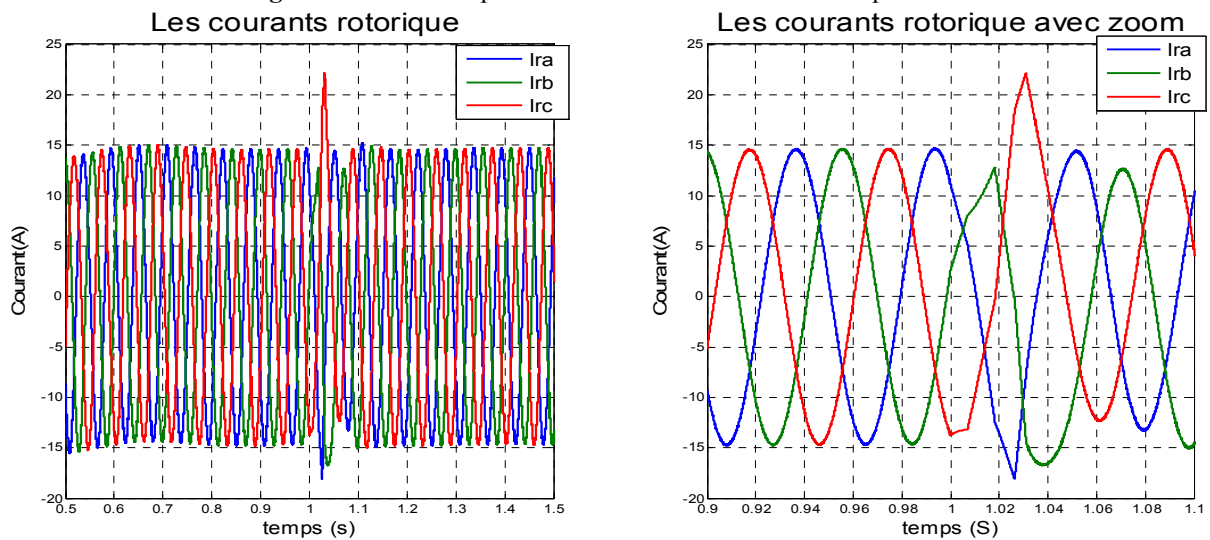


Figure IV 33: Compensation des défaut au niveau des courants rotorique.

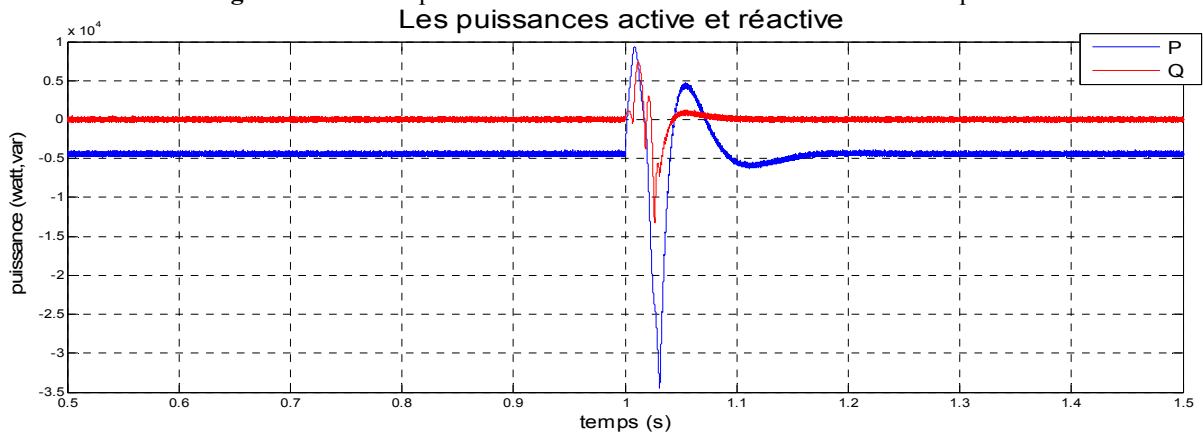
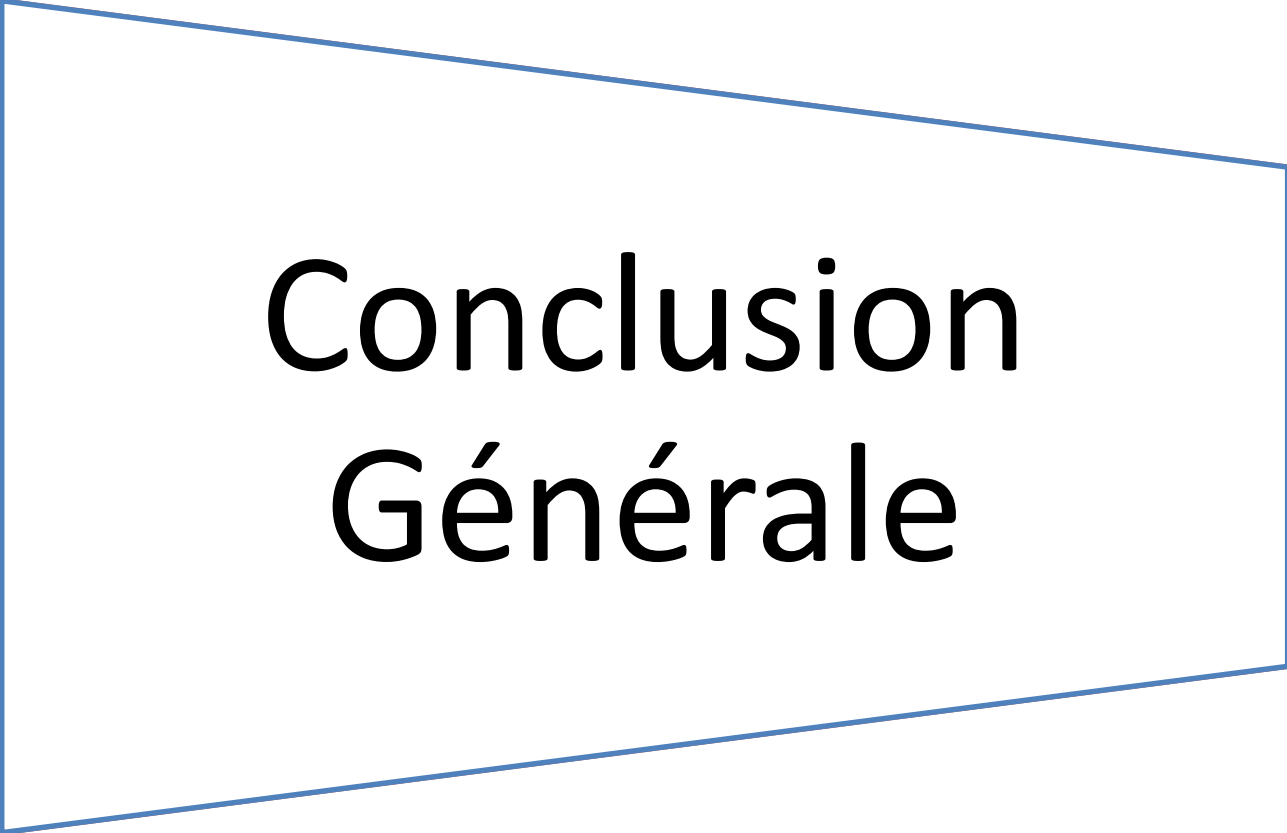


Figure IV 34: Compensation des défaut au niveau des puissances active et réactive.

la figure (IV.31) présente le temps de détection par la méthode de tension du pole .Nous pouvons noter qu'avec un temps de détection très court ,l'isolation et la reconfiguration de convertisseur avec bras redondant annule l'apparition du défaut voir la figure (IV.32, IV.34)

IV.6 Conclusion:

Ce chapitre nous a permis d'étudier la sûreté de fonctionnement de convertisseur en cas de défaut de circuit ouvert et en court circuit d'interrupteur; nous avons analysés les conséquences des différentes défauts sur la chaine éolienne et nous avons appliqués deux méthodes efficaces pour la détection du défauts, en suit nous avons utilisés un Algorithme pour la reconfiguration des défauts .



Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude des convertisseurs statiques tolérants aux défauts utilisés dans les systèmes éoliens.

Les défaillances d'un convertisseur statique, qu'elles proviennent des drivers éléments, de sa commande rapprochée, d'un des composants de puissance ou d'un des capteurs mis en œuvre, conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase donc perturbations des puissances injectées sur le réseau.

Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements pouvant dans certains cas mettre en danger le système. Donc pour réduire ces risques, une détection de défaut ainsi qu'une isolation et une compensation du défaut sont mises en œuvre très rapidement afin que l'éolienne puisse continuer à produire dans des conditions nominales,

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

La première partie a été consacrée à des généralités sur le système éolien accompagnées d'un état de l'art sur la conversion électromécanique. Nous avons montré que la chaîne éolienne peut présenter des défaillances qui induisent.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la modélisation de la chaîne éolienne (la turbine génératrice asynchrone à double alimentation la modélisation de l'onduleur de tension piloté par la stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)).

La troisième partie a été consacrée à la commande vectorielle de MADA par orientation de flux statorique avec contrôle de la puissance active et réactive. D'après les résultats de simulation de la MADA nous constatons que le contrôle découplé de la puissance active et réactive apporte une amélioration de la qualité de l'énergie fournie au réseau.

La quatrième partie a été dédiée à une détection de défaut de circuit ouvert et court circuit d'un interrupteur ainsi qu'une isolation et une compensation du défaut par la topologie d'un bras redondant. Nous constatons que les deux méthodes utilisées pour la détection sont efficaces

Pour continuation de ce travail, il serait intéressant de faire l'étude pratique de la commande tolérante aux défauts des convertisseurs statiques.



Annexes

A. Paramètres de la MADA :

Paramètre	Valeur	Désignation, Unité
P_n	7500	Puissance nominale [w]
N_n	1500	Vitesse nominale [tr/mn]
V_s	220	Tension efficace [v]
F_s	50	Fréquence de la tension d'alimentation [Hz]
p	2	Nombre de paire de pôle
R_s	0.455	Résistance statorique [Ω]
R_r	0.62	Résistance rotorique [Ω]
M_{sr}	0.078	Mutuelle inductance [H]
L_s	0.084	Inductance cyclique statorique [H]
L_r	0.081	Inductance cyclique rotorique [H]
F	$6.73 * 10^{-3}$	Coefficient de frottement
J	0.3125	Moment d'inertie [$Kg.m^2$]

B. Paramètres de la turbine éolienne:

Paramètre	Valeur	Désignation, Unité
R	3	Diamètre d'une pale[m]
G	5.4	Gain du multiplicateur
$J_{Turbine}$	0.042	Moment d'inertie de la turbine [$Kg.m^2$]
$F_{Turbine}$	0.017	Coefficient de viscosité [$N.m.s^{-1}$]
ρ	1.22	Densité de l'air [Kg/m^3]

C. Paramètre de l'onduleur:

Paramètre	Valeur	Désignation, Unité
F_c	1200	Fréquence de coupure de l'onduleur [Hz]
E	570	Tension de bus continu[V]

ANNEXE B : Dimensionnement du régulateur de la vitesse (MPPT) :

Le calcul des régulateurs est basé sur la dynamique en boucle fermée à l'aide du principe de compensation des pôles. La boucle de régulation de la vitesse est présentée par le schéma bloc de la Figure B.1.

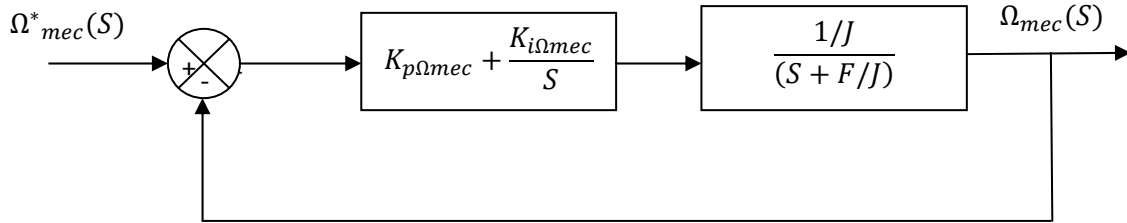


Figure B.1 : Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{S} \left(S + \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \right) \quad (B.1)$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \quad (B.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{mec}^*} = \frac{1}{\frac{J}{K_{p\Omega_{mec}}} S + 1} \quad (B.3)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{mec}^*} = \frac{K}{1 + \tau S} \quad (B.4)$$

$$\tau = \frac{J}{K_{p\Omega_{mec}}} \quad (B.5)$$

Le régulateur de la vitesse Ω_{mec} est :

$$K_{p\Omega_{mec}} = \frac{J}{\tau} \quad (B.6)$$

$$K_{i\Omega_{mec}} = \frac{F}{\tau} \quad (B.7)$$

C. Commande indirecte avec boucle de puissance:

C.1 Réglage des courants rotorique I_{rdq} :

La boucle de régulation des courants rotorique direct et quadrature est présentée par le schéma bloc de la figure C.1

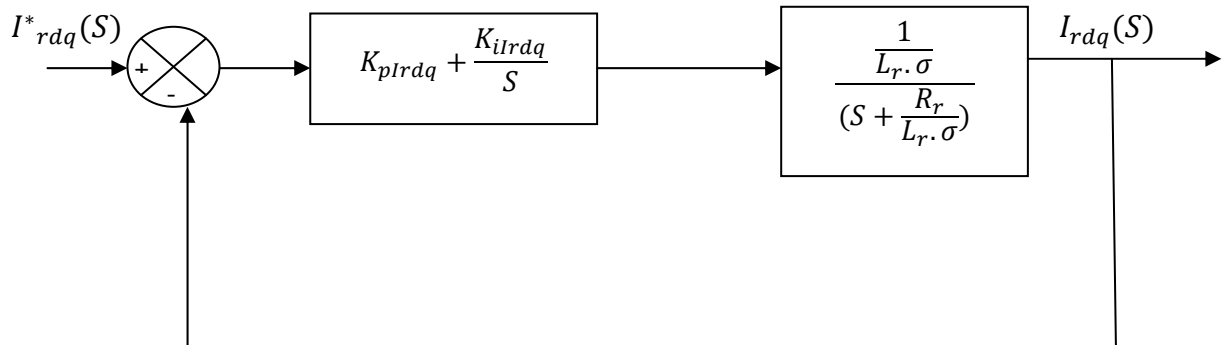


Figure C.2: La boucle de réglage des courants Irdq

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(S) = \frac{K_{pIrdq}}{S} \left(S + \frac{K_{iiIrdq}}{K_{pIrdq}} \right) \quad (C.1)$$

Par compensation :

$$\frac{R_r}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{iiIrdq}}{K_{pIrdq}} \quad (C.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante:

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I^*_{rdq}(S)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pIrdq}} S + 1} \quad (C.3)$$

Le système du premier ordre sa fonction de transfert s'écrit :

$$\frac{I_{rdq}(S)}{I^*_{rdq}(S)} = \frac{K}{1 + \tau_1 \cdot S} \quad (C.4)$$

$$\tau_1 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{pIrdq}} \quad (C.5)$$

Le régulateur du courant rotorique dans les deux axes est:

$$K_{pIrdq} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_1} \quad (C.6)$$

$$K_{ilrdq} = \frac{R_r}{\tau_1} \quad (C.7)$$

C.2 Réglage la boucle des Puissances active et réactive P, Q :

La boucle de régulation des puissances active et réactive est présentée par le schéma bloc de la figure C.2

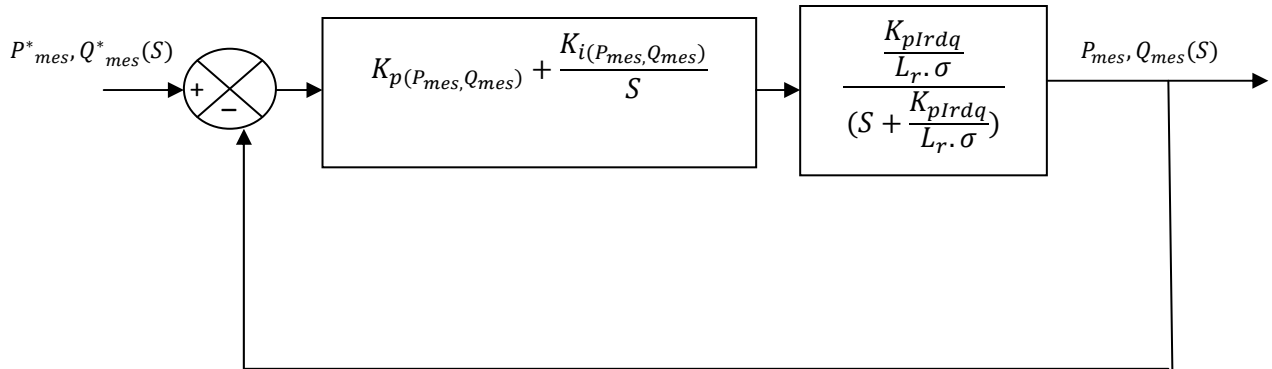


Figure C.2: La boucle de réglage des puissances P,Q

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$R_{pi}(s) = \frac{K_{p(P_{mes}, Q_{mes})}}{S} \left(S + \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(P_{mes}, Q_{mes})}} \right) \quad (C.1)$$

Par compensation :

$$\frac{K_{pirdq}}{L_r \cdot \sigma} = \frac{K_{i(P_{mes}, Q_{mes})}}{K_{p(P_{mes}, Q_{mes})}} \quad (C.2)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{P_{mes}(s), Q_{mes}(s)}{P_{mes}^*(s), Q_{mes}^*(s)} = \frac{1}{\frac{L_r \cdot \sigma}{K_{p(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{pirdq}} S + 1} \quad (C.3)$$

La fonction du transfert du système du premier ordre s'écrit :

$$\frac{P_{mes}(s), Q_{mes}(s)}{P_{mes}^*(s), Q_{mes}^*(s)} = \frac{K}{1 + \tau_2 \cdot S} \quad (C.4)$$

$$\tau_2 = \frac{L_r \cdot \sigma}{K_{p(P_{mes}, Q_{mes})} \cdot K_{pirdq}} \quad (C.5)$$

Le régulateur de la puissance active et réactive est :

$$K_{p(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{L_r \cdot \sigma}{\tau_2 \cdot K_{pirdq}} \quad (C.6)$$

$$K_{i(P_{mes}, Q_{mes})} = \frac{1}{\tau_2} \quad (C.7)$$



Bibliographie

- [1] N. Abu-Tabak, “Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines: modélisation, commande, observation et simulation,” Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2008.
 - [2] S. Metatla, “Optimisation et régulation des puissances d’une éolienne à base d’une MADA,” Mémoire de Magister ENP, Ecole nationale supérieure polytechnique, El Harrach, 2009.
 - [3] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA: contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service,” Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2010.
 - [4] H. Camblong, “Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable,” Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers, Paris, 2003.
 - [5] Y. Zuo and H. Liu, “Evaluation on comprehensive benefit of wind power generation and utilization of wind energy,” in *Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, 2012, pp. 635–638.
 - [6] A. Ducluzaux, “L’énergie électrique d’origine éolienne,” in *Conférence sur l’Énergie*, 2004.
 - [7] T. Azzouz, “Modélisation d’une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider,” 2014.
 - [8] M. Bouaraki, “Etude d’un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable: application sur un site à Tindouf,” Mémoire de Magister, Université M’hamed Bougara, Boumerdes, 2012.
 - [9] B. Cherif, “Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d’une chaîne éolienne à base d’une machine asynchrone à double alimentation,” Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider,” 2014.
 - [10] S. Sumathi, L. A. Kumar, and P. Surekha, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques*. Springer, 2015.
 - [11] R. Kezerli, “Alimentation et commande d’une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux,” Mémoire de Magister, UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE, Alger, 2009.
 - [12] E. Di Lorenzo, S. Manzato, J. Houben, F. Vanhollenbeke, S. Goris, and B. Peeters, “Wind turbine gearbox dynamic characterization using operational modal analysis,” in *Topics in Modal Analysis I*, Volume 7, Springer, 2014, pp. 41–52.
 - [13] A. K. Guediri and D. B. Attous, “Modeling and fuzzy control of a wind energy system based on double-fed asynchronous machine for supply of power to the electrical network,” *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, pp. 1–8, 2015.
 - [14] I. Hamzaoui, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire de magister, ENP Alger, 2008.
 - [15] S. Drid, « Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna 2005.
-

- [16] Frédéric Poitiers, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, École Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003
- [17] Saïd Drid, « Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation », Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 09 novembre 2005.
- [18] Armande Boyette, « Contrôle-commande du générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat, l'Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 11 Décembre 2006,
- [19] A. Fenni, "Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)," Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [20] S. Kammoun, S. Sallem, and M. Ben Ali Kammoun, "Behaviour assessment of DFIG based wind turbine generator while coupling to the grid using a new and practical connection technique," in Renewable Energy Congress (IREC), 2015 6th International, 2015, pp. 1–6.
- [21] M. I. Abdelkader, A. K. Abdelsalam, and A. A. Hossam, "Asynchronous grid interconnection using brushless Doubly Fed Induction Machines: Assessment on various configurations," in Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International, 2014, pp. 406–412.
- [22] W. Y. Liu, B. P. Tang, J. G. Han, X. N. Lu, N. N. Hu, and Z. Z. He, "The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 44, pp. 466–472, 2015.
- [23] I. Colak, G. Fulli, S. Bayhan, S. Chondrogiannis, and S. Demirbas, "Critical aspects of wind energy systems in smart grid applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 52, pp. 155–171, 2015.
- [24] F. J. Ramahaleomiarantsoa, "Diagnostic des systèmes à énergies renouvelables de type éolien," Thèse de Doctorat, Université Pascal Paoli, 2013.
- [25] M. Mohammed, "Détection et Diagnostic des Défauts d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents," Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie, Oran, 2011.
- [26] M. Rodrigues, "Diagnostic et commande active tolérante aux défauts appliqués aux systèmes décrits par des multi-modèles linéaires," Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2005.
- [27] P. M. Ahmed, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle.," Thèse de Doctorat, Université Djilali Liabes, 2015.
- [28] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez, et F. Jurado, « Fuzzy logic based power management strategy of a multi-MW doubly-fed induction generator wind turbine with battery and ultracapacitor », *Energy*, vol. 70, p. 561–576, 2014.
- [29] S. El Aïmani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse du doctorat en génie électrique préparée dans laboratoire L2EP de l'école Centrale de Lille, le 06/12/2004 .
-

- [30] A. TAMAARAT, “Modélisation et commande d’un système de conversion d’énergie éolienne à base d’une MADA,” Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, 2016.
- [31] R. Azaizia, « Etude et commande d’une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », 2008.
- [32] S. Hamza, “Conception par la CAO des parties fixes d’une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l’installation,” Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider; 2013.
- [33] M. Siddo Abdoulaziz, « Étude de Générateur Asynchrone pour l’utilisation dans la production de l’énergie éolienne », PFE d’Ingénieur en électrotechnique, 2007, École National Polytechnique, Algérie.
- [34] B. FARID, “Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone,” Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2006.
- [35] L.Khettache, « Etude et commande d’un système éolien à base d’une machine électrique double alimentée », Mémoire de magister, Université de Batna, 2007.
- [36] A. Ahmed, “Utilisation d’observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d’une machine asynchrone à cage, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider,” 2014.
- [37] A. Boyette, « Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [38] F. Poitiers, “Etude et commande de generatrices asynchrones pour l’utilisation de l’energie eolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Nantes, 2003.
- [39] M. S. Abdoulaziz, « Etude du Générateur Asynchrone pour l’utilisation dans la production de l’énergie éolienne », thèse d’ingénieur, Ingénieure Ecole Natl. Polytech. D’Alger, 2007.
- [40] J. Mavier, “Convertisseurs génériques à tolérance de panne-Applications pour le domaine aéronautique,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2007.
- [41] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA: contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service,” Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2010.
- [42] F. Khelifi, “Surete de fonctionnement et fiabilite des circuits de l’électronique de puissance,” Mémoire de magister, Université M’hamed Bougara, 2008.
- [43] F. W. Fuchs, “Some diagnosis methods for voltage source inverters in variable speed drives with induction machines-a survey,” in Industrial Electronics Society, 2003. IECON’03. The 29th Annual Conference of the IEEE, 2003, vol. 2, pp. 1378–1385.
- [44] B. Lu and S. K. Sharma, “A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 5, pp. 1770–1777, 2009.
- [45] N. Mehala, “Short Winding Fault Detection Using Park’s Vector,” International Journal of Enterprise Computing and Business Systems (Online), vol. 2, no. 2, 2012.
-

- [46] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, "Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in three phase voltage source inverters for AC variable speed drives," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, p. 10–pp.
- [47] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. Silva, and A. M. N. Lima, "Compensation strategies in the PWM-VSI topology for a fault tolerant induction motor drive system," in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on*, 2003, pp. 211–216.
- [48] G. Mohammed, "Diagnostic par Reconnaissance des formes: Application à la machine asynchrone.," *Mémoire de Magister, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou*, 2012.
- [49] B. D. E. Cherif, M. Bendjebbar, and A. Bendiabdellah, "Diagnosis of open-circuit fault in a three phase voltage inverter fed induction motor," in *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2015, pp. 1–4.
- [50] F. Yanhui, Z. Junwei, Q. Yingning, and F. Kai, "Fault tolerance for wind turbine power converter," in *Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2nd IET*, 2013, pp. 1–4.
- [51] H. Polinder, H. Lendenmann, R. Chin, and W. M. Arshad, "Fault tolerant generator systems for wind turbines," in *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*, 2009, pp. 675–681.
- [52] A. Gaillard, S. Karimi, P. Poure, S. Saadate, and E. Gholipour, "A fault tolerant converter topology for wind energy conversion system with doubly fed induction generator," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1–6.
- [53] A. Gaillard, P. Poure, and S. Saadate, "FPGA-based reconfigurable control for switch fault tolerant operation of WECS with DFIG without redundancy," *Renewable energy*, vol. 55, pp. 35–48, 2013.
- [54] Y. Lin, L. Tu, H. Liu, and W. Li, "Fault analysis of wind turbines in China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 482–490, 2016.
-

ملخص:

هذه المذكرة تقدم لمحة عامة عن مختلف أساليب تحمل أعطال محولات الطاقة الساكنة لتوربينات الرياح. الآلة غير المتزامنة ذو تغذية مزدوجة ويستخدم على نطاق واسع في أنظمة تحويل طاقة الرياح. يتم التحكم في هذه الآلة بواسطة التحكم الشعاعي للسيطرة على الطاقة الفاعلة و المتفاعلة المقدمة من لفات الموالي. ودراسة أعطال الدارة المفتوحة و الماس الكهربائي في المحولات الساكنة جانب الدوار. طرق للكشف عن هذه العيوب هي على التوالي طريقة متوسط قيمة تيارات الدوار وطريقة القطب الكهربائي المقدر و المقاس. طوبولوجيا لتحمل الأخطاء في المحولات الساكنة التي يتم استخدامها مع الذراع زائدة عن الحاجة. المحاكات كانت بواسطة برنامج Matlab/Simulink و Simpower. ويتم تحليل العملية مع الاخطاء ويتم اختبار طريقة الكشف و طوبولوجيا تحمل الأعطال و النتائج كانت مشجعة.

كلمات مفتاحية نظام هوائي- الآلة غير المتزامنة ذو تغذية مزدوجة- الترانزستورات ثنائية القطب ذات البوابة المعزولة- الدارة المفتوحة- الماس الكهربائي استمرارية الخدمة- طرق الكشف- التحكم المحتمل للأعطال .

Résumé:

Ce mémoire présente une vue d'ensemble de différentes méthodes tolérantes aux défauts pour les convertisseurs de puissance des éoliennes, La machine asynchrone à double alimentation est utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Cette machine est pilotée par la commande vectorielle afin maîtriser les puissances active et réactive fournies par les enroulements statoriques. Les défauts de circuit ouvert et de court-circuit dans les interrupteurs du convertisseur statique coté rotor sont étudiés. Les méthodes adoptées pour la détection de ces deux défauts sont respectivement la méthode de la valeur moyenne des courants rotoriques et la méthode de la tension de pôle estimée et mesurée. La topologie du convertisseur statique tolérante au défaut employé est celle avec bras redondant. Les simulations sont effectuées sous Matlab/Simulink et simpower. Le fonctionnement avec défauts est analysé et la méthode de détection ainsi que la topologie tolérante aux défauts utilisés sont testés en présentant des résultats encourageants.

Mots clés — éolienne; MADA; IGBT; circuit ouvert; court circuit; Continuité de service ; Méthodes de détection; commande tolérante au défaut.