

N° Ordre...../Faculté/UMBB/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

Benarous Zineb

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique : Commande automatique

Thème

Contribution à l'étude de système éolien et simulation
de l'effet des défauts de capteur sur la machine
asynchrone à double alimentation MADA

Devant le jury :

MEGLOULI	Hocine	MCB	UMBB	Président
TADJER	Sid Ahmed	MCA	UMBB	Examineur
KHEBLI	ABDELMALK	MCB	UMBB	Directeur

Année Universitaire : 2021/2022



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation des procédés et Electrification
Filière : Hydrocarbures
Option : Génie Electrique : Commande Automatique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Contribution à l'étude de système éolien et simulation
de l'effet des défauts de capteur sur la machine
asynchrone à double alimentation MADA

Présenté par :

BENAROUS Zineb

Avis favorable de l'encadreur :

KHEBLI Abdelmalek

signature :

Avis favorable du Président du jury

Pr. MEGLOULI Hocine

Signature :

Cachet et signature

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

À mon cher papa Toufik et ma chère maman Djamila pour leurs prières, leur bénédiction et pour l'amour sincère et profond qu'ils m'éprouvent tout le temps.

À ma chère sœur Rafah, à mon cher oncle Rachid mon aimable frère Mohamed

et à mes amies intimes Liza, Warda ,Ismahane , Chahrazed et Racha, d'avoir été toujours présents à mes côtés dans les moments joyeux et tristes.

Merci beaucoup ma deuxième famille pour tous vos encouragements, votre affection, votre soutien et surtout votre amour inconditionnel.

À tous les membres de ma famille sans exception, je vous aime beaucoup et je vous offre ce modeste travail.

Finalement, la louange est à Allah de par la grâce de qui se réalisent les bonnes

ZINEB

Remerciements

REMERCIEMENTS :

Mes remerciements vont tout premièrement, à Allah le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

On tient à remercier vivement notre encadreur Dr.Khebli Abdelmalk , pour le suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous remercions les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons également à remercier particulièrement, pour leur disponibilité, leur suggestion, leur conseil, leur apport en tout genre dans la réalisation de ce projet. Merci à tous et à toutes.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 01 État de l'Art sur l'Énergie Éolienne	4
1.1. Introduction	4
1.2. Rapport mondial sur l'énergie éolienne	5
1.2.1. Situation du marché de l'énergie éolienne	5
1.2.2. Étude de faisabilité d'un parc éolien et sélection du site à Adrar, Algérie	6
1.3. Notions de base sur l'énergie éolienne	8
1.3.1. Turbulence	8
1.3.2. Rugosité et cisaillement du vent	9
1.3.3. Énergie cinétique du vent	9
1.3.4. Densité de Puissance Éolienne	10
1.3.5. Limite de Betz	10
1.3.6. Vitesse de démarrage & Vitesse de coupure	10
1.4. Principe de conversion de l'énergie éolienne	11
1.5. La Classification des éoliennes :	11
1.5.1. Selon la localisation	11
1.5.2. Selon la disposition géométrique de l'axe du rotor	13
1.5.3. Classification selon la taille	15
1.5.4. Distinction selon le nombre de pales	16
1.5.5. Selon le secteur d'utilisation	17
1.5.6. Selon le mode de régulation de la vitesse de la turbine	17
1.6. Conclusion	26
<i>Chapitre 02 : Modélisation et commande d'une éolienne à vitesse variable, basée sur une machine asynchrone doublement alimentée.....</i>	<i>27</i>
2.1. Introduction	27
2.2. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE LA MADA	28
2.2.1. Structure de la machine	28
2.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA	30
2.2.3. Avantages de la MADA	31
2.2.4. Modélisation mathématique et contrôle vectoriel de la MADA	32
2.2.5. Défauts de la MADA.....	36
2.2.1. Conclusion	37

Chapitre 03 APPROCHES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE CAPTURE ET LEURS EFFETS SUR LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLEMENT ALIMENTEE D'UNE ÉOLIENNE.....	
..... Error! Bookmark not defined.	
3.1. Introduction	38
3.2. Terminologie relative au diagnostic	38
3.3. Les étapes de la procédure de diagnostic	39
3.4. Classification des défauts	40
3.5. Les fonctions de la surveillance	42
3.6. Diagnostic : Il y a généralement trois étapes.....	43
3.7. Surveillance de la machine asynchrone à double alimentation	44
3.8. Résultats de simulation	45
3.9. Conclusion.....	58
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	

Liste des figures

Figure 1. 1: Le moulin a vent	5
Figure 1. 2: La conversion de l'énergie éolienne.....	11
Figure 1. 3: Altaeros énergies developpe une éolienne volante.	12
Figure 1. 4: Les éoliennes de type Darrieus.	13
Figure 1. 5: Aérogénérateur de Savonius.	14
Figure 1. 6: Aérogénérateur à rotor vertical de type H.....	14
Figure 1. 7: Les éoliennes HAWT en amont ; en aval	15
Figure 1. 8: Distinction selon le nombre de pales.....	16
Figure 1. 9:Schéma général en mode autonome pour une éolienne à vitesse fixe, en mode autonome	18
Figure 1. 10: Éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau	19
Figure 1. 11: Puissance électrique variable fournie (décrochage aérodynamique)	20
Figure 1. 12: Génération de puissance électrique nominale par orientation des pales	21
Figure 1. 13:La puissance mécanique générée par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation.....	22
Figure 1. 14: Convertisseurs statiques de fréquence.....	22
Figure 1. 15:Éolienne à vitesse variable basée sur une Machine Asynchrone(MAS).....	23
Figure 1. 16: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.	24
Figure 1. 17: Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA	25
Figure 2. 1: Schéma descriptive de la MADA.....	28
Figure 2. 2: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	28
Figure 2. 3: Les quatre modes de fonctionnement de la MADA.....	31
Figure 2. 4: Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.	32
Figure 2. 5: Les angles du système dans l'espace électrique.....	35
Figure3.1:montre la simulation du système MADA sous l'environnement Matlab/Simulink ..	45
Figure3. 2: Défaut statorique additifs courant.....	46
Figure3. 3: Défaut statorique multiplicatif courant.....	46
Figure3. 4: Défaut statorique additif voltage.....	46
Figure3. 5: défaut statorique multiplicatif voltage	47
Figure3. 6: Défaut rotorique additif courant	47

Figure3. 7: Défaut rotorique multiplicatif courant	47
Figure3. 8: Défaut rotorique additif voltage.....	48
Figure3. 9: Défaut rotorique multiplicatif voltage	48
Figure3. 10: Défaut DC Link additif courant	48
Figure3. 11: Défaut DC Link multiplicatif courant	49
Figure3. 12: Défaut DC Link additif voltage	49
Figure3. 13: Défaut DC Link multiplicatif voltage	49
Figure3. 14: Défaut glisseur additif courant	50
Figure3. 15: Défaut glisseur multiplicatif courant	50
Figure3. 16: Défaut glisseur additif voltage	50
Figure3. 17: Défaut glisseur multiplicatif voltage	51
Figure3. 18: Réponse de MADA sans défaut	51
Figure3. 19: Consigne variable	52
Figure3. 20: Défaut de $\pm 10\%$ de la consigne	52
Figure3. 21: Défaut de $\pm 5\%$ de la consigne	53
Figure3. 22: Défaut de $\pm 2\%$ de la consigne	53
Figure3. 23: Défaut multiplicatif du gain 0.8	54
Figure3. 24: Défaut multiplicatif du gain de 0.9	54
Figure3. 25: Défaut multiplicatif du gain de 1.2	54
Figure3. 26: Défaut multiplicatif du gain de 1.5	55
Figure3. 27: Défaut multiplicatif du gain de 1.9	55
Figure3. 28: Défaut additif du -5% de la consigne	56
Figure3. 29: Défaut additif du 10% de la consigne	56
Figure3. 30: Erreur de défaut multiplicatif du gain de 0.5	57
Figure3. 31: Défaut multiplicatif du gain de 1.9	57

Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.....	16
Tableau 1. 2: récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.	17

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

WWEA : l'Association mondiale de l'énergie éolienne

GW :(gigawatts)

MADA : La machine asynchrone à double alimentation

MAS : la machine synchrone à double alimentation

AC/AC : Courant Continu/Courant Continu

VAWT : Vertical Axis Wind Turbine

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

FSWT : Fixed Speed Wind Turbine

GAS : générateurs asynchrones à cage

FSWT : Fixed Speed Wind Turbine

PWM : Pulse Width Modulation

DPE : Densité de Puissance Éolienne

l'IFAC : International Federation of Automatic Control

FDI : Fault Detection and Isolation

MMF: la force magnétomotrice

AC/AC : Courant Alternatif/ Courant Alternatif

Symbole

GW : unité de mesure d'énergie qui correspond à la puissance d'un gigawatt actif pendant une heure.

Tv : la turbulence de la vitesse du vent

σv : la déviation standard de la vitesse du vent

n : le nombre d'échantillons

vi : vitesse du vent d'un échantillon

v_{10min} : la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes sur un échantillon donné.

ρ : la densité de l'air sec

S : est la surface balayée par le rotor de l'éolienne

v : la vitesse du vent exprimée en (m/s).

Ω_{mec} : la vitesse de rotation

Ω_s : la vitesse de synchronisme

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} sont les tensions d'alimentation des phases du stator S_a, S_b, S_c ,

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} sont les courants des phases statoriques S_a, S_b, S_c

V_{ra}, v_{rb}, v_{rc} sont les tensions des phases du rotor R_a, R_b, R_c

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} sont les courants des phases du rotor R_a, R_b, R_c

S : le stator de la machine

r :le rotor de la machine

R_s :la résistance d'une phase statorique

L_s : l'inductance d'une phase statorique

R_r : la résistance d'une phase rotoriques

L_r : l'inductance d'une phase rotoriques,

M_s, M_r sont respectivement le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques et rotoriques

M_{sr} : l'inductance mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor

P_s : la puissance de stator

P_r : la puissance de glissement

$[L_s]$: la matrices des inductances statoriques

$[L_r]$: la matrices des inductances rotoriques

θ_s et θ_r sont les angles électriques

ω_s :la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique (S, abc),

ω_r : la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique (R, abc),

Ω : la vitesse angulaire de la machine [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

Ω_{mec} : la vitesse mécanique de la MADA en [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

INTRODUCTION GENERALE

Compte tenu de l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et des problèmes environnementaux causés par l'émission de gaz à effet de serre lors de l'utilisation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent encore être développées. Parmi celles-ci, on peut citer l'énergie nucléaire de fission, qui ne dégage directement aucun gaz carbonique. Cependant, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux, sa radioactivité reste élevée pendant de nombreuses années et les risques résultant du fonctionnement des centrales nucléaires en raison de catastrophes naturelles ou d'incidents humains sont irréversibles.

Les énergies renouvelables peuvent être une autre alternative qui permet de produire une électricité propre et durable, en dépendant moins des ressources conventionnelles, à condition d'accepter les fluctuations naturelles et aléatoires. Aujourd'hui, après l'eau. Les faibles coûts de production de l'énergie éolienne la rendent plus compétitive. Elle contribue également à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Au cours de la première décennie du 21^e siècle, l'énergie éolienne a pris une importance croissante dans le monde, d'année en année. En effet, Selon les chiffres publiés par l'Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), Après l'augmentation de 92,7 GW enregistrée en 2020, le parc éolien mondial s'est accru de 97,3 GW (gigawatts) en 2021, il s'agit d'un nouveau record de croissance .donc La puissance cumulée de toutes les éoliennes en service sur notre planète dépasse maintenant les 840 GW. Une capacité qui leur permet de fournir plus de 7% de la consommation mondiale d'électricité.

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est de capter l'énergie cinétique du vent et de la transformer en énergie électrique pour alimenter les consommateurs en électricité et pour la stocker dans des batteries ou de l'injecter dans le réseau de distribution électrique.

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable la plus importante et prometteuse dans le monde principalement parce qu'elle est considérée comme énergie non polluante et économiquement viable.car son fonctionnement et son utilisation n'émettent pas de gaz à effet de serre. Cependant, la localisation éloignée des installations éoliennes, le comportement difficilement imprévisible et intermittent du vent les hauteurs élevées des

nacelles (150 m et plus), les coûts onéreux de la maintenance réactive de ces installations, le manque de règles et critères de maintenance prédictive et, la gêne des riverains et le danger pour les espèces animales volantes à proximité, sont autant de problèmes qui freinent la gestion le développement de ces systèmes énergétiques. Alors, une surveillance rigoureuse des éoliennes s'avère importante et nécessaire, afin d'obtenir un rendement énergétique optimal.

Ce suivi doit être capable de détecter, localiser et identifier les défaillances pour décider les actions de maintenance à entreprendre. Ces différentes étapes, constituant le principe de base du diagnostic des défauts, doivent être exécutées aussi rapidement que possible.

Actuellement, les fermes éoliennes utilisent des aérogénérateurs à vitesses variables avec des Machines Asynchrones Doublement Alimentées MADA.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire car elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types de vitesse variable son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que génératrice ou moteur a connu une croissance spectaculaire ces dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé pour redresser-onduler les courants alternatifs du rotor une fraction de puissance nominale de celle du générateur, ce qui réduit son coût par rapport aux topologies concurrentes.

Un générateur à induction doublement alimenté est basé sur une machine à induction à rotor bobiné. Les enroulements triphasés du rotor sont alimentés par une tension dont l'amplitude et la fréquence peuvent être fréquence contrôlables à l'aide d'un convertisseur AC/AC. Par conséquent, la vitesse peut varier tandis que la fréquence de fonctionnement du côté stator reste constante. En fonction de la plage de vitesse requise, la puissance du convertisseur de rotor est généralement faible par rapport à la puissance de la machine. Par conséquent, une MADA est préférable pour les applications d'éoliennes à vitesse variable.

Comme toute autre machine électrique la machine asynchrone, elle peut présenter des défaillances qui peuvent être causées par : Causes externes de défauts : Environnementales (Température, Humidité, Encrassement), Mécaniques (, Surcharge, Pulsation de couple, Mauvais montage) ; Électriques (Transitoire de tension, Fluctuation de tension, Déséquilibre de tension). Des causes internes de défauts : Électriques (Rupture des barres, Défauts statoriques, Défauts d'isolement), Mécaniques (Frottement Rotor/Stator, Excentricité, Défauts des Roulements...).

Les machines asynchrones doivent être dotées de systèmes de diagnostic sûrs et fiables parce qu'une quelconque défaillance, même la plus petite, peut mener à l'endommagement de la machine. Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés aux méthodes de diagnostic à base de modèles de la machine asynchrone doublement alimentée utilisée dans une éolienne. En conséquence, le mémoire est composé de trois chapitres structurés de la manière suivante :

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés sur l'Effet des défauts de capture sur la machine asynchrone doublement alimentée utilisée dans une éolienne. En conséquence, le mémoire est composé de trois chapitres structurés de la manière suivante :

Le premier chapitre : Présente l'état de l'art concernant l'énergie éolienne dans le monde, il introduit aussi les notions de base relatives à l'énergie éolienne, il décrit le principe de fonctionnement des éoliennes et présente les différents types. En outre, une classification des éoliennes

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et commande d'une éolienne à vitesse variable, basée sur une machine asynchrone doublement alimentée, il décrit une Description du fonctionnement de la MADA, il définit la Structure de la machine et les Modes de fonctionnement de la MADA. Il décrit aussi une Modélisation mathématique et contrôle vectoriel de la MADA.

Le troisième chapitre est consacré à l'approche de diagnostic des défauts simples et simultanés, leurs effets sur la Machine Asynchrone Doublement Alimentée d'une Éolienne

D'autre part, ce chapitre est consacré aussi sur la simulation en utilisant le logiciel MATLAB & Simulink de toute la chaîne de conversion éolienne fonctionnant à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et avoir l'effet des défauts sur cette machine.

Ce travail est clôturé par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs.

Chapitre 01 :

État de l'Art sur l'Énergie Éolienne

1.1. Introduction

L'éolienne est l'une des premières sources d'énergie non animale utilisées par l'homme. Les turbines éoliennes ont été depuis plus de 1 000 ans. Les premières éoliennes étaient extrêmement simples ; elles tournaient à un rythme proportionnel à la vitesse du vent. Elles étaient utilisées pour pomper l'eau, moudre du grain, couper du bois et effectuer une myriade d'autres tâches. Dans ces cas, la variation de la vitesse avait rarement un impact sur l'efficacité du moulin. L'efficacité du moulin à vent au point de justifier les complications liées au contrôle étroit de la vitesse de rotation. Permettre aux machines de fonctionner à une vitesse variable était en fait très avantageux car cela augmentait considérablement l'énergie totale qui pouvait être extraite de l'éolienne.

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation s'effectue en plusieurs étapes : la transformation de l'énergie par les pales, l'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur, la production d'électricité par le générateur. L'électricité produite est ensuite acheminée vers le réseau électrique et dans ce cas elle est traitée par le convertisseur et le transformateur ou bien elle est consommée localement ou encore elle alimente des charges isolées (sites isolés). L'énergie éolienne peut être combinée avec d'autres sources d'énergie renouvelables, notamment le solaire. Ce type de système est connu sous le terme "système énergétique hybride", nécessitant un dimensionnement optimal tenant compte du potentiel du site et sur le plan économique [1][2].



Figure 1. 1: Le moulin a vent

1.2. Rapport mondial sur l'énergie éolienne

1.2.1. Situation du marché de l'énergie éolienne

L'industrie éolienne mondiale a connu sa deuxième meilleure année en 2021, avec près de 94 GW de capacité ajoutée au niveau mondial, à la traîne de la croissance record de 2020, de seulement 1,8 %. L'Europe, l'Amérique latine et l'Afrique et le Moyen-Orient ont connu des années record pour les nouvelles installations terrestres, mais le total des installations éoliennes terrestres en 2021 était encore inférieur de 18 % à celui de l'année précédente. Cette baisse s'explique principalement par le ralentissement de la croissance de l'éolien terrestre sur les deux plus grands marchés mondiaux de l'énergie éolienne, la Chine et les États-Unis. 21,1 GW de capacité éolienne offshore ont été mis en service l'année dernière, soit trois fois plus qu'en 2020, faisant de 2021 la meilleure année de l'histoire de l'éolien offshore, portant sa part de marché dans les nouvelles installations mondiales à 22,5 % en 2021.[3].

La Chine, championne toute catégorie de l'éolien mondial

Les « empire des éoliennes » a constitué 80 % de la capacité éolienne offshore ajoutée dans le monde en 2021, portant ses installations éoliennes offshore cumulées à 27,7 GW. Il s'agit d'un niveau de croissance stupéfiant, car il a fallu trois décennies à l'Europe

pour porter sa capacité éolienne offshore totale à un niveau similaire. La capacité éolienne mondiale totale atteint désormais 837 GW, ce qui permet au monde d'éviter plus de 1,2 milliard de tonnes de CO₂ par an, soit l'équivalent des émissions annuelles de carbone de l'Amérique du Sud. Les activités de vente aux enchères d'énergie éolienne ont rebondi en 2021 avec plus de 88 GW de capacité éolienne attribuée dans le monde, soit 153 % de plus qu'en 2020 [4].

Les États-Unis :

En tant que 2^e marché mondial pour l'énergie du vent, les États-Unis ont également connu une croissance en 2021. La capacité éolienne installée aux USA est maintenant proche de 135 GW (soit 16 % du parc mondial).

Allemand :

Loin derrière ces deux leaders, le parc éolien allemand reste à la 3^e place en termes de puissance cumulée, avec 64 GW, devant l'Inde (40 GW) et l'Espagne (28 GW).

En Espagne :

Le pays est devenu le deuxième d'Europe derrière l'Allemagne et le cinquième pays au monde en matière de puissance éolienne installée. Selon le gestionnaire du réseau électrique espagnol, l'éolien est devenu la première source d'électricité dans le pays l'an dernier avec 23 % contre 21 % pour le nucléaire et 17 % pour le gaz. L'Espagne dispose d'un grand potentiel éolien et pourrait, à terme, devenir le grenier énergétique de l'Europe.

La France :

La France a mis en service 1,1 GW de nouvelles capacités en 2021. Cela représente une augmentation de 6,3 % de la puissance de ses parcs. Le pays, qui veut accélérer l'éolien en mer, a lancé il y a quelques semaines les tout premiers appels d'offre en Méditerranée, où deux parcs offshore flottants devraient voir le jour d'ici à 2030. Ces deux sites permettront d'alimenter en électricité un million de personnes selon le Premier ministre Jean Castex.

1.2.2. Étude de faisabilité d'un parc éolien et sélection du site à Adrar, Algérie

En Algérie, la première tentative de raccordement d'éoliennes au réseau de distribution d'électricité date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW

sur le site du Grand Vent (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été initialement installé à St-ALBAN en Angleterre. Ce modèle à deux pales pneumatique, à pas variable, d'une hauteur de 30 m et d'un diamètre de 25 m a été acheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie, démonté et installé en Algérie [5].

Par la suite, de nombreux autres aérogénérateurs, de plus petite puissances, ont été installés en différents endroits, notamment pour alimenter des localités isolées ou des zones d'accès difficile telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des aérogénérateurs n'étant pas encore mature, ces expériences n'ont pas toujours été concluantes. Il est à noter que ce constat était également valable même au niveau international. Mais après le premier choc pétrolier, des investissements importants ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 1980. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et de plus en plus grandes. Ainsi, la taille de la plus grande éolienne qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 a atteint, en 2014, une puissance de 8 MW, avec un diamètre de 164 m (VESTAS offshore). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations plus de 150 mètres. Sinon, les grandes éoliennes sont généralement développées et installées dans des zones assez ventées. Cependant, en raison de la saturation des sites terrestres potentiellement exploitables, ces dernières années ont vu le développement de machines à faible vent. Pour cette catégorie d'éoliennes dont la hauteur du mât est plus élevée, les pales sont plus grandes et les générateurs électriques plus petits. La puissance éolienne totale installée dans le monde, qui était de l'ordre de 6 GW en 1996, est passée à 336 GW en juin 2014. Sur Algérie, un premier parc éolien d'une capacité de 10 MW a été implanté à Adrar et mis en service en 2014. Situé à Adrar et mis en service en juin 2014[5].

L'énergie électrique fournie par ce parc est injectée dans le réseau local. La pénétration de l'énergie éolienne représenterait environ 5%. La puissance éolienne totale installée en Algérie est donc actuellement insignifiante. Cependant, le Ministère de l'Energie et des Mines a prévu, dans son nouveau programme d'énergies renouvelables, d'installer d'autres parcs éoliens d'une capacité totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) pour

atteindre 5010 MW en 2030. Il est à noter que ce nouveau programme vise à la fois les installations connectées au réseau électrique et les petites éoliennes, c'est-à-dire les petites éoliennes pour le pompage de l'eau ou de l'électricité l'alimentation en électricité de localités isolées, à l'instar des développements dans le monde où les installations de petites éoliennes ont augmenté ces dernières années.

En effet, à la fin de 2012, celles-ci ont atteint le nombre de 806 000, ce qui représente environ 35% de l'ensemble des éoliennes installées. Les petites éoliennes actuelles sont pour plupart des machines à axe horizontal à 3 pales, équipées d'alternateurs à aimant permanent et d'une direction passive. Mais il existe aussi des aérogénérateurs à axe vertical (2 à 5% des petites éoliennes installées). Celles-ci sont plus adaptées aux installations urbaines où la vitesse du vent est faible et les turbulences importantes [6].

1.3. Notions de base sur l'énergie éolienne

1.3.1. Turbulence

Tout parcours chaotique ou irrégulier produit dans un fluide. Le site turbulence du vent est défini comme des changements soudains de la vitesse et de la direction de celui-ci. En général, la turbulence apparaît dans les zones proches des obstacles tels que des arbres, des bâtiments, des falaises et près des éoliennes.

Les turbulences qui se produisent à proximité des éoliennes ont un impact négatif sur la durée de vie des composants mécaniques de ces installations, tels que les engrenages et les moteurs composants mécaniques de ces installations tels que les boîtes de vitesse, les pales et les roulements.

Ces phénomènes peuvent également réduire le rendement énergétique produit par les éoliennes car ils ne permettent pas aux pales de pointer vers le vent. En outre, les turbulences accélèrent l'usure des pales d'éoliennes en raison de l'augmentation de la charge dynamique à laquelle elles sont soumises.

La turbulence de la vitesse du vent est calculée en divisant l'écart type de la vitesse du vent par rapport à la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes, par la vitesse moyenne du vent, selon la formule suivante :

$$Tv = \frac{\sigma v}{mv}$$

$$\sigma v = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot (v_i - \overline{v_{10min}})^2}$$

D'où : Tv est la turbulence de la vitesse du vent ; σv est la déviation standard de la vitesse du vent ; $\overline{mv}$ est la moyenne de la vitesse du vent ; n est le nombre d'échantillons ; v_i : vitesse du vent d'un échantillon et v_{10min} la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes sur un échantillon donné.

1.3.2. Rugosité et cisaillement du vent

La rugosité fait référence à l'état de la surface qui influence la vitesse du vent. En général, une grande rugosité ralentit évidemment la vitesse du vent, cela se produit dans les forêts, dans les dans les forêts, dans les paysages d'herbes hautes et dans les grandes villes. Pour évaluer le potentiel éolien d'un site donné, deux notions sont considérées : la classe de rugosité et la longueur de la rugosité. En ce qui concerne la classe de rugosité, la surface de la mer est classée '0', les pistes d'atterrissage en béton et les paysages où l'herbe est pâturée par des moutons, ont une classe de rugosité égale à "0,5" et les terres agricoles cultivées, avec de rares maisons et clôtures, séparées les unes des autres par quelques 500 m, appartiennent à la classe de rugosité "2". La longueur de rugosité fait référence à la hauteur au-dessus du sol à laquelle la vitesse moyenne du vent devrait théoriquement être nulle.

Le cisaillement du vent est dû à la friction du vent contre la surface de la terre, ce qui entraîne une variation de la vitesse du vent. Par conséquent, lorsqu'on se trouve à une altitude élevée, l'influence du 10 de la surface terrestre sur le vent est limitée.

1.3.3. Énergie cinétique du vent

C'est la quantité d'énergie contenue dans la ressource éolienne et susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne, calculée en (kWh). Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, c'est-à-dire la masse d'air par unité de volume, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. Ainsi, la puissance du vent est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

Avec :

ρ est la densité de l'air sec, égale à **1,225 en kg/m³** à une température de **15° C** et à pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, S est la surface balayée par le rotor de l'éolienne, dans le cas d'une surface circulaire $S = \pi \cdot R^2$, R est le rayon du rotor mesuré en mètres (**m**), v est la vitesse du vent exprimée en (**m/s**).

D'après la formule, l'énergie du vent récupérable par l'éolienne varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent et aussi avec l'accroissement de la surface balayée par le rotor et par conséquent par la longueur des pales du rotor. De plus, la densité atmosphérique dépend de la température, de l'humidité et de l'altitude.

1.3.4. Densité de Puissance Éolienne

Elle est exprimée uniquement en fonction de la vitesse du vent et de la densité atmosphérique et il permet d'évaluer le potentiel éolien disponible sur un site donné. Il est calculé en watts par mètre carré par l'équation suivante :

$$DPE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3$$

1.3.5. Limite de Betz

Il s'agit de la limite théorique, qui détermine la quantité d'énergie cinétique maximale du vent qu'une éolienne est capable de convertir en énergie mécanique rotative. Selon la loi de Betz, formulée par le physicien allemand Albert Betz pour la première fois en 1919, une éolienne ne peut convertir plus de 16/27 (59,3 %) de l'énergie cinétique du vent en énergie rotative.

1.3.6. Vitesse de démarrage & Vitesse de coupure

Il s'agit de la vitesse du vent à laquelle l'éolienne est censée démarrer, normalement elle est de 3 à 5 **m/s**. L'éolienne s'arrête automatiquement lorsque la vitesse du vent atteint une valeur supérieure à 25 **m/s** afin de ne pas endommager l'éolienne et son environnement extérieur. Cette vitesse d'arrêt de l'éolienne est appelée vitesse de coupure.

1.4. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Son principe de fonctionnement est simple et peut être résumé comme suit: Sous l'effet du vent, l'hélice, aussi appelée rotor, se met en marche et ses pales tournent. L'énergie mécanique ainsi produite est convertie au moyen d'un arbre principal lent, d'un multiplicateur (dans la majorité des cas) et d'un générateur d'énergie électrique, transportée et injectée dans le réseau électrique (éoliennes électriques (éoliennes raccordées au réseau) ou consommée localement ou stockée dans des batteries dans le cas d'éoliennes à usage autonome. utilisées dans des sites isolés.

Les principaux composants d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne, connecté au réseau électrique sont présentés dans la figure suivante :

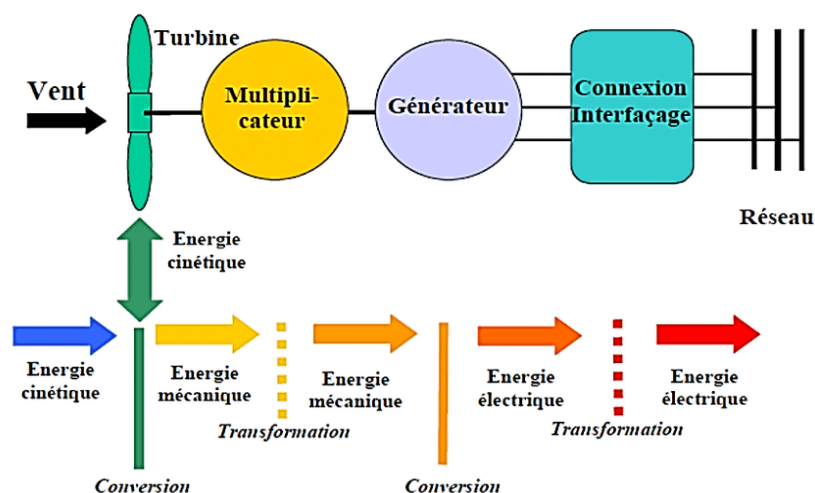


Figure 1. 2: La conversion de l'énergie éolienne

1.5. La Classification des éoliennes : La classification des éoliennes peut se faire selon différents critères

1.5.1. Selon la localisation

✓ Les éoliennes volantes " Farshore "

L'éolienne volante a la particularité de produire de l'électricité plus loin des côtes, là où l'eau est beaucoup plus profonde et où les vents marins sont plus forts et plus stables. Cette

structure est caractérisée par sa facilité d'installation puisqu'elle ne nécessite pas la construction de fondations ni d'utiliser des navires comme pour l'énergie éolienne installée. En outre, les problèmes visuels et maritimes se posent étant donné la distance importante de la côte (entre 15 et 22 km). Dans cette catégorie, deux grandes familles de prototypes ont été développées par les Etats-Unis et par plusieurs autres pays. Le premier type d'éolienne volante possède plusieurs rotors et ressemble dans son apparence à celle d'un hélicoptère, attaché par un câble au sol. Par des mouvements circulaires à environ 300 mètres de hauteur, de l'électricité est produite, puis transférée au sol par le câble. Le deuxième prototype se présente sous la forme d'un grand ballon rempli d'hélium avec des pales rotatives à une altitude de 600 mètres, où les vents sont encore plus forts. En plus de la production d'électricité, cette éolienne peut être employée dans une variété de services. En effet, elle pourrait être utilisée pour la surveillance et la communication par exemple. Cette éolienne est principalement destinée aux particuliers, car elle ne produit uniquement une faible puissance (quelques kW)[8].



Figure 1. 3: Altaeros énergies développe une éolienne volante

✓ Les éoliennes terrestres « Onshore » et en pleine mer « Offshore »

En considérant le critère de l'emplacement géographique, on peut distinguer deux types d'éoliennes : Les éoliennes terrestres "Onshore" et les éoliennes offshore "Offshore". Ces deux types ont la même apparence et le même principe de fonctionnement, mais se distinguent par la nature des fondations. L'éolienne " Onshore " est installée sur terre tandis que l'éolienne " offshore " est soit coulée et ancrée au fond de la mer sur une fondation dite "posée", soit montée sur une fondation simplement reliée au fond de la

mer par des lignes d'ancrage, cette fondation est dite " flottante ".technologie de l'éolien offshore peut produire jusqu'à 2 fois plus d'électricité qu'un éolienne terrestre, car le vent souffle beaucoup plus fort en mer et la productivité est donc accrue. Mais, en raison des conditions maritimes difficiles, les mâts des éoliennes en mer, doivent résister à la force des vagues et des courants. C'est pourquoi il faut avant tout penser à leur protection contre la corrosion et à leur raccordement électrique via des câbles sous-marins. Ces facteurs, entraînent des coûts de construction, d'installation et de maintenance beaucoup plus élevés en mer que sur terre [9].

1.5.2. Selon la disposition géométrique de l'axe du rotor

- ✓ **Éolienne à axe vertical** : En anglais VAWT : Vertical Axis Wind Turbine, ces aérogénérateurs sont les premiers à être utilisés pour la production d'énergie électrique. En fonction de leurs caractéristiques aérodynamiques, ces éoliennes peuvent être classées en trois grandes familles :
- ✓ **Les éoliennes de type Darrieus, basées sur la " portance "** : Le fonctionnement de ce type d'éoliennes est basé sur la génération d'un couple moteur provoquant la rotation de l'appareil, suivant des forces de direction et d'intensité variable, exercées sur le profilé placé dans la direction du flux d'air. La rotation de l'éolienne ne peut se faire seule, elle doit être initiée par un dispositif externe. Dans le cas d'une éolienne connectée au réseau, cela ne pose pas de problème, car la machine est peut être utilisée comme un moteur qui absorbe le courant du réseau pour démarrer l'éolienne [10].

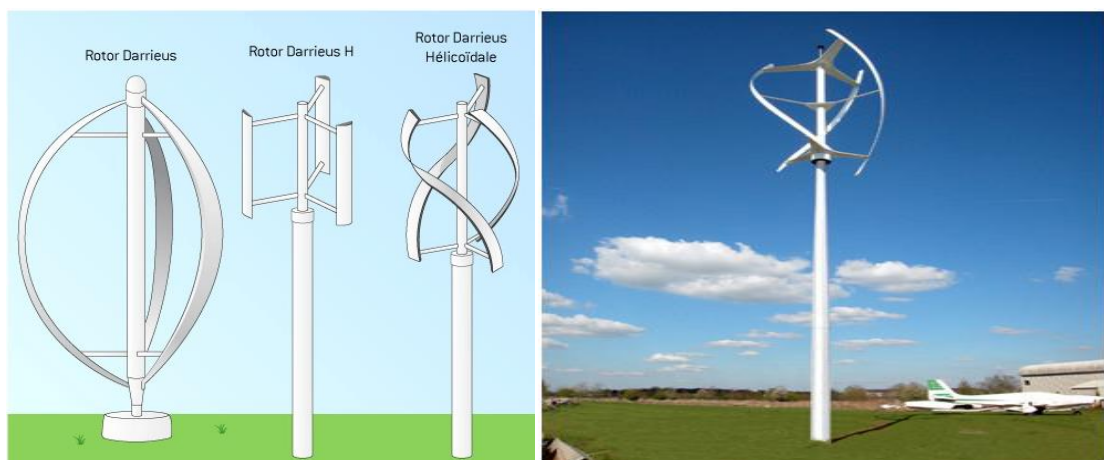


Figure 1. 4: Les éoliennes de type Darrieus.

- ✓ **Les éoliennes à rotor Savonius** : le fonctionnement de ces dispositifs est basé sur le principe de la traînée différentielle. Dans ce cas, le couple moteur entraînant le générateur est obtenu par les forces d'intensité différente, exercées par le vent sur chacune des faces concaves et convexes de la structure.

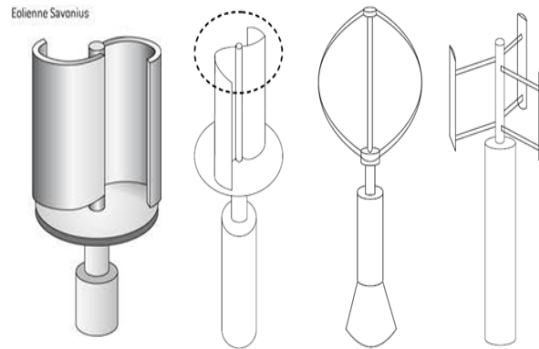


Figure 1. 5: Aéro-générateur de Savonius

- ✓ **Un troisième type d'éoliennes à axe vertical** est connu sous le nom de rotor en "H" ou le rotor de Musgrove. Cette désignation s'explique par la forme en " H " des pales ou des pales de l'éolienne. Ce type d'aéro-générateur est capable de démarrer tout seul et commence à produire énergie lorsque le vent souffle à une faible vitesse de l'ordre de $1[m/s]$. Elle ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste aux vents forts.

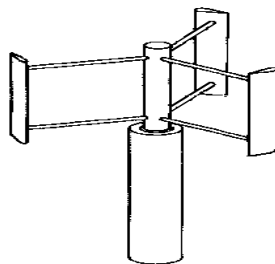


Figure 1. 6: Aéro-générateur à rotor vertical de type H

La structure de l'éolienne à rotor vertical offre les avantages suivants :

- L'accessibilité au générateur et au multiplicateur puisqu'ils sont placés directement sur le sol, ce qui rend la tâche de maintenance et d'entretien facile.
- Le dispositif est symétrique et le vent vient de toutes les directions sans qu'il soit nécessaire d'orienter le rotor dans le vent.

Cependant, les principaux inconvénients d'une telle structure sont les suivants :

- Faible vitesse du vent à proximité du sol.
- Démarrage non automatique de l'éolienne.
- Occupation importante du sol pour les fortes puissances.
- Faible rendement et fortes fluctuations de puissance

Les éoliennes à axe horizontal : en anglais (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) ; l'idée de leur conception est inspirée de la technologie ancestrale des moulins à vent. Le rotor de l'éolienne est constitué de pales dont le profil ressemble à celui des ailes d'un avion, sauf que le principe de la portance utilisé dans ce cas permet de générer un couple moteur provoquant la rotation de la génératrice qui produit de l'électricité et non de la maintenir en place l'avion en vol [11]. Sur fonction du nombre de pales, une éolienne de type HAWT peut être monopale, bipale, tripale ou multi-pales.

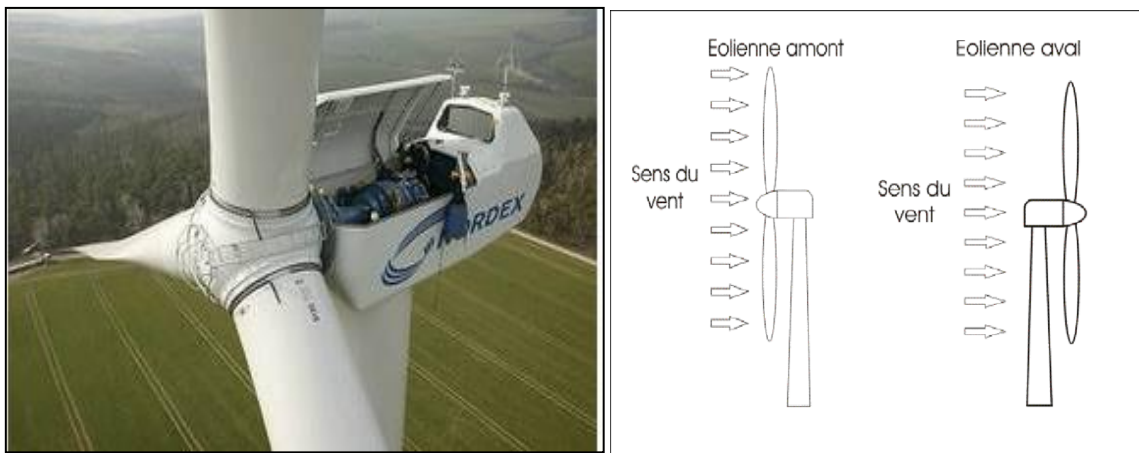


Figure 1. 7: Les éoliennes HAWT en amont ; en aval

Enfin, la majorité des éoliennes actuellement installées sont à axe horizontal avec le rotor en amont.

1.5.3. Classification selon la taille

En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, il est de règle que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D . Dans ce cas, il existe un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance [12].

Tableau 1. 1: Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.1-0.4
Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.4-2
Domestique	3-10	7-79	2-30
Petite commerciale	10-20	79-314	30-120
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	120-750
Grande commerciale	50-100	1 963-7854	750-3 000
Géante commerciale	100-170	7 854-22 686	3 000-8 000

1.5.4. Distinction selon le nombre de pales : On peut faire une distinction entre les éoliennes selon le nombre de pales comme suit :



a-Éolienne mono pale b- Eolienne bipale c- Eolienne a 3 pales d- éolienne multipale

Figure 1. 8: Distinction selon le nombre de pales

Dans le cas des éoliennes à axe horizontal, la plupart des éoliennes ont 3 pales. En fait, c'est le meilleur compromis entre différentes contraintes. Une éolienne à 3 pales (ou plus) tourne plus régulièrement qu'une éolienne à 1 ou 2 pales, on a un meilleur équilibre du rotor. D'un point de vue esthétique, les effets de battements visuels sont plus importants pour les éoliennes de moins de 3 pales. L'efficacité aérodynamique,

c'est-à-dire la capacité à convertir l'énergie du vent en énergie mécanique (et donc, à terme, en électricité), est équivalente à 2 ou 4 pales. Il augmente significativement à partir de 5. Le seul avantage d'avoir une éolienne à deux pales plutôt qu'à trois est qu'elle sera moins chère, mais qu'elle tournera moins régulièrement, ce qui est synonyme de durée de vie plus courte. On ne monte pas au-delà de 4 pales à cause de la diminution de la résistance mécanique : en effet, la " corde " des pales diminuent avec le nombre de pales [13].

Tableau 1. 2: récapitulatif des propriétés des éoliennes à axe horizontal en fonction du nombre de pales.

Nombre de pâles	1	2	3	4	5
Équilibre du rotor	-	-	+	+	+
Esthétique (effet de battement visuel)	-	-	+	+	+
Rendement aérodynamique	-	=	=	=	+
Bruit et fatigue	-	-	+	+	+
Tenue mécanique	+	=	=	-	-

1.5.5. Selon le secteur d'utilisation

On distingue deux typologies d'installations :

- Industrielles : lorsqu'on parle des grands parcs éoliens ou aussi « fermes éoliennes », raccordés au réseau électrique,
- Domestiques pour les petites éoliennes installées chez les particuliers pour le pompage ou l'électrification.

1.5.6. Selon le mode de régulation de la vitesse de la turbine [13]

En fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, les éoliennes sont classées en deux types :

a. **Les éoliennes à vitesse fixe** : Appelées en anglais (FSWT : Fixed Speed Wind Turbine), elles sont les premières éoliennes qui ont été conçues. Elles sont caractérisées par le fait que le rotor de l'éolienne tourne toujours à la même vitesse angulaire quelle que soit la vitesse du vent, la vitesse angulaire dépend essentiellement du profil des pales et de la fréquence du réseau dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe connectée au

réseau électrique. Presque toutes les éoliennes utilisent des générateurs asynchrones à cage (GAS)[14] .

Cependant, le générateur synchrone est occasionnellement utilisé étant donné les inconvénients majeurs qu'il présente dans un tel système. Pour l'éolienne à vitesse fixe basée sur une machine asynchrone à cage d'écureuil, la vitesse de rotation (Ω_{mec}) est étroitement liée à la fréquence des courants des enroulements du stator. La machine asynchrone à cage ayant un nombre fixe de paires de pôles, fonctionne donc sur une plage de vitesse très restreinte où le glissement est de l'ordre de quelques %. Quant à la machine synchrone, elle ne peut fonctionner qu'à une vitesse fixe. Ces éoliennes peuvent fonctionner selon deux modes distincts :

- **En mode de fonctionnement autonome** : dans ce cas, le rotor du générateur est couplé mécaniquement à l'arbre de transmission de l'éolienne via un multiplicateur de vitesse, qui entraîne le générateur à une vitesse constante grâce à un système mécanisme d'orientation des pales. Dans cette configuration, l'introduction d'un système de stockage est importante notamment en cas de non disponibilité des générateurs et également en cas de faible vitesse du vent ; de plus, une batterie de condensateurs est souvent utilisée pour fournir la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine.

La figure ci-dessous montre la structure de l'éolienne à vitesse fixe utilisée en mode isolé :

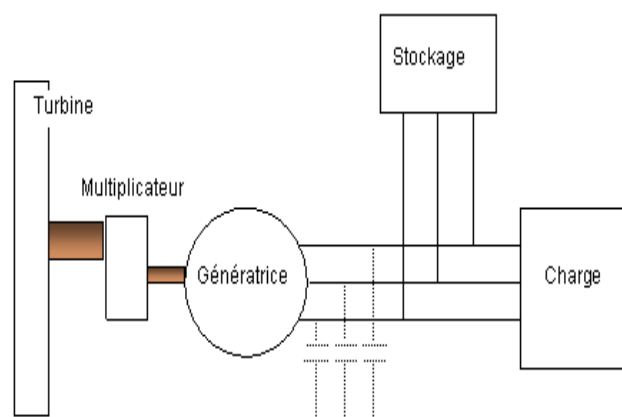


Figure 1. 9:Schéma général en mode autonome pour une éolienne à vitesse fixe, en mode autonome

- **En mode de connexion au réseau** : Lorsque l'éolienne est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation (Ω_{mec}) est étroitement liée à la fréquence des courants des enroulements du stator, imposée par le réseau, et au nombre de paires de pôles de la génératrice. Cette dernière fonctionne en hypersynchronisme et délivre de l'énergie électrique sur le réseau. Pour une génératrice asynchrone à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement plus élevée que la vitesse de synchronisme $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$, ce qui nécessite l'introduction d'un multiplicateur en aval de la génératrice afin d'adapter sa vitesse de rotation à celle du rotor de l'éolienne.[15]

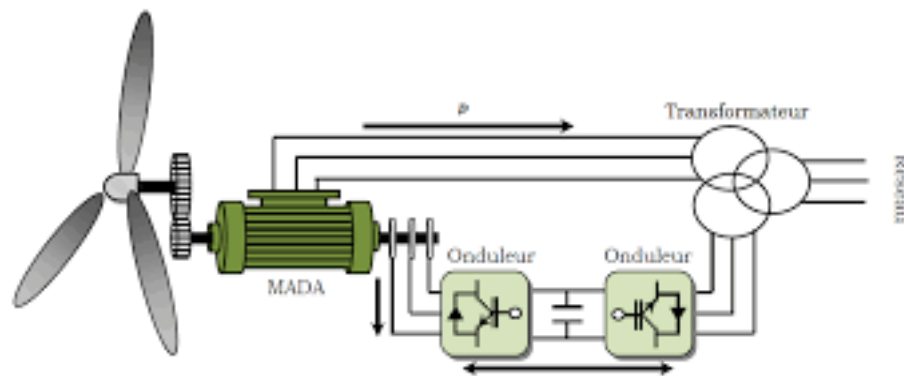


Figure1.10 :Éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau

Les éoliennes à vitesse fixe sont principalement utilisées dans le cas de faibles puissances (moins de 1MW). Elles sont connues pour leur robustesse et la facilité de leur maintenance. Cependant, la puissance extraite n'est pas optimisée car la vitesse de rotation du rotor est fixe. De plus, le coût de maintenance est élevé en raison des frais de réparation. De la vitesse du multiplicateur de vitesse et la puissance réactive n'est pas contrôlée, elle est seulement compensée. De plus, la connexion directe du générateur au réseau via le stator augmente son influence sur l'ensemble du système en cas de défaillance.

En général, les éoliennes sont conçues pour produire la puissance maximale pour une certaine valeur de la vitesse du vent appelée vitesse nominale. Au-delà de cette vitesse, il est nécessaire de limiter la puissance mécanique à sa valeur nominale. Pour les éoliennes à vitesse fixe,

la puissance mécanique peut être limitée par deux méthodes : par aérodynamique (décrochage), par un système d'orientation des pales :

Les éoliennes avec décrochage aérodynamique (Stall) : produisent une puissance variable qui augmente avec la vitesse du vent jusqu'à ce que sa valeur maximale coïncide avec la puissance nominale du générateur; la courbe de puissance chute plus rapidement avec la vitesse du vent[16].

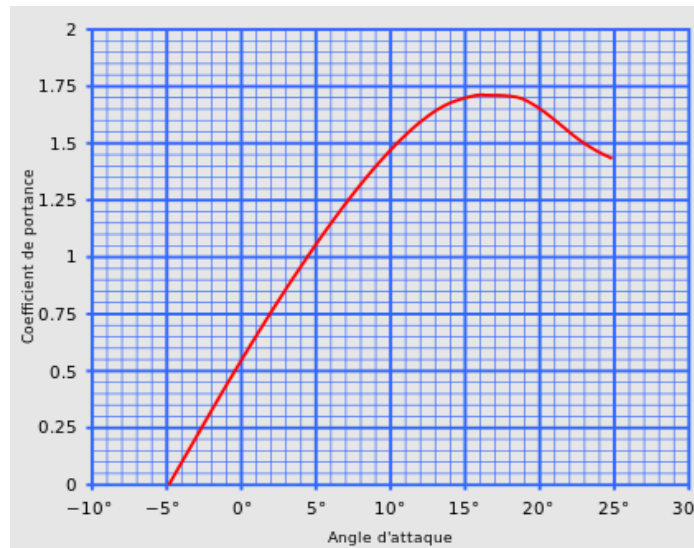


Figure 1. 11: Puissance électrique variable fournie (décrochage aérodynamique)

On peut tracer cette courbe de puissance, en fixant les pales de la turbine de telle sorte que diminuer brusquement la portance à partir d'une vitesse donnée à partir de laquelle la puissance commence à diminuer; au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue rapidement et un fonctionnement nominal n'est pas maintenu.

Pour les machines de forte puissance, il existe un système de "décrochage actif", ce dernier permet de maintenir progressivement le décrochage aérodynamique grâce à un dispositif de déviation des pales contre le vent. Ce système est avantageux en termes de coût et de simplicité car l'orientation des pales est réduite.

Eoliennes à pales orientables : un système d'orientation des pales, permet une modification aérodynamique et de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent plus élevée

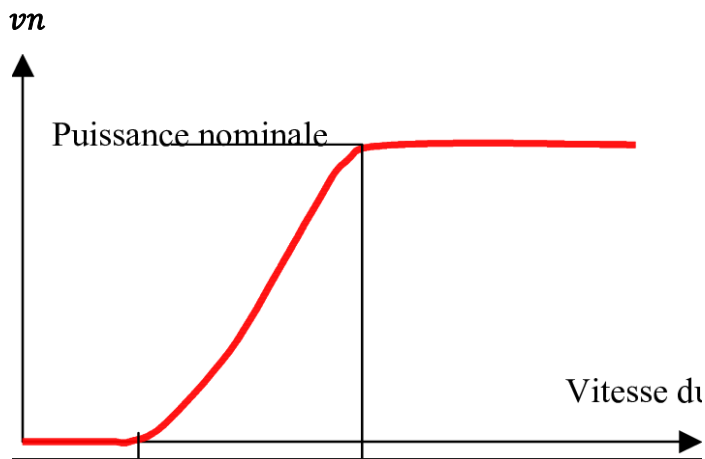


Figure 1. 12: Génération de puissance électrique nominale par orientation des pales

La configuration des éoliennes à vitesse fixe présente les inconvénients suivants :

L'utilisation d'un dispositif de production d'énergie réactive pour la magnétisation de la machine asynchrone, entraîne des coûts supplémentaires et des pertes de flux énergétiques.

La sollicitation permanente du système d'orientation des pales génère du bruit, Des variations brusques et rapides du courant injecté dans le réseau, dues aux variations du couple à raison du mouvement des pales pour maintenir une vitesse de rotation constante.

b. Éolienne à vitesse variable : Les éoliennes à vitesse variable améliorent le rendement de la conversion énergétique en adaptant la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent. Nous allons montrer ci-dessous l'intérêt de la vitesse variable : Afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance soutirée de l'éolienne, il est recommandé de pouvoir faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent, car si le générateur est entraîné à une vitesse fixe, le maximum théorique des courbes de puissance ne sera pas exploité.

La figure montre La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'une éolienne, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse du vent.

La caractéristique générale de la puissance disponible au niveau de l'éolienne en fonction de sa vitesse de rotation, est représentée sur la figure suivante :

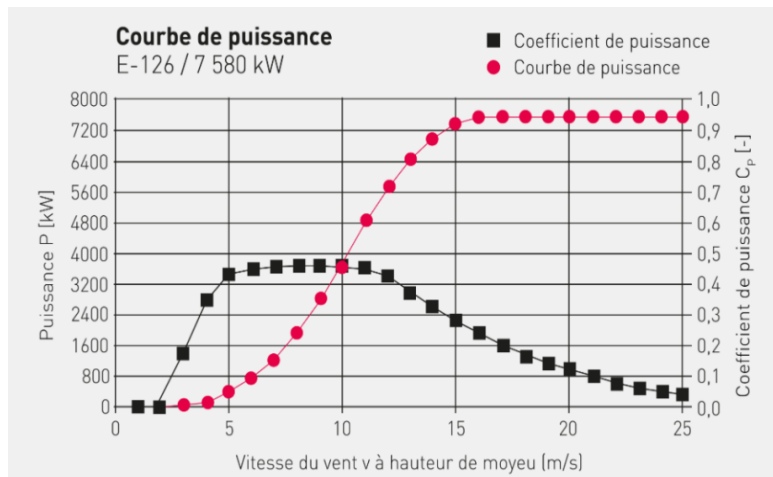


Figure 1. 13: La puissance mécanique générée par l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes nécessite des convertisseurs statiques et leurs dispositifs de contrôle.

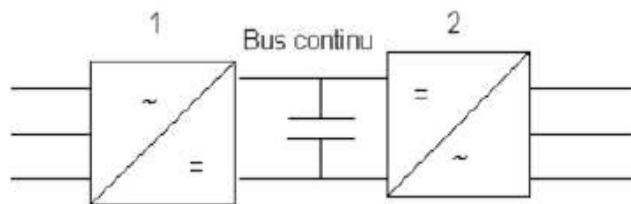


Figure 1. 14: Convertisseurs statiques de fréquence

Convertisseurs statiques de fréquence : Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes nécessite des convertisseurs statiques et leurs dispositifs de contrôle. En effet, la fréquence et l'amplitude de la tension, à la sortie du générateur, sont variables. Il faut donc les adapter à la fréquence et à l'amplitude de la tension, fixes, du réseau auquel le générateur est connecté, on utilise des convertisseurs de puissance agissant sur la fréquence variable, installés entre la machine (synchrone ou asynchrone) et le réseau.

Le premier convertisseur (1) est un redresseur PWM qui convertit le courant alternatif en courant continu et permet de fournir un courant réactif magnétisant.

Le deuxième convertisseur (2) est un onduleur PWM qui régule la valeur efficace de la tension ou du courant et la fréquence du courant ou de la tension, pour se connecter au réseau. Ces deux convertisseurs statiques sont reliés par un bus DC, qui gère le transfert de puissance entre le redresseur et l'onduleur. Ce bus est composé notamment d'un condensateur lissant et filtrant la forme d'onde afin de réduire significativement les harmoniques du courant.

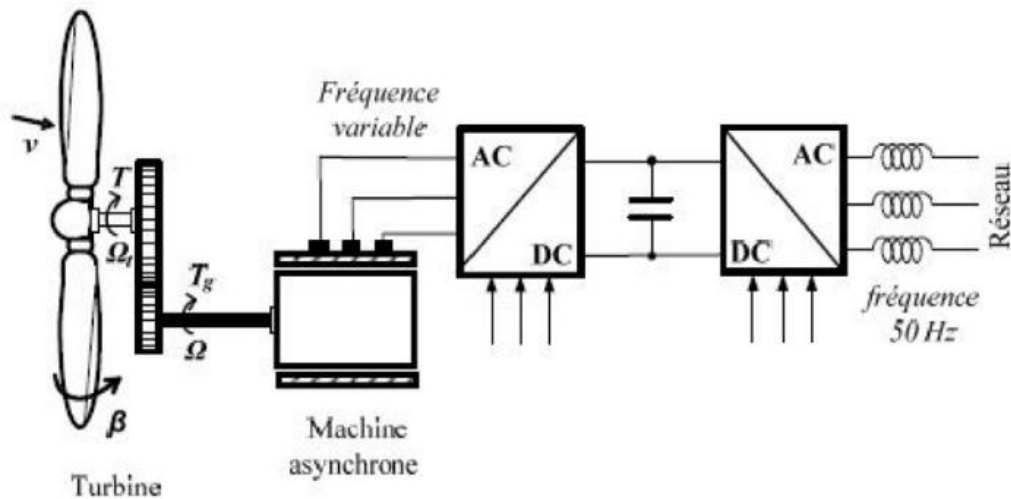
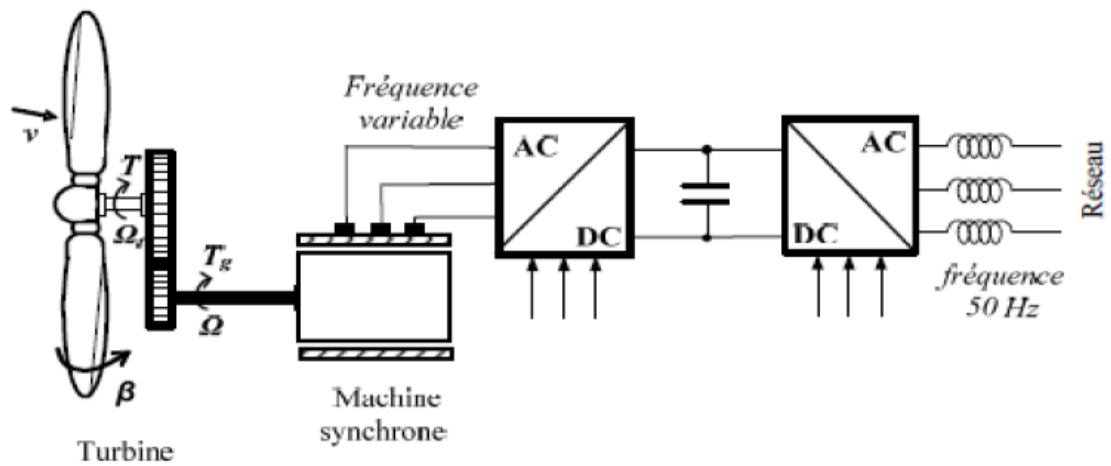
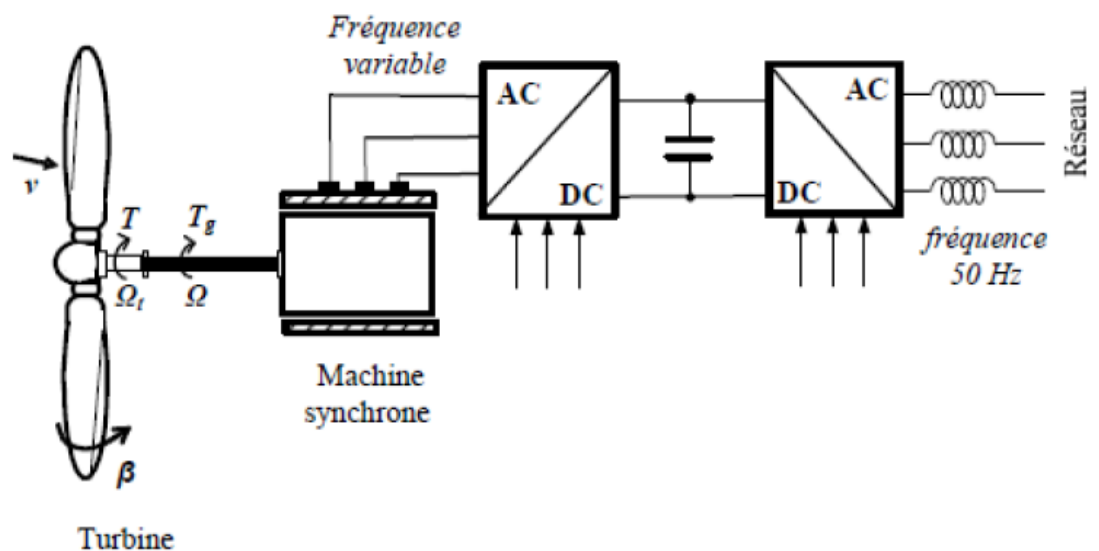


Figure 1. 15:Éolienne à vitesse variable basée sur une Machine Asynchrone(MAS)



a. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone couplée à la turbine via un multiplicateur



b. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone directement couplée à la turbine.

Figure 1. 16: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone.

Éoliennes à vitesse variable basées sur la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné associée à un double convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (structure de Scherbius) à GBT. Elle a suscité beaucoup d'intérêt, notamment dans le domaine de l'énergie éolienne double alimentation s'explique par le fait que son stator est directement couplé au réseau tandis que son rotor est relié au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs statiques (convertisseur sur la MADA et convertisseur sur le réseau, selon la configuration présentée dans la figure suivante :

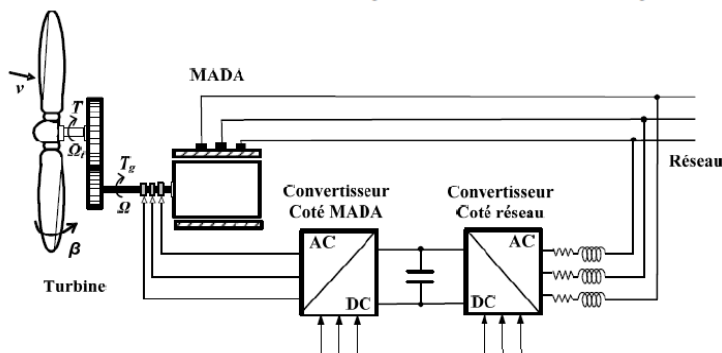


Figure 1. 17: Éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

Dans le secteur éolien actuel, la plupart des éoliennes installées ont une vitesse de rotor variable. Ceci s'explique par les points forts que présentent ces aérogénérateurs par rapport avec les éoliennes à vitesse fixe. Ces avantages peuvent être énumérés comme suit [17].

- Une meilleure intégration de l'éolienne au réseau électrique est assurée.
- L'adaptation de la vitesse de l'éolienne lors des variations du vent réduit les efforts mécaniques
- Un système d'orientation des pales simple. En effet, le contrôle de la vitesse de la génératrice permet des constantes de temps mécaniques des pales plus longues, ce qui réduit la complexité du système l'orientation des pales et son dimensionnement en fonction de la puissance nominale P , et donc l'influence des rafales de vent sur la puissance délivrée

- Le bruit est réduit lors du fonctionnement à puissance réduite car la vitesse du vent est lente

La plage de fonctionnement de l'éolienne est élargie et la puissance maximale est atteinte pour des vitesses de vent faibles, Bien que le fonctionnement à vitesse variable présente plusieurs avantages, cette technologie des éoliennes présente également plusieurs inconvénients :

Dans le cas d'un raccordement au réseau, le dimensionnement des convertisseurs et des filtres est réalisé pour transiter toute la puissance échangée entre le réseau et la machine, ce qui entraîne des problèmes de conception, d'encombrement et d'augmentation des coûts

Les pertes au niveau des convertisseurs électroniques de puissance augmentent avec l'accroissement de la puissance des éoliennes, ceci influence l'efficacité du système éolien et la gamme de fonctionnement.

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la situation de l'énergie éolienne, Nous avons défini les notions élémentaires relatives à l'énergie éolienne, nous avons décrit le principe de fonctionnement des éoliennes. Nous avons aussi énuméré les types existants des éoliennes.

Chapitre 02: Modélisation et commande dune éolienne a vitesse variable, basée sur une machine asynchrone doublement alimentée

2.1. Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine asynchrone triphasée. Sa double alimentation s'explique par le fait qu'elle est alimentée par ses deux armatures aux temps : son stator et son rotor. Son principal avantage est qu'elle offre la possibilité de contrôler le flux de puissance pour les régimes hypo et hypersynchrone, c'est-à-dire en fonctionnement moteur ou en générateur. Il permet également un fonctionnement à vitesse variable du système où il est intégré [18].

Pour une utilisation dans un système éolien à vitesse variable, il existe deux grandes deux grandes configurations pour la double alimentation de la machine asynchrone : la double alimentation par le stator et la double alimentation par le stator et le rotor. Cette dernière configuration est caractérisée par l'utilisation de convertisseurs, installés entre le rotor de la machine et le réseau, dont la taille et le coût sont réduits car ils transmettent moins de puissance au rotor. De plus, elle offre la possibilité de régler l'amplitude et la fréquence des tensions du rotor. Ce sont les raisons pour lesquelles, cette configuration est privilégiée dans les systèmes éoliens à vitesse variable en comparaison avec les éoliennes à vitesse variable alimentées par le stator et dotées de convertisseurs de puissance, dans la littérature nous trouvons différentes types de la MADA selon sa conception :

- **Machine asynchrone doublement alimentée à rotor bobiné**

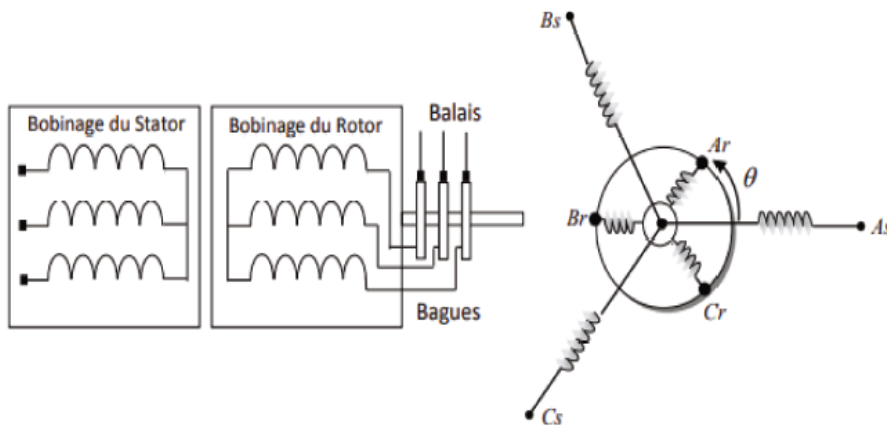


Figure 2. 1: Schéma descriptive de la MADA

- **Machine asynchrone doublement alimentée en cascade asynchrone :**

- ✓ Machine asynchrone a double alimentation cascadée a un repère
- ✓ Machine a double alimentation sans balais

2.2. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE LA MADA

2.2.1. Structure de la machine :

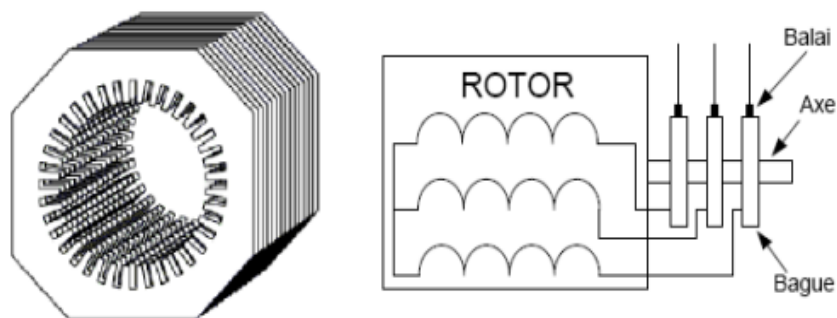


Figure 2. 2: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

La MADA, comme son nom l'indique, est une machine à double motorisation. Elle est surnommée "machine généralisée" en raison de sa souplesse de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA est basé sur le principe du contrôle du flux de puissance glissant, Au lieu de dépenser la puissance du rotor en pertes par effet Joule, elle peut être récupérée et injectée dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants *rotorique*

Une machine asynchrone à rotor bobiné et double alimentation peut être transformée en générateur à vitesse variable en contrôlant le flux de puissance entre le rotor et le réseau. Selon le sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau mais aussi entre ce dernier et le stator, la MADA devient ainsi un générateur ou un moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous :

- ✓ Régime stationnaire.
- ✓ Régime hyposynchrone.
- ✓ Régime synchrone.
- ✓ Régime hypersynchrones.

2.2.2. Modes de fonctionnement de la MADA

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass. Celle ci n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

Les quatre modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous

Fonctionnement moteur hyposynchrone de la MADA : dans ce mode, le réseau fournit au stator de la MADA une puissance notée P_s , la puissance de glissement P_r est injectée dans le réseau en passant par les deux convertisseurs et une puissance mécanique est récupérée sur le rotor de la machine.

Fonctionnement moteur hypersynchrones de la MADA : dans ce mode, la puissance au stator P_s est fournie par le réseau aussi la puissance de glissement P_r est transférée du réseau vers le rotor de la MADA en transitant par les deux convertisseurs. Et la puissance mécanique P_m est récupérée sur l'arbre de la MADA.

Fonctionnement génératrice hyposynchrone : la puissance mécanique P_m est fournie à la machine par la turbine dans le cas d'une éolienne la puissance P_s fournie au réseau transite par le stator, la puissance de glissement est absorbée par le rotor.

Fonctionnement génératrice hypersynchrones : la puissance P_s et la puissance de glissement sont injectées dans le réseau

Pour le système éolien les deux derniers modes de fonctionnement de la MADA sont les plus intéressants.

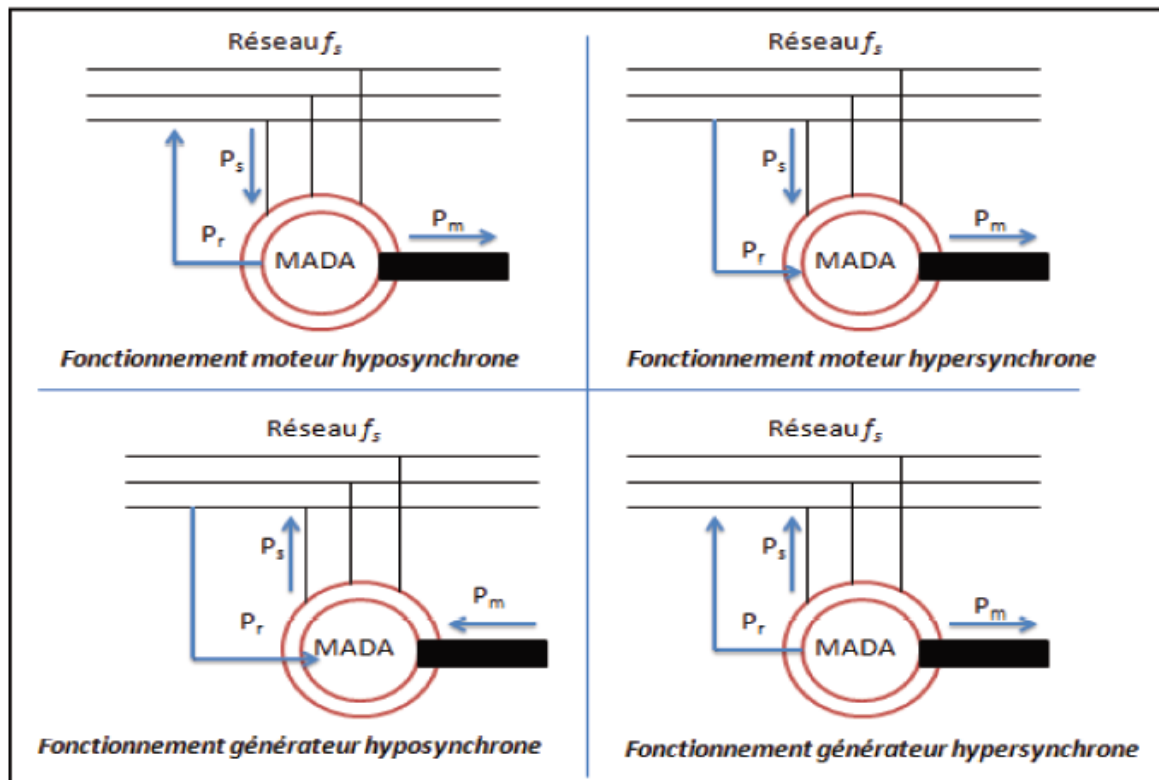


Figure 2. 3: Les quatre modes de fonctionnement de la MADA

2.2.3. Avantages de la MADA

- Dans un système éolien, la vitesse de rotation de la MADA est de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, ce qui limite la puissance circulant dans les enroulements du rotor qui est égale à $(g \times P)$ et donc les convertisseurs de puissance sont dimensionnés pour transférer une puissance de glissement P_r égale à un maximum de 30% de la puissance de la machine.
- La taille des convertisseurs de puissance est réduite d'environ 70 %, leur coût est réduit et ils sont moins bruyants par rapport aux convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens à basés sur des machines à cage d'écureuil ou à aimant permanent]. De plus, ces convertisseurs ont un taux de perte réduit, ce qui confère au système un meilleur rendement.
- L'utilisation du MADA dans une éolienne à vitesse variable permet le contrôle de la indépendamment des puissances active et réactive par le biais du convertisseur côté rotor de L'utilisation de la MADA dans une éolienne à vitesse variable permet de contrôler indépendamment les puissances active et réactive via le convertisseur côté rotor de la machine (CCM) et donc de contrôler le coefficient de puissance[19].

2.2.4. Modélisation mathématique et contrôle vectoriel de la MADA

2.2.4.1. Modèle triphasé de la MADA

La MADA considérée dans cette étude est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, constituée d'un stator fixe et d'un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Le stator comprend trois enroulements similaires logés dans des encoches, ayant un nombre p de paires de pôles et ils sont espacés d'un angle électrique de $2\pi/3$. Quant au rotor, il comprend également trois enroulements triphasés, connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à un système bagues-balais [20].

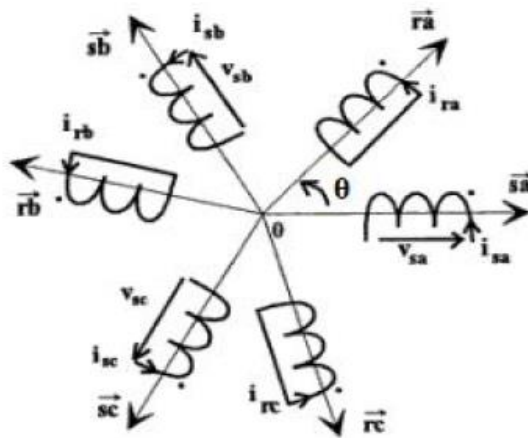


Figure 2. 4: Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

Avec : Les indices s, r désignent respectivement le stator et le rotor de la machine, (-) désigne le sens des courants et des flux ; en effet, un courant positif entrant par le point crée un flux positif dans l'enroulement, (-) désigne le sens des courants et des flux.

θ est l'angle électrique entre $\vec{R}_a$ et $\vec{S}_a$.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} sont les tensions d'alimentation des phases du stator S_a, S_b, S_c ,

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} sont les courants des phases statoriques S_a, S_b, S_c ,

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} sont les tensions des phases du rotor R_a, R_b, R_c ,

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} sont les courants des phases du rotor R_a, R_b, R_c ,

La modélisation mathématique de cette machine nécessite l'élaboration de certaines hypothèses simplificatrices :

- Entrefer constant,

- Effet d'entaille négligé,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices de l'entrefer,
- Circuit magnétique non saturé à perméabilité constante,
- Pertes ferromagnétiques négligeables,
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Les conséquences importantes de ces hypothèses sont :

- L'additivité des flux,
- La constante des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements les stators et les rotors en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

Les tensions du stator sont données par :

$$[v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \left(\frac{d}{dt}\right) \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Pour les équations qui lient les flux et les courants, nous avons :

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) \cdot [\phi_{rabc}]$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{rs} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix}$$

Où : $[L_s]$ et $[L_r]$ sont les matrices des inductances statoriques et rotoriques données en fonction des inductances propres et mutuelles, exprimées ainsi :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

R_s, l_s sont respectivement la résistance et l'inductance d'une phase statorique,

R_r, l_r sont respectivement la résistance et l'inductance d'une phase rotoriques,
 M_s, M_r sont respectivement le coefficient d'inductance mutuelle entre deux phases statoriques
et rotoriques,
 M_{sr} est l'inductance mutuelle entre une phase de stator et une phase de rotor,
Alors, nous avons finalement :

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + (d/dt) \cdot \{[L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{rabc}]\}$$

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + (d/dt) \cdot \{[M_{sr}] \cdot [i_{sabc}] + [L_r] \cdot [i_{rabc}]\}$$

2.2.4.2. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park (d, q)

Afin d'obtenir une représentation mathématique plus simple de la machine, son modèle diphasé dans le cadre de rotation de Park noté (d, q) est présenté dans cette section ; 'd' désigne l'axe direct du référentiel et 'q' désigne son axe en quadrature. La transformation de Park est un outil mathématique utilisé en électrotechnique, qui permet de modéliser un système triphasé à l'aide d'un modèle biphasé. Cet outil a été proposé pour la première fois par Robert H. Park en 1929 [21]. Le passage de la référence triphasée à une référence biphasée est obtenu en multipliant les grandeurs des tensions, des courants et des flux par une matrice de transformation, définie par :

$$[X_{dq0}] = [p(\theta)] \cdot [X_{abc}]$$

D'où :

$[p(\theta)]$ est la matrice de transformation de Park donnée par :

$$[p(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & (\cos\theta - \frac{2\pi}{3}) & (\cos\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Pour écrire les équations des tensions, des courants et des flux, aussi bien qu'au stator qu'au rotor de la machine, dans le repère de Park ; nous appliquons deux transformations de Park en remplaçant dans l'équation (II.45) l'angle θ par θ_s pour le stator et par θ_r pour le rotor et nous obtenons ainsi : $[p(\theta_s)]$ et $[p(\theta_r)]$.

Avec, θ_s et θ_r sont les angles électriques montrés sur la figure suivante :

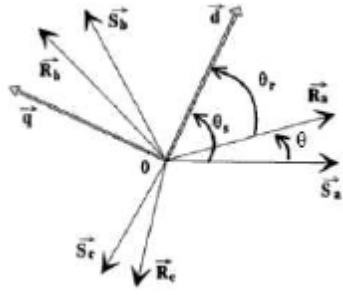


Figure 2. 5: Les angles du système dans l'espace électrique

Selon la figure, les angles θ_s et θ_r sont liés à l'angle θ par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r$$

Nous avons donc:

- Pour le stator :

$$[idq0]_s = [p(\theta_s)] \cdot [iabc]_s$$

$$[vdq0]_s = [p(\theta_s)] \cdot [vabc]_s$$

$$[\phi dq0]_s = [(\theta_s)] \cdot [\phi abc]$$

D'où :

$$[idq0]_s = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{0s}]^T ; [vdq0]_s = [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{0s}]^T ; [\phi dq0]_s = [\phi_{ds} \ \phi_{qs} \ \phi_{0s}]^T$$

- Pour le rotor :

$$[idq0]_r = [p(\theta_r)] \cdot [iabc]_r$$

$$[vdq0]_r = [p(\theta_r)] \cdot [vabc]_r$$

$$[\phi dq0]_r = [(\theta_r)] \cdot [\phi abc]$$

D'où :

$$[idq0]_r = [i_{dr} \ i_{qr} \ i_{0r}]^T ; [vdq0]_r = [v_{dr} \ v_{qr} \ v_{0r}]^T ; [\phi dq0]_r = [\phi_{dr} \ \phi_{qr} \ \phi_{0r}]^T$$

Selon l'objectif de l'étude faite sur le système, il existe différentes orientations du repère diphasé (d, q) :

- Pour étudier les grandeurs statoriques, nous choisissons un repère tournant à la vitesse du rotor. De ce fait, $\theta_r = 0$

Après développement, les tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park (d, q) s'écrivent[22] :

$$vds = Rs \cdot ids + (d\phi ds/dt) - (d\theta s/dt) \cdot \phi qs$$

$$vqs = Rs \cdot iqs + (d\phi qs/dt) - (d\theta s/dt) \cdot \phi ds$$

$$vdr = Rr \cdot idr + (d\phi dr/dt) - (d\theta r/dt) \cdot \phi qr$$

$$vqr = Rr \cdot iqr + (d\phi qr/dt) - (d\theta r/dt) \cdot \phi dr$$

D'où :

ω_s est la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère statorique (S, abc),

ω_r est la vitesse angulaire des axes d, q dans le repère rotorique (R, abc),

Ces vitesses ω_s et ω_r s'expriment respectivement comme suit :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} = p \cdot \Omega_{mec}$$

D'où :

ω est la vitesse angulaire de la machine [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$] et Ω_{mec} est la vitesse mécanique de la MADA en [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

Les équations des flux dans le repère de Park sont données par :

$$\phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{qs}$$

$$\phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{ds}$$

$$\phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{qr}$$

$$\phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{dr}$$

2.2.5. Défauts de la MADA

Les défauts de la machine électrique, y compris la machine asynchrone à double alimentation, peuvent être classés en fonction de leurs causes, en deux grandes classes :

- ✓ **Les défauts internes** : proviennent de défauts dans les composants de la machine tels que les enroulements de stator et de rotor, les circuits magnétiques, la cage de rotor dans la cage du rotor dans le cas d'une machine à cage d'écureuil, l'entrefer mécanique, etc.
- ✓ **Les défauts externes** : sont causés par l'environnement extérieur dans lequel la machine est utilisée, le type d'alimentation, le type de charge, etc.

Une deuxième classification des défauts est possible, en fonction de la nature du défaut. On trouve donc :

✓ **Les pannes électriques**

Au niveau du stator : défaut d'isolement, court-circuit entre spires d'une même phase, court-circuit entre deux phases, court-circuit entre la phase et le bâti, défaut dans le circuit magnétique.

Au niveau des circuits électriques du rotor : même chose pour les défauts de circuit. Stators pour une machine asynchrone à rotor bobiné ; rupture ou fissuration des barres ou anneaux de court-circuitage pour les machines à cage d'écureuil.

✓ **les défauts mécaniques**

- * Défauts des roulements,
- * Défauts des brides,
- * Défauts mécaniques des arbres,
- * Excentricité statique, dynamique et mixte,
- * Défauts de déséquilibre.

2.2.1. Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit le fonctionnement, les avantages, la modélisation mathématique et contrôle vectoriel (Modèle triphasé et déphasé) et aussi un aperçu général sur les défauts de la MADA.

Dans le chapitre suivant, on s'intéressera aux approches de diagnostic des défauts de capture et leurs effets sur la machine asynchrone doublement alimentée d'une éolienne.

Chapitre 03

APPROCHES DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE CAPTURE ET LEURS EFFETS SUR LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLEMENT ALIMENTEE D'UNE ÉOLIENNE

3.1. Introduction

En vue d'améliorer la disponibilité, la qualité et la sécurité de fonctionnement ainsi que la réduction des coûts d'exploitation et de fonctionnement, en intervenant au cours des phases du cycle de vie du produit, les méthodes de diagnostic des défauts, ont bénéficié d'un intérêt particulier des scientifiques et des chercheurs, notamment, pour l'exploitation des systèmes automatisés de production, dont la complexité est en constante évolution .

Le diagnostic a pour but de détecter, localiser et éventuellement isoler les défaillances ou les défauts qui affectent un système. Il s'inscrit dans le cadre plus général de la surveillance et du contrôle. La complexité des systèmes de production d'électricité, en particulier des éoliennes, nécessite la prise en compte de fonctions telles que le suivi, la supervision et la gestion technique et la planification de la maintenance [23].

3.2. Terminologie relative au diagnostic

Le comité technique SAFEPROCESS de l'IFAC (International Federation of Automatic Control) ont standardisé cette terminologie en se basant sur les travaux reportés dans [Zwingelstein, 1995] [24], [Isermann et Phalle, 2000] [25] est listée ci-après :

- **Défaut** : Il s'agit de tout écart ou déviation d'au moins une caractéristique observée du système surveillé par rapport à sa caractéristique de référence requise, correspondant à l'état de fonctionnement régulier et standard. Un défaut ne provoque généralement pas l'arrêt complet du système mais peut conduire à une défaillance probable. Un défaut peut être d'origine physique en raison d'un dysfonctionnement de l'équipement, d'erreurs de conception, d'erreurs de conduite et d'utilisation des systèmes opérationnels ou des erreurs

lors des actions de maintenance. À la suite d'un défaut, le système est incapable de remplir la fonction principale pour laquelle il a été conçu. Un défaut ne conduit pas nécessairement à une défaillance.

• **Défaillance** : C'est l'incapacité d'un système physique à réaliser sa fonction principale ou l'une de ses fonctions. Une défaillance peut conduire à un défaut. Mais un défaut ne conduit pas nécessairement à une défaillance. Cela signifie que le système peut toujours réaliser sa fonction principale, à condition que le défaut n'affecte pas cette tâche. La défaillance peut être partielle si le système conserve la capacité d'exécuter une partie de ses fonctions requises ou lorsqu'il les exécute d'une manière limitée, comme elle peut être complète lorsque le système est incapable d'exécuter toutes fonctions requises.

• **Panne** : Une panne est toujours le résultat d'une défaillance. En outre, on peut distinguer deux types de défaillances : une défaillance permanente, si elle conduit à l'état non opérationnel du composant ou du dispositif, qui nécessite une réparation ou un remplacement indispensable ; et une défaillance intermittente, qui résulte d'une dégradation partielle et progressive d'un composant du système. Le système peut retrouver son état de fonctionnement normal même après avoir réparé la panne. Mais, sans réparation du composant dégradé, une défaillance intermittente peut se transformer en une défaillance permanente du système.

- **Dégradation** : Est un processus de diminution progressive des performances d'une entité fonctionnelle d'un dispositif.
- **Perturbation** : Est toute entrée incontrôlée, provenant de l'environnement externe, influençant de manière négative sur un système physique.
- **Diagnostic** : Est un processus permettant de détecter l'occurrence d'un défaut à un moment précoce avant qu'il ne conduise à une défaillance, en s'appuyant sur les mesures et les observations effectuées sur le système surveillé. Il inclut aussi l'étape de localisation et d'identification du défaut. Son acronyme anglais est FDI (Fault Detection and Isolation)

3.3. Les étapes de la procédure de diagnostic [25]

La procédure de détection et de localisation des pannes qui passe par plusieurs étapes essentielles :

- **Étape initiale de définition du périmètre du diagnostic (objectifs/besoins)**

Dans cette étape initiale, il s'agit de définir les objectifs recherchés, et les besoins nécessaires au développement d'un système de diagnostic :

- Types de défauts recherchés : actionneur/processus/capteur,
 - Disponibilité ou non d'un modèle du système,
 - Les grandeurs physiques à mesurer,
 - Conditions d'environnement et de fonctionnement du système à l'état sain.
- **Étape de génération de résidus ou d'identification d'indicateurs pertinents**

Cette étape consiste à générer des résidus ou à identifier des indicateurs pertinents. Ces résidus/indicateurs élaborés seront analysés dans l'étape suivante, qui est la détection.

Étape de détection :

La détection des défauts est souvent suivie d'une procédure de localisation des défauts, permettant d'isoler le défaut et donc de déterminer quelle partie du système est affectée par l'anomalie (défaut actionneurs, défaut système et défaut capteur).

- **Étape de localisation et d'identification des défauts**

Cette étape de diagnostic permet de localiser le défaut détecté en l'attribuant à un élément du système : actionneur, capteur, ou composants du processus. Cette attribution implique la mise à disposition d'une base de connaissances des signatures de défauts (stratégie sans modèle), ou en structurant les résidus de manière à ce qu'ils ne soient affectés que par un type de défaut particulier (stratégie avec modèle).

3.4. Classification des défauts

Dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation en trois types : défaut actionneur, défaut capteur et défaut système (ou défaut composant), selon leur évolution défaut brusque, défaut intermittent et défaut progressif et enfin selon leurs influences sur le système, on trouve les défauts additifs et les défauts multiplicatifs.

- **Selon la localisation du défaut**

➤ **Défauts des composants** : Ce type de défaut provient des éléments internes du système. Une défaillance de processus résulte de la rupture d'un composant du système et réduit sa capacité à remplir une fonction définie.

En pratique, cela revient à envisager une modification des caractéristiques du système lui-même.

➤ **Défauts d'actionneur** : Ils interviennent au niveau de la partie opérative et détériorent le signal d'entrée du système. Ils représentent la perte totale ou partielle d'un actionneur agissant sur le système. La défaillance d'un actionneur peut entraîner une forte consommation d'énergie et une perte totale de contrôle.

➤ **Défauts de capteur** : Ils affectent les instruments mesurant une quantité physique donnée et la transforment en une quantité traitable par les calculateurs. Ils constituent l'interface de sortie entre le système et l'environnement externe, qui communique des informations sur l'état interne du système. Un défaut du capteur se traduit par une mauvaise image de la grandeur physique à mesurer.

- **Selon leur impact sur les performances du système**

Les défauts aussi peuvent être classés en effets sur les performances du système. Les défauts capteurs et actionneurs sont généralement modélisés par des défauts additifs, tandis que, les défauts système sont modélisés par des défauts multiplicatifs.

- On peut aussi les classifiés comme suit:

- ❖ **Les défauts du stator** : qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques.
- ❖ **Les défauts rotoriques** : circuit ouvert d'une phase, court-circuit des spires des enroulements rotoriques.
- ❖ **Des irrégularités statiques et/ou dynamiques** : dans l'entrefer. Axe plié (similaire à l'excentricité dynamique) qui peut avoir comme conséquence une bande de frottement entre le rotor et le stator, endommageant sérieusement le stator et ses enroulements.

Les défauts statorique ou d'armature, les défauts rotoriques, et les défauts liés aux excentricités sont les plus répandus et exigent, ainsi, une attention particulière. Ces défauts produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :

- Un déséquilibre des phases électriques (courants et tensions)
- Fluctuations accrues de couple ;
- Diminution du couple moyen ;
- Augmentations des pertes et réduction d'efficacité ;
- Échauffement excessif.

Pour détecter de tels défauts, plusieurs méthodes de diagnostic ont été développées impliquant plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Elles peuvent être décrites comme suit :

- Surveillance du champ électromagnétique,
- Mesures de la température,
- Rayonnement infrarouge,
- Surveillance du bruit et de vibration,
- Analyse chimique,
- Analyse spectrales,
- Analyse de la signature du courant (MCSA).
- Méthodes basées sur le modèle électrique de la machine, intelligence artificielle, et réseau de neurones.

✓ **Détection et isolation des défauts (système de surveillance)**

De nombreux dysfonctionnements peuvent affecter la sécurité, la fiabilité et la disponibilité d'un système. C'est pourquoi l'objectif de la surveillance en ligne (détection, localisation et diagnostic des pannes) est de déterminer, à partir des informations collectées en temps réel, si le système fonctionne correctement. Collectées en temps réel, si le système fonctionne correctement ou présente des anomalies, appelées défaillances, susceptibles de compromettre la réalisation de sa mission.

3.5. Les fonctions de la surveillance

Un système de surveillance répond généralement à trois fonctions qui sont:

- **Détection**

Un test de détection (appelé aussi test de cohérence ou test de consistance) a pour but de vérifier si un ensemble d'informations représentatives de l'état d'un système physique est cohérent avec la connaissance d'un comportement donné qui peut être normal ou anormal ; le résultat de la comparaison produit un écart, appelé résidu. Cette écart sera comparé à des seuils fixés a priori. Si le seuil de détection est trop petit, il peut y avoir de fausses alarmes. Si le seuil est trop grand, on se retrouve avec des manques de détection. Les informations sont associées à des variables ; elles peuvent être des observations ou des mesures qualitatives. Les connaissances utilisées peuvent être formalisées de nombreuses manières différentes : la nature d'un test de détection dépend fondamentalement du choix de

la formalisation.

3.6. Diagnostic : Il y a généralement trois étapes [26] :

- **Localisation** : déterminer le sous-système fonctionnel à l'origine de l'anomalie et affine progressivement cette détermination pour désigner l'organe ou le dispositif élémentaire défectueux.
- **Identification** : détermine les causes qui ont généré la défaillance observée.
- **Explication** : justifie les conclusions du diagnostic.

➤ Défauts du stator et rotor

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation. A un stade avancé, ces défauts peuvent provoquer un court-circuit entre spires qui peut s'aggraver et évoluer vers un court-circuit phase-phase ou phase-terre. Ils contribuent à un déséquilibre des courants des trois phases et donc à une dégradation du couple. Il est donc possible de détecter ces défauts en surveillant les composantes séquences négatives et séquences nulles du courant statorique.

Les courts-circuits dans les générateurs de puissance affectent le fonctionnement de la machine, provoquent des niveaux élevés de vibration ; ainsi la détection précoce est importante. De même que dans le cas de défauts de bobinage rotors, des courts-circuits entre spires apparaissent en raison de contraintes mécaniques, électromagnétiques ou thermiques. Normalement, la résistance des enroulements sur les pôles opposés est identique. Le site chaleur produite par l'effet Joule est répartie de manière symétrique autour du rotor forgé. Si l'isolation entre les spires est endommagée de telle manière que deux ou de l'enroulement sont court-circuités, la résistance de l'enroulement endommagé diminue. l'enroulement endommagé diminue. Lorsque les pôles sont connectés en série, on a une asymétrie des résistances et donc une asymétrie des températures rayonnées. Cette différence de température produit un gradient thermique dans le corps du rotor provoquant des vibrations. Le déséquilibre des forces magnétiques sur le rotor produit par la variation de la force magnétomotrice (MMF) de l'enroulement contribue à augmenter les vibrations. Un défaut d'isolement entre les spires conduit à l'élimination d'une ou plusieurs spires d'un enroulement de stator ou de rotor. Cela peut avoir un effet minime mais il est quantifié dans la

distribution du flux dans l'entrefer [27]. Pour notre étude, un autre défaut classé dans la même catégorie est le "singlephasing" ou fonctionnement monophasé. Dans ce cas, une ligne d'alimentation ou une phase de l'enroulement est coupée, on parle alors de circuit ouvert ou de phase ouvert. Dans le cas d'un raccordement en étoile, la machine ne sera alimentée qu'à travers deux phases, donc l'équivalent d'un circuit monophasé [28].

3.7. Surveillance de la machine asynchrone à double alimentation

✓ Approche par le signal

Le principe des méthodes d'analyse des signaux est basé sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défectueux du processus. La première étape de cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral. L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, les vibrations. Dans la littérature, plusieurs techniques de détection sont présentées. des défauts par le traitement du signal. Dans notre cas, nous présentons la technique la plus utilisée, à savoir l'analyse spectrale.

✓ Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances des machines électriques, principalement les défauts du rotor de machines asynchrones à double alimentation, les excentricités et les courts-circuits dans les enroulements. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation.

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone à double alimentation consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne statoriques), soit les grandeurs mécaniques (vibrations, couple électromagnétique). Cette technique permet une surveillance rapide et peu coûteuse car elle nécessite un simple capteur de courant ou de vibration. Cependant, elle nécessite une analyse manuelle par un expert en surveillance de machines électriques.

✓ Introduction au diagnostic par analyse spectrale

Historiquement, les méthodes de diagnostic ont été développées pour la détection de défauts de capteurs et d'actionneurs par des diagrammes redondants. Cette approche par redondance matérielle présente l'avantage d'isoler l'élément défectueux et d'assurer la continuité de l'activité. Ses inconvénients sont les coûts générés par la multiplication des éléments. Le développement de l'outil informatique a permis l'émergence de méthodes permettant de pallier partiellement la redondance le matériel. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter les défaillances des machines électriques, essentiellement les défauts des rotors. Le défaut se traduisant par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes sont bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant d'un capteur de courant ou/et d'un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels[29].

3.8. Résultats de simulation

La figure 3.1 présente le système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) sous l'environnement Matlab/Simulink.

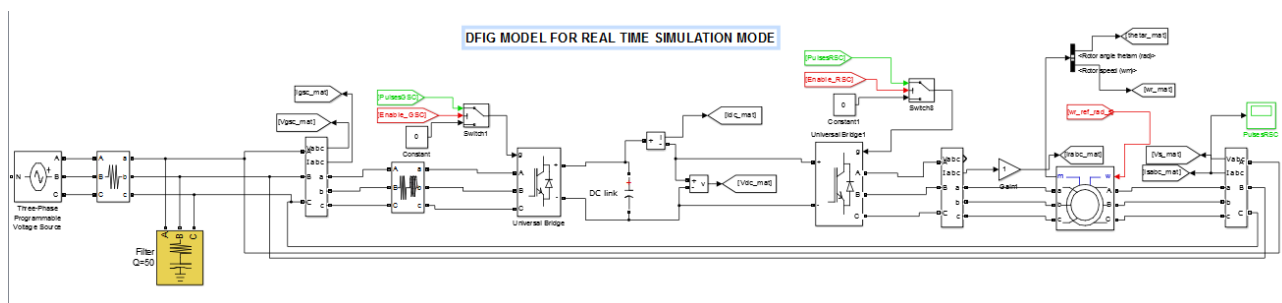


Figure 3.1: montre la simulation du système MADA sous l'environnement Matlab/Simulink .

3.8.1. Création des défauts dans la MADA (courant et voltage)

Dans cette partie, on va créer les différents défauts tel que les défauts statoriques, rotoriques, DC Link et les défauts de glisseurs pour avoir leurs effets sur le fonctionnement de la MADA .

3.8.1.1. Défaut statorique

La figure 3.2 présente la création d'un défaut statorique additifs courant.

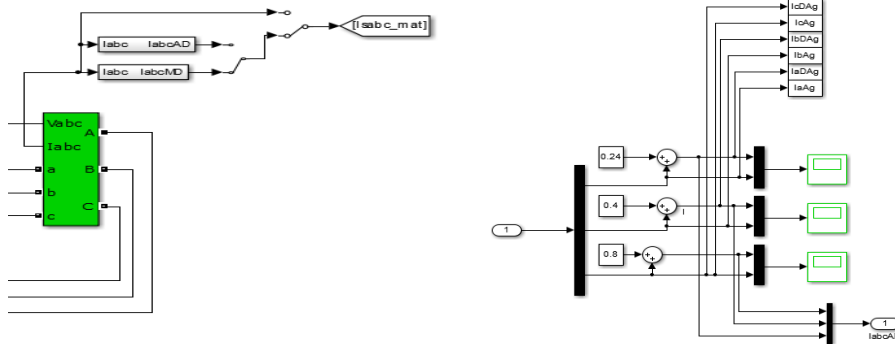


Figure3. 2: Défaut statorique additifs courant

La figure 3.3 présente la création d'un défaut statorique multiplicatif courant sous l'environnement Matlab.

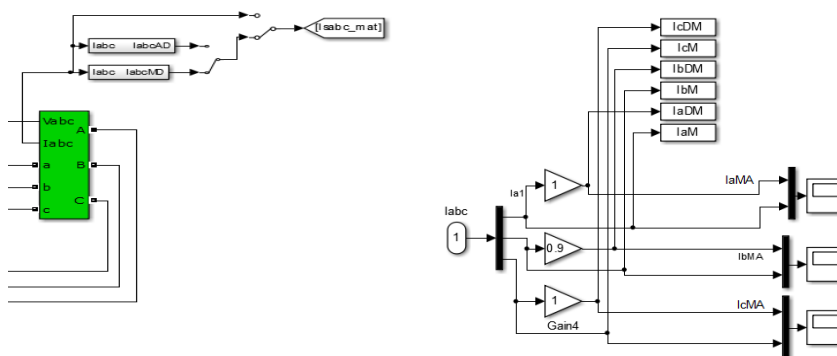


Figure3. 3: Défaut statorique multiplicatif courant

La figure 3.4 présente la création d'un défaut statorique additifs voltage.

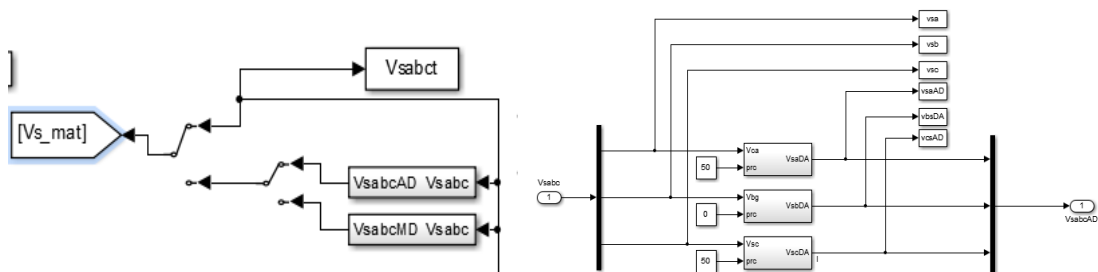


Figure3. 4: Défaut statorique additifs voltage

La figure 3.5 présente la création d'un défaut statorique multiplicatif voltage.

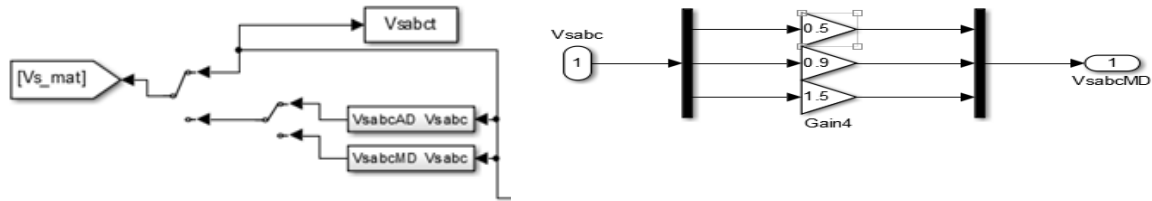


Figure3. 5: défaut statorique multiplicatif voltage

3.8.1.2. Défaut rotorique

La figure 3.6 présente la création d'un défaut rotorique additifs courant.

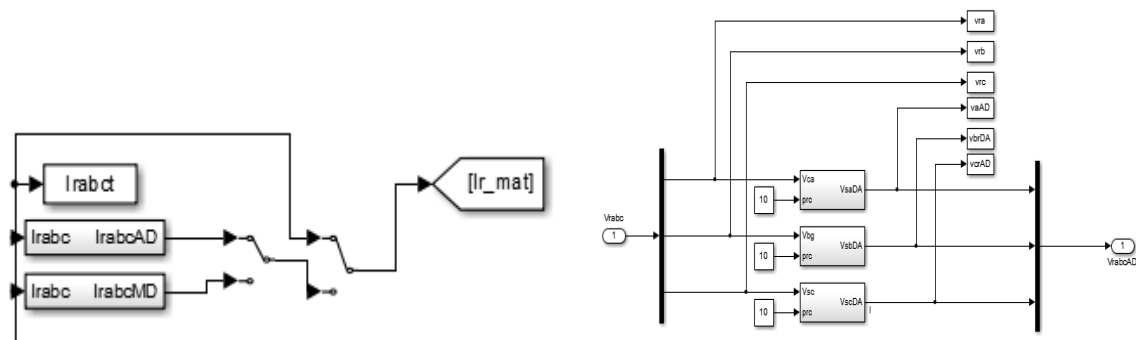


Figure3. 6: Défaut rotorique additifs courant

La figure 3.7 présente la création d'un défaut rotorique multiplicatif courant.

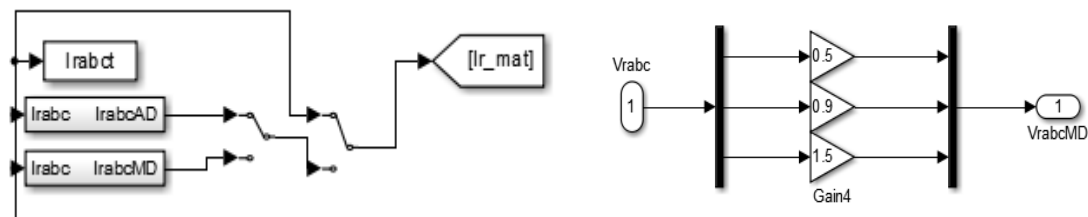


Figure3. 7: Défaut rotorique multiplicatif courant

La figure 3.8 présente la création d'un défaut rotorique additifs voltage.

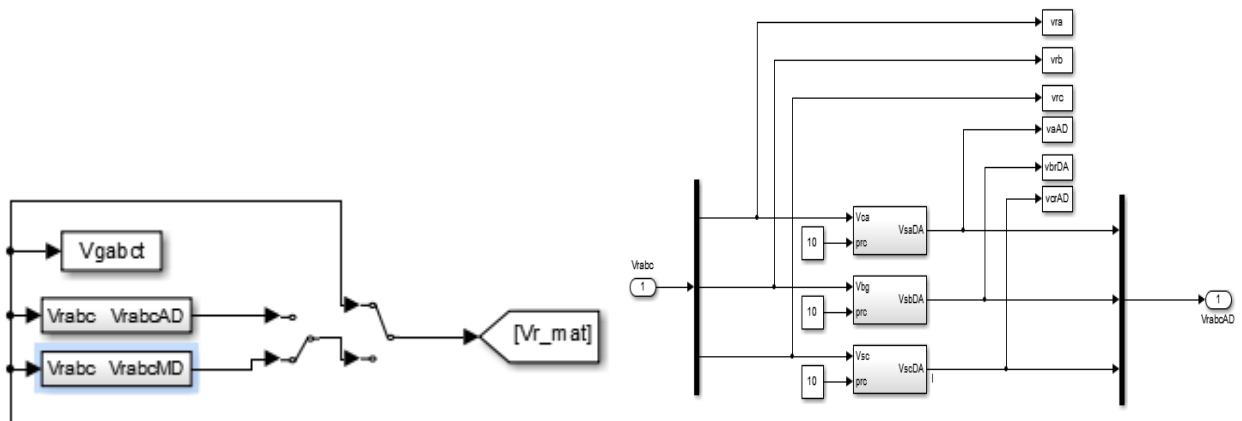


Figure3. 8: Défaut rotorique additifs voltage

La figure 3.9 présente la création d'un défaut rotorique multiplicatif voltage.

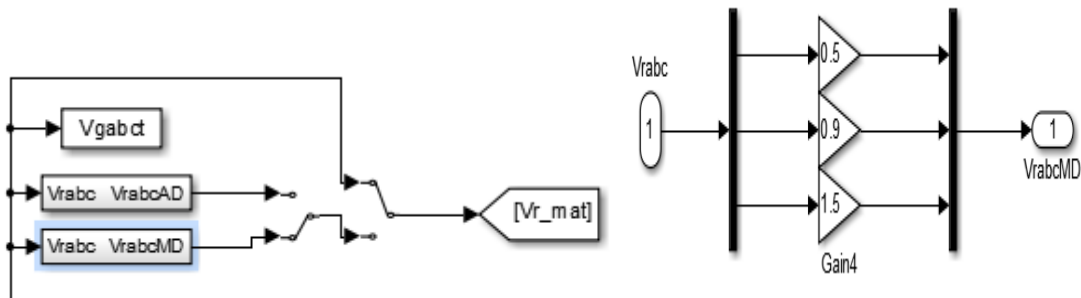


Figure3. 9: Défaut rotorique multiplicatif voltage

3.8.1.3. Défaut au niveau DC Link

La figure 3.10 présente la création d'un défaut DC Link additif courant.

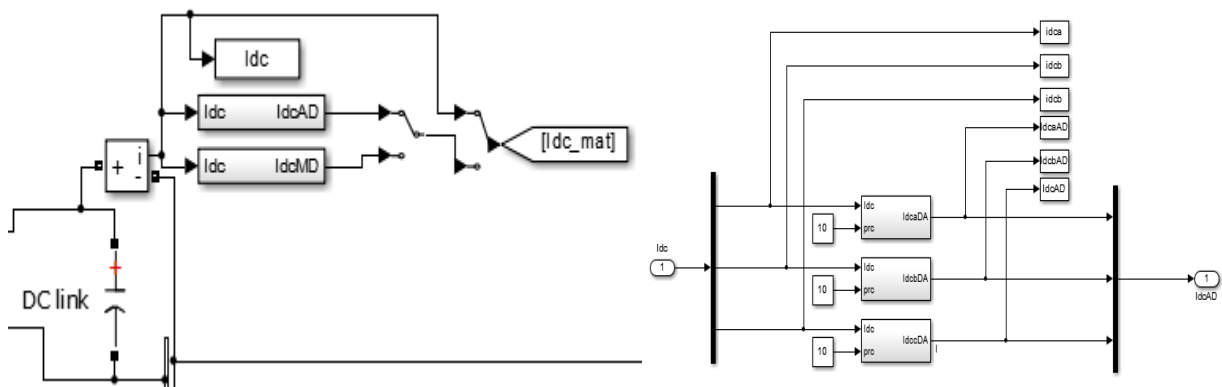


Figure3. 10: Défaut DC Link additif courant

La figure 3.11 présente la création d'un défaut DC Link multiplicatif courant

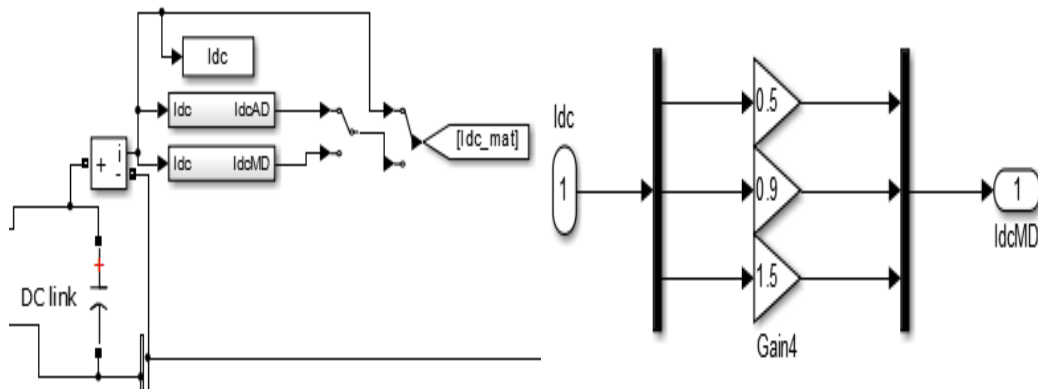


Figure3. 11: Défaut DC Link multiplicatif courant

La figure 3.12 présente la création d'un défaut DC Link additif voltage

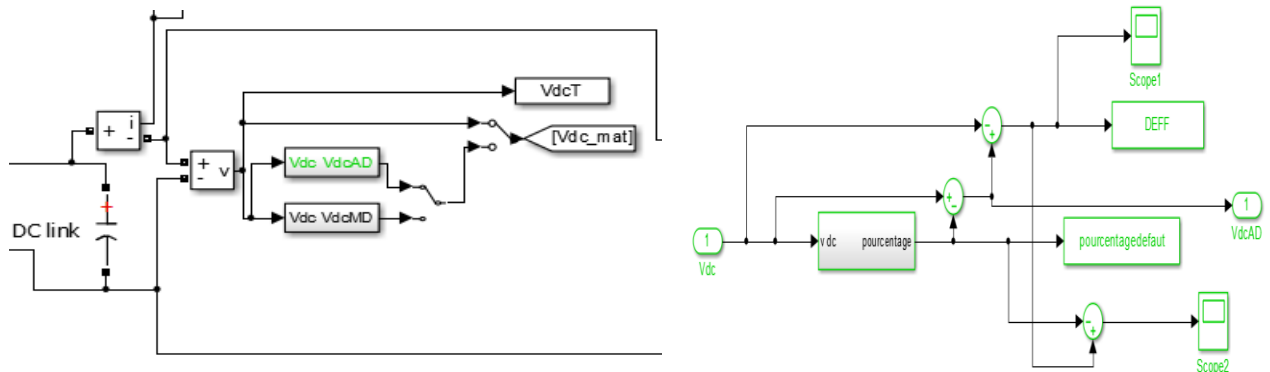


Figure3. 12: Défaut DC Link additif voltage

La figure 3.13 présente la création d'un défaut DC Link multiplicatif voltage.

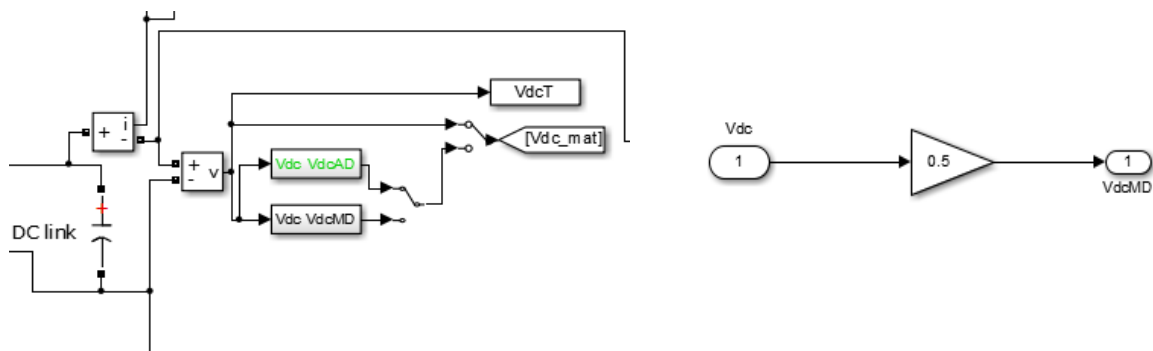


Figure3. 13: Défaut DC Link multiplicatif voltage

3.8.1.4. Défaut glisseur

La figure 3.14 présente la création d'un défaut glisseur additif courant sous l'environnement Matlab.

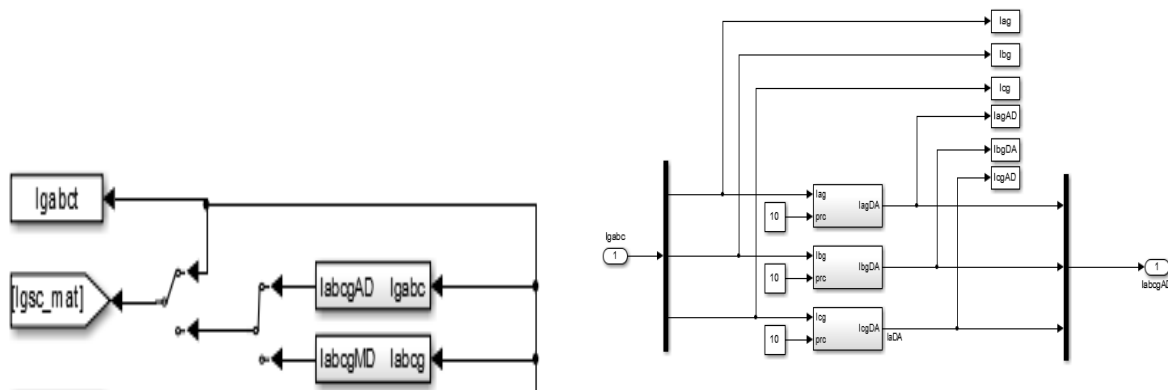


Figure3. 14: Défaut glisseur additif courant

La figure 3.15 présente la création d'un défaut glisseur multiplicatif courant sous l'environnement Matlab.

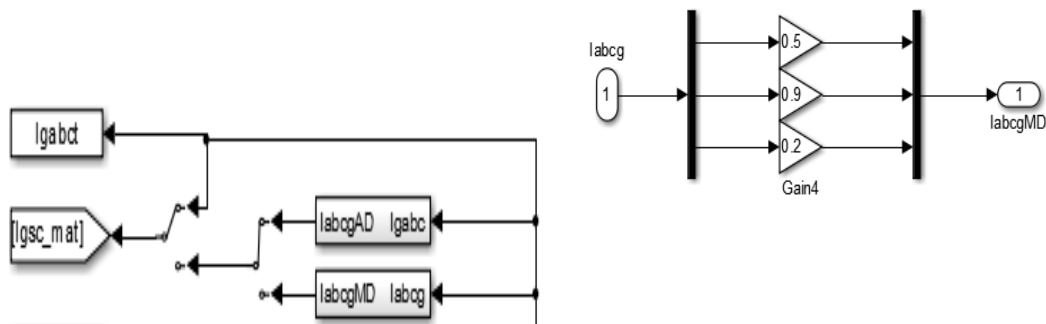


Figure3. 15: Défaut glisseur multiplicatif courant

La figure 3.16 présente la création d'un défaut glisseur additif voltage sous l'environnement Matlab.

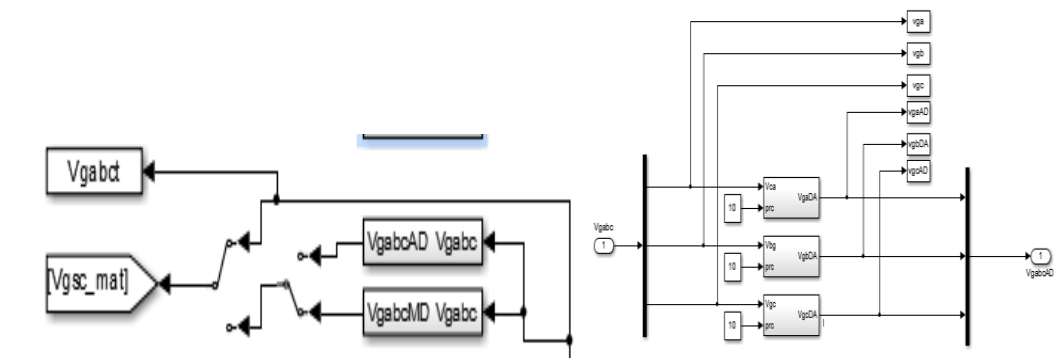


Figure3. 16: Défaut glisseur additif voltage

La figure 3.17 présente la création d'un défaut glisseur multiplicatif voltage .

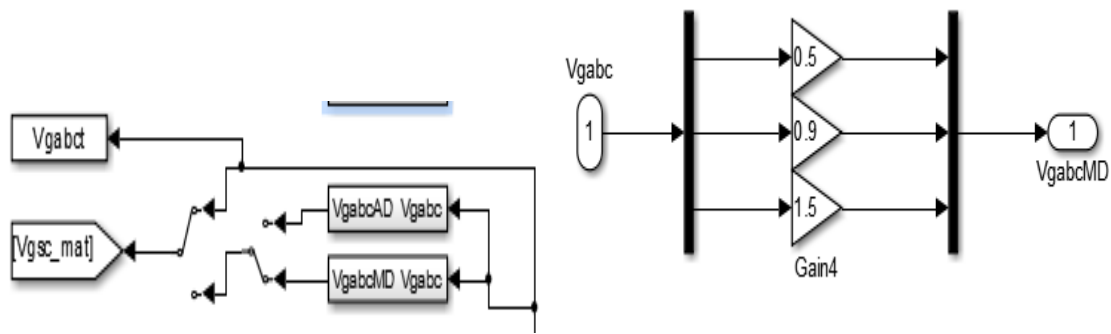


Figure3. 17: Défaut glisseur multiplicatif voltage

3.8.2. Effet défaut

La figure 3.18 présente la réponse d'une machine asynchrone à double alimentation sans défaut avec une consigne variable (couleur verte sur la figure 3.18). On constate que la réponse de notre système suit toujours la consigne en fonction du temps.

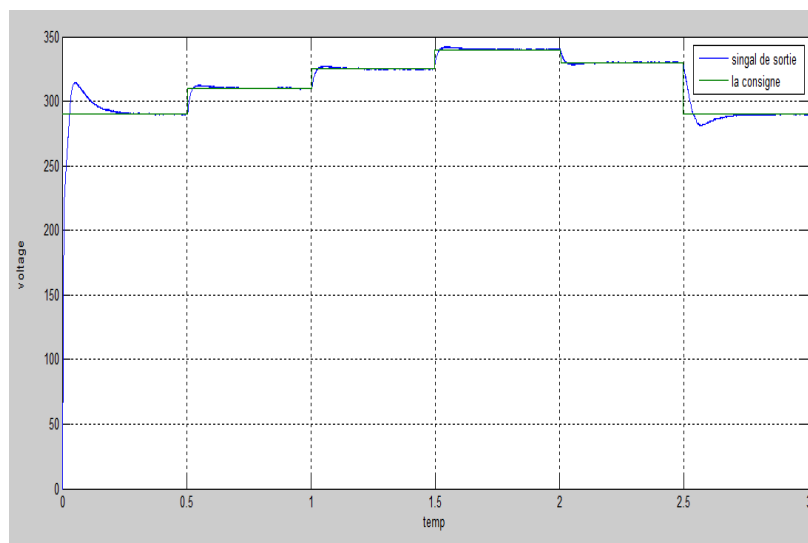


Figure3. 18: Réponse de MADA sans défaut

Pour créer la consigne variable dans ce travail sous Matlab on a utilisé le diagramme Simulink de la figure 3.19.

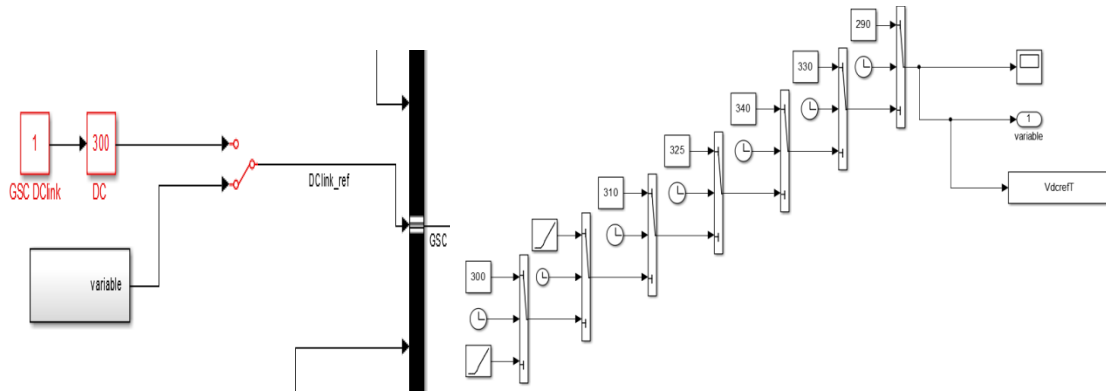
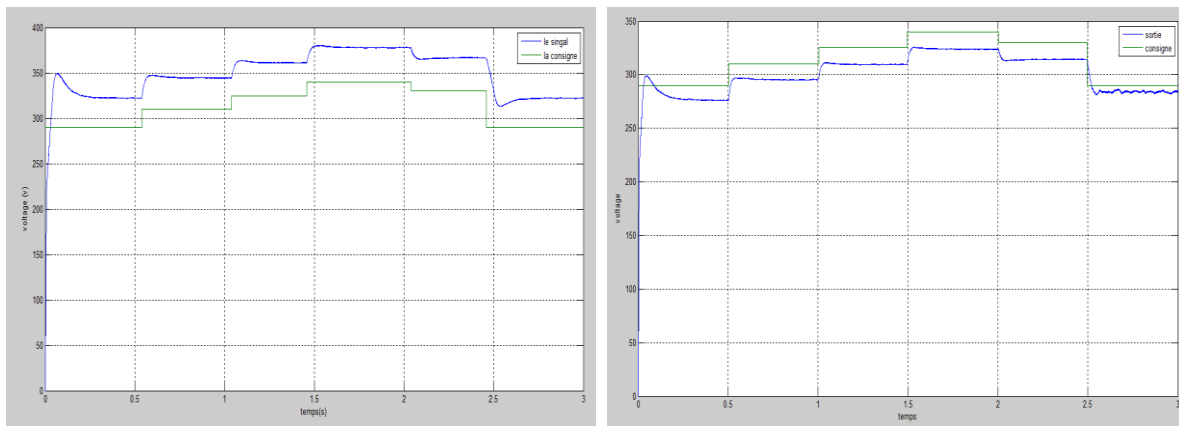


Figure3. 19: Consigne variable

3.8.2.1. Effet défaut statorique

La figure 3.20 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut de $\pm 10\%$ de la consigne.

Figure3. 20: Défaut de $\pm 10\%$ de la consigne

La figure 3.21 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut de $\pm 5\%$ de la consigne.

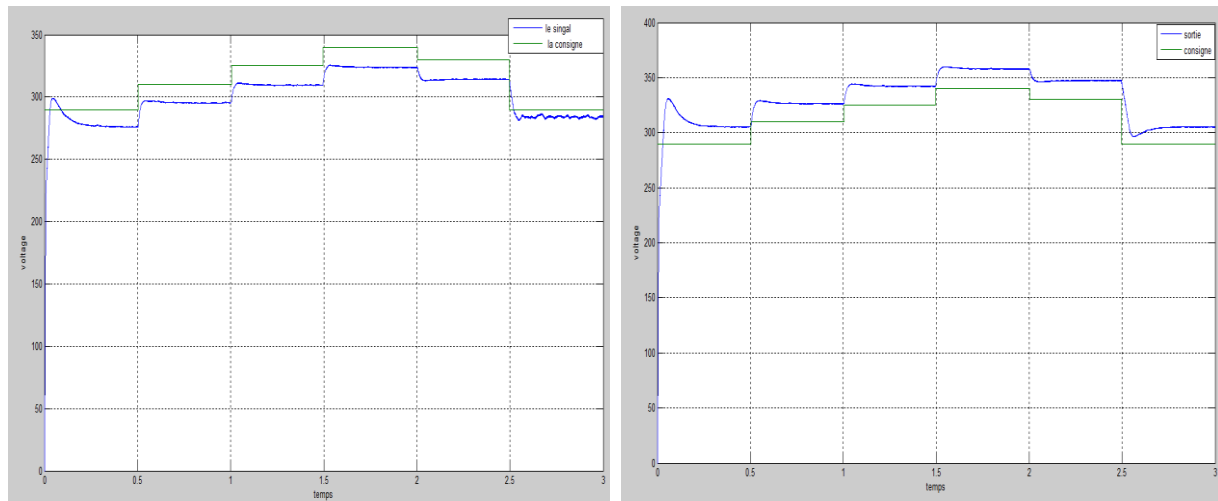


Figure3. 21: Défaut de $\pm 5\%$ de la consigne

La figure 3.22 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut de $\pm 2\%$ de la consigne.

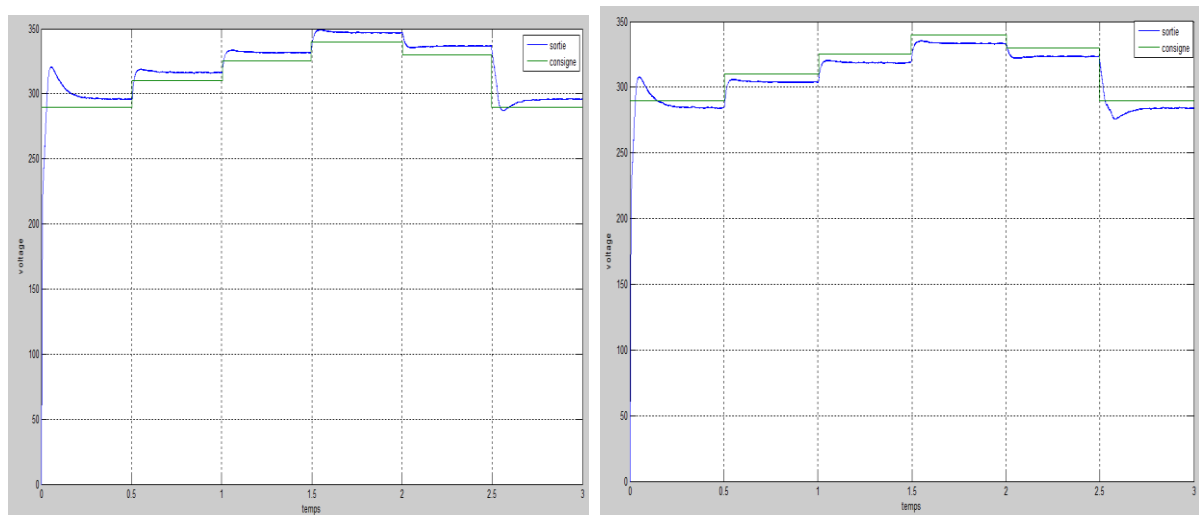


Figure3. 22: Défaut de $\pm 2\%$ de la consigne

La figure 3.23 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif de 0.8 .

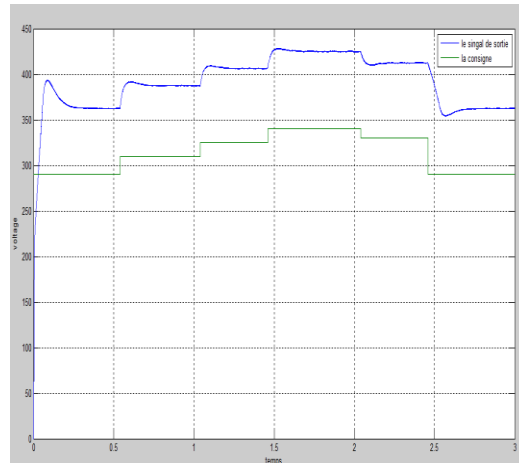


Figure3. 23: Défaut multiplicatif du gain 0.8

La figure 3.24 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicateur du gain de 0.9.

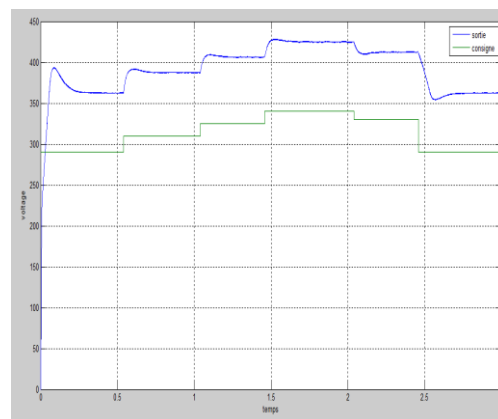


Figure3. 24: Défaut multiplicatif du gain de 0.9

La figure 3.25 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif du gain de 1.2 .

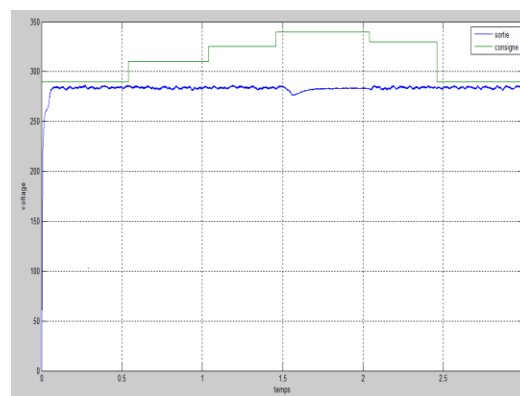


Figure3. 25: Défaut multiplicatif du gain de 1.2

La figure 3.26 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif du gain de 1.5.

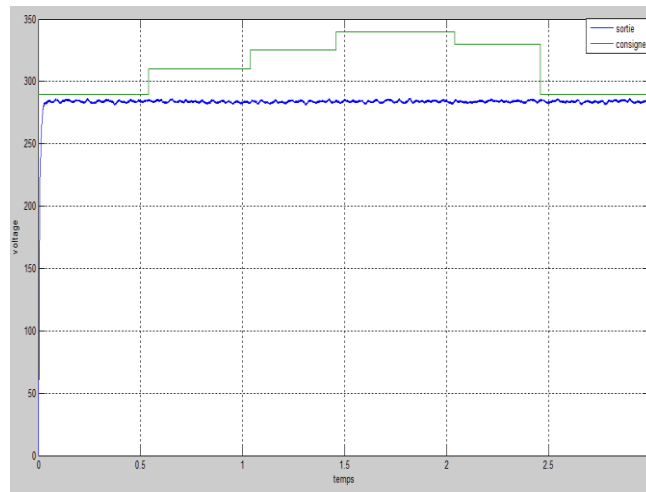


Figure3. 26: Défaut multiplicatif du gain de 1.5

La figure 3.27 présente l'effet des défauts statorique sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif du gain de 1.9.

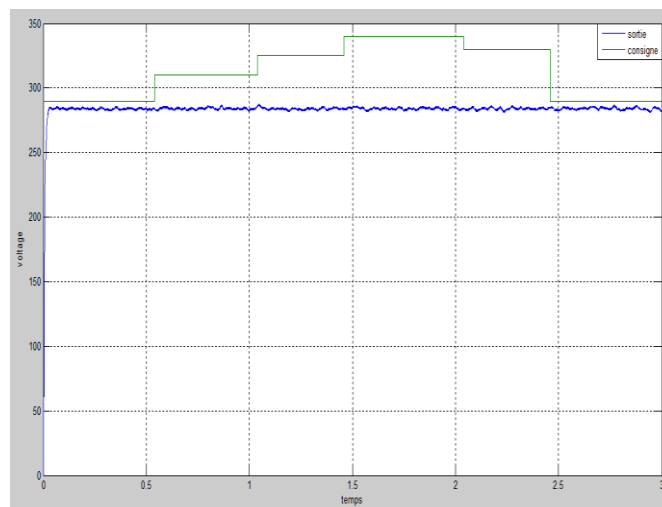


Figure3. 27: Défaut multiplicatif du gain de 1.9

3.8.2.2. Effet défaut DC Link

La figure 3.28 présente l'effet des défauts DC Link sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut additif du -5% de la consigne.

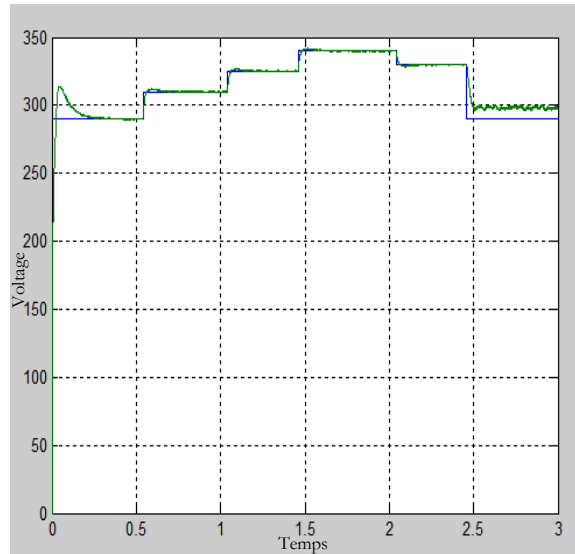


Figure3. 28: Défaut additif du -5% de la consigne

La figure 3.29 présente l'effet des défauts DC Link sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut additif du 10 % de la consigne.

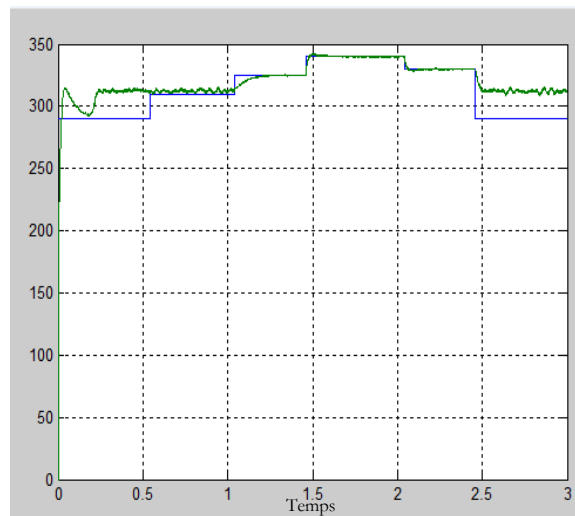


Figure3. 29: Défaut additif du 10% de la consigne

La figure 3.30 présente l'erreur des défauts DC Link sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif du gain de 0.5 .

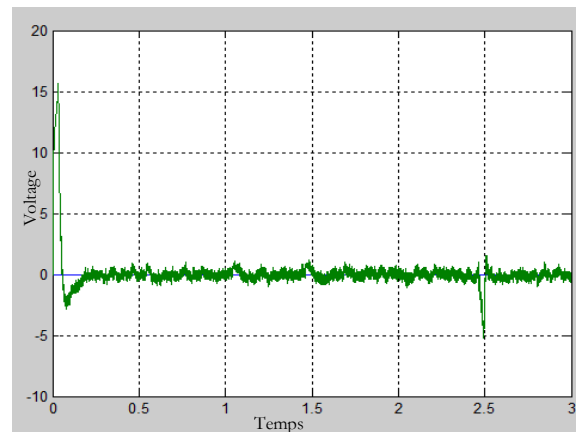


Figure3. 30: Erreur de défaut multiplicatif du gain de 0.5

La figure 3.31 présente l'effet des défauts DC Link sur le fonctionnement de la MADA pour un défaut multiplicatif du gain de 1.9.

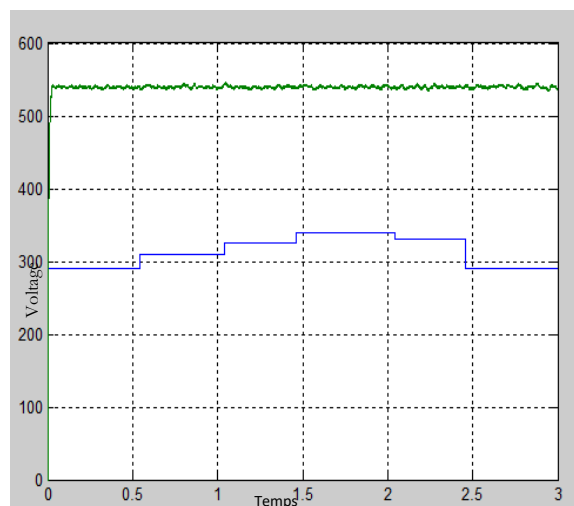


Figure3. 31: Défaut multiplicatif du gain de 1.9

3.8.3. Interprétation des résultats

D'après les figures précédentes, on constate que lorsque on augmente le degré de défaut additif ou multiplicatif le régulateur PI perd leur fonctionnement (régulation de la sortie de MADA).

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode de simulation des défauts simples et simultanés sur la machine asynchrone doublement alimentée d'une éolienne.

Ce chapitre est consacré aussi sur la simulation en utilisant le logiciel MATLAB & Simulink de toute la chaîne de conversion éolienne fonctionnant à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et avoir l'effet des défauts sur cette machine.

Les travaux de recherche réalisés au cours de ce travail avaient pour objectif de faire une Contribution à l'étude de système éolien et simulation de l'effet des défauts de capture sur la machine asynchrone à double alimentation.

Dans un premier temps, nous avons présenté un état de l'art sur la situation du marché éolien mondial. Nous avons donc constaté que ces marchés subissent une grande expansion et que l'énergie éolienne bénéficie d'un intérêt croissant dans ces régions, en particulier pour la production de l'électricité. Ensuite, pour se familiariser avec le domaine de l'énergie éolienne, nous avons défini quelques notions élémentaires et nous avons décrit davantage le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs types et leur constitution. Aussi, un état de l'art sur les méthodes de diagnostic des défauts des systèmes industriels a été réalisé.

Vu les avantages énormes qu'apporte l'élaboration des méthodes de diagnostic à base de Modèle, tels que : la simplicité, la réduction des coûts importants et de l'espace supplémentaire nécessaire pour l'implantation de la redondance physique (ou matérielle), la fiabilité de détection et de localisation des défauts ; nous avons choisi d'utiliser les méthodes à base de modèle analytique pour le diagnostic des défauts de la MADA.

L'élaboration des méthodes de diagnostic à base de modèle, requiert une étape préliminaire de modélisation analytique du système. De ce fait, nous avons, dans un second temps, modélisé à l'aide d'équations mathématiques et simulé virtuellement et avec un temps relativement court, le fonctionnement de toute la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, y compris la MADA, dans le logiciel MATLAB & Simulink. Les signaux issus des simulations ont été exploités par la suite pour l'élaboration des techniques de diagnostic de défauts de la MADA.

Les résultats de simulation obtenus ont montré les performances des techniques de diagnostic proposées pour détecter la présence ou non d'un défaut, son instant d'apparition et son emplacement. Les défauts capteurs du type additif, les défauts actionneurs (creux de tension) et les défauts composants (court-circuit inter-spires et variation des valeurs nominales des résistances des enroulements) ont été étudiés.

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail de recherche peuvent être améliorés et perfectionnés aussi bien sur le plan méthodologique que sur le plan applicatif et pragmatique, et ceci en envisageant des travaux futurs. Les perspectives de ce travail peuvent porter sur :

- L'étude élargie à d'autres types de défauts (électriques ou mécaniques) de la MADA et mettre en exergue leur effet sur le reste des composants de la machine.
- Améliorer la précision du modèle analytique de la machine en réduisant les hypothèses simplificatrices telles que : Entrefer constant, Effet des encoches négligé, Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante, Pertes ferromagnétiques négligeables...etc.
- Implémenter les approches de diagnostic proposées et le modèle analytique de la MADA sur un banc d'essais réel, en vue de confronter les résultats de simulation avec ceux obtenus des expérimentations et aussi en vue discerner entre les différents comportements de la machine dans les deux cas de fonctionnement sain et défaillant.

Références Bibliographiques

- [1] BOUSSETTA M., ELBACHTIRI R., ELHAMMOUMI, Karima, et al. OPTIMAL SIZING OF GRID-CONNECTED PV-WIND SYSTEM CASE STUDY: AGRICULTURAL FARM IN MOROCCO. Journal of Theoretical & Applied Information Technology, 2016, vol. 86, no 2.
- [2] BOUSSETTA, M., EL BACHTIRI, R., KHANFARA, M., et al. Assessing the potential of hybrid PV-Wind systems to cover public facilities under different Moroccan climate conditions. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2017, vol. 22, p. 74-82.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/eolien-dans-le-monde-les-nouvelles-installations-en-2021-e-n-infographies-220610>
- [4] *Global Wind Report 2022*, GWEC, avril 2022.
- [5] R. Hamouche, Atlas Vent de l'Algérie, Office National de la Météorologie, Alger, 1990 S.M.
- [6] Boudia, Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie Thèse de Doctorat. Univ. de Tlemcen, 2013
- [7] Potentiel éolien en Algérie, CREG, Adrar, mars 2015.
- [8] Énergie Éolienne : Transformer le Vent en Électricité. Available at: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/> (Accessed: 10 April 2019).
- [9] Gouadec, D. Energie Electrique Eolienne Production, prévision et intégration au réseau, DUNOD. 2015
- [10] DJERIRI, Yousef et MEROUFEL, Abdelkader. Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle. 2015. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, République Algérienne Démocratique et Populaire.
- [11] Poitiers Frédéric, "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. Université de Nantes, 2003
- [12] energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes

- [13] AKHMATOV, Vladislav. Induction generators for wind power. Multi-Science Publishing, 2007.
- [14] AKHMATOV, Vladislav. Induction generators for wind power. Multi-Science Publishing, 2007..
- [15] Teninge Alexandre, "PARTICIPATION AUX SERVICES SYSTÈME DE PARCS ÉOLIENS MIXTES : APPLICATION EN MILIEU INSULAIRE", Institut National Polytechnique de Grenoble. Thèse de doctorat, 2010. Available at: <https://tel.archivesouvertes.fr/tel-00473142> .
- [16] Muljadi, E. and Butterfield, C. P. (2002) 'Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation', IEEE Transactions on Industry Applications, 37(1), pp. 240–246. doi: 10.1109/28.903156.
- [17] FRANCOIS, Bruno, ROBYNS, Benoit, DE JAEGER, Emmanuel, et al. Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension : L'Energie éolienne. REE. Revue de l'électricité et de l'électronique, 2005, no 5, p. 65-74.
- [18] DJERIRI, Youcef et MEROUFEL, Abdelkader. Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle. 2015. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, République Algérienne Démocratique et Populaire
- [19] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. École Centrale de Lille.
- [20] CARON, Jean-Pierre et HAUTIER, Jean-Paul. Modélisation et commande de la machine asynchrone. Paris: Technip, 1995.
- [21] Toufouti Riad, Contribution de la commande directe du couple de la machine asynchrone, Thèse, (2008), Université Mentouri de Constantine, Algérie
- [22] Sylla, Abdoulaye Mamadie. Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois Rivières.
- [23] VELLEMAN P., BILLAUDEL P. and RIERA B., «Traceability, a new approach to obtain decision-making aid», European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control, EAM'06, Valenciennes, France, 2006
- [24] Zwingelstein, G. Diagnostic des défaillances -Théorie et pratique pour les systèmes industriels. Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, Paris, 1995
- [25] Chafouk Houcine, Rapport 'état de l'Art des Méthodes de Diagnostic. 2016
- [26] R. Isermann. An introduction from fault detection to fault tolerance. Springer,

New York, NY, USA, 2006. 15

[27] Dash, S., Venkatasubramanian, V. Challenges in the industrial applications of fault diagnostic systems. Proceedings of the conference on Process Systems Engineering Comput. & Chem, 2000

[28] Venkatasubramanian, V. et al. (2003) 'A review of process fault detection and diagnosis part III: Process history based methods', Computers and Chemical Engineering, 27(3), pp. 327–346. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00162-X.

[29] CHAFOUK H., HOBLOS G., LANGLOIS N., LE GONIDEC S., RAGOT J., Soft Computing Approach for Data Validation, Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, vol. 4, n°1, 628-635, 2007.

Résumé

Actuellement, les machines Asynchrones à Double Alimentation (MADA) sont omniprésentes dans le secteur éolien, grâce à leur simplicité de construction, leur faible coût d'achat et leur robustesse mécanique ainsi que le nombre faible d'interventions pour la maintenance. Cependant, comme toute autre machine électrique, ces génératrices sont sujettes aux défauts de différent ordre (électrique, mécanique, électromagnétique...) ou de différents types (capteur, actionneur ou composants du système). C'est pourquoi, il est primordial de concevoir une approche de diagnostic permettant de manière anticipée, de détecter, localiser et identifier tout défaut ou anomalie pouvant altérer le fonctionnement sain de ce type de machine. Motivés par les points forts des méthodes de diagnostic de défauts à base d'observateurs, nous proposons d'une part, dans ce mémoire, une approche de création des défauts de la MADA d'une éolienne à vitesse variable et d'avoir leurs effets sur le fonctionnement de la MADA.

Abstract

Currently, Double-Feed Asynchronous machines (MADA) are ubiquitous in the wind sector, thanks to their simplicity of construction, their low purchase cost and their mechanical robustness as well as the low number of maintenance interventions. However, like any other electrical machine, these generators are subject to faults of different kinds (electrical, mechanical, electromagnetic, etc.) or of different types (sensor, actuator or system components). This is why it is essential to design a diagnostic approach allowing the early detection, localization and identification of any fault or anomaly that could alter the healthy operation of this type of machine. Motivated by the strengths of fault diagnosis methods based on observers, we propose on the one hand, in this thesis, an approach for creating the faults of the MADA of a variable speed wind turbine and to have their effects on the operation of MADA.

ملخص

في الوقت الحالي ، تنتشر الآلات غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة (MADA) في كل مكان في قطاع الرياح ، وذلك بفضل بساطة بنائها وتكلفة شرائها المنخفضة وقوتها الميكانيكية فضلاً عن انخفاض عدد تدخلات الصيانة. ومع ذلك ، مثل أي آلة كهربائية أخرى ، تخضع هذه المولدات لأعطال من أنواع مختلفة (كهربائية ، ميكانيكية ، كهرومغناطيسية ، إلخ) أو من أنواع مختلفة (أجهزة الاستشعار ، المشغل أو مكونات النظام). هذا هو السبب في أنه من الضروري تصميم نهج تشخيصي يسمح بالكشف المبكر وتحديد موقع وتحديد أي عيب أو شذوذ يمكن أن يغير التشغيل الصحيح لهذا النوع من الآلات. بدافع من نقاط القوة في طرق تشخيص الأعطال المستندة إلى المراقبين ، نقترح من ناحية ، في هذه المذكرة ، نهجاً لإنشاء أخطاء MADA لتوربينات الرياح متغيرة السرعة و معرفة آثارها على تشغيل MADA.