

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la communication  
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire de Fin d'étude  
En vue d'obtention du diplôme de master  
Domaine : Sciences et Technologies  
Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique et Systèmes

**Theme :**

# COMMANDE D'UNE EOLIENNE

Présenté par :

MOHAMMED ZOHIR BASSA

ABDELLAH MEHANI

Soutenu le 23/06/2024

Encadré par : AMEUR FATIMA

Jury :

Mr SAMAI Djamel

Prof

Président

UKM OUARGLA

Mr HAMZA Azzedine

MCA

Examineur

UKM OUARGLA

Année Universitaire 2023/2024

## **Remerciements**

*Avec toute notre gratitude et notre reconnaissance, nous adressons nos remerciements sincères à :*

*Allah Tout-Puissant, qui nous a guidés, soutenus et inspirés à chaque étape de ce travail.*

*Notre chère professeure, Amour Fatima, pour son soutien illimité et ses conseils précieux qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.*

*Tous nos professeurs distingués, qui n'ont ménagé aucun effort pour nous transmettre leur savoir et nous soutenir avec toute leur force et leur sagesse.*

*À tous ces individus, nous exprimons notre profonde reconnaissance et offrons ce travail en témoignage de notre gratitude et de notre appréciation pour leur contribution importante et leur soutien constant.*

*Bassa Mohammed Zohir et Mehani Abdellah*

## *Dédicaces*

*Tous nos remerciements s'adressent :*

*À nos chers parents pour leur soutien inébranlable et leur amour  
inconditionnel,*

*À nos enseignants et professeurs qui ont partagé leur savoir et leur  
sagesse avec nous,*

*À nos amis pour leur encouragement et leur amitié précieuse,*

*À toutes ces personnes, cette thèse leur est dédiée à titre de modeste  
remerciement pour leur aide et leur soutien tout au long de ce parcours.*

*Bassa Mohammed Zohir et Mehani Abdellah*

## SOMMAIRE

SOMMAIRE .....	4
LISTE DES TABLEAUX .....	7
NOTATIONS SYMBOLIQUES .....	8
GLOSSAIRE .....	10
INTRODUCTION GENERALE .....	11
CHAPITRE. I : "SYSTEMES DE CONVERSION EOLIENS" .....	14
I.1 INTRODUCTION .....	15
I.2 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : FONDEMENTS ET CONTRAINTES .....	15
I.3 L'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE .....	16
I.4 VARIÉTÉS D'ÉOLIENNES .....	16
I.4.1 Éoliennes à axe vertical .....	16
I.4.2 Éoliennes à axe horizontal .....	17
I.5 DESCRIPTION GLOBALE D'UN SYSTÈME ÉOLIEN .....	18
I.6 PUISSANCE AÉRODYNAMIQUE CAPTURÉE PAR L'ÉOLIENNE ET COEFFICIENT DE PUISSANCE .....	20
I.7 RÉGLAGE MÉCANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE .....	22
I.7.1 Le "Pitch Control" .....	23
I.7.2 Le "Stall Control" .....	24
I.7.3 Vitesse du vent de manière continuellement variable .....	25
I.7.4 Types de machines électriques employées dans les systèmes éoliens .....	26
I.8 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE .....	29
I.9 Conclusion .....	30
CHAPITRE II : DESCRIPTION ET MODEILISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE .....	32
II.1 INTRODUCTION .....	33
II.2 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN A ETUDIER .....	33
II.2.1 Description de la génératrice asynchrone double étoile .....	33
II.2.2 Hypothèses simplificatrices .....	34
II.2.3 Modèle général de la MASDE .....	35
II.3 LA TRANSFORMATION DE PARK .....	37
II.3.1 Application de la transformation de Park .....	38
II.3.2 Équations des tensions .....	39
II.3.3 Équations des flux .....	40
II.3.4 Equation mécanique .....	41
II.3.5 Couple électromagnétique : .....	41
II.3.6 Choix de référence .....	42
II.3.7.1 Modèle de la machine .....	42
II.3.7.2 Mise sous forme d'équation d'état .....	43
II. 3.7.3 Résultats de simulation .....	45

II.4 ALIMENTATION DE LA MASDE PAR ONDULEUR DE TENSION À COMMANDE MLI .....	47
II.4.1 Modélisation de l'onduleur de tension commande MLI .....	47
II.4.2 Fonction de connexion .....	49
II.4.3 Commande par MLI à hystérésis .....	51
II.5 MODLISATION DE LA TURBINE EOLIENNE .....	52
II.5.1 Modélisation de la vitesse du vent .....	52
II.5.2 Modélisation de la turbine .....	53
II.5.3 Génération du couple éolien .....	53
II.5.4 Modèle du multiplicateur .....	55
II.6 CONCLUSION .....	56
CHAPITRE III : Commande direct du couple (CDC) .....	57
III.1 INTRODUCTION .....	58
III.2 COMMANDE DIRECTE DU COUPLE (CDC) .....	58
III.3 PRINCIPE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE D'UNE GASDE .....	58
III.3.1 Règles de comportement des grandeurs à contrôler (Flux et Couple) .....	58
III.4 FONCTIONNEMENT ET SEQUEUNCES D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE .....	60
III.4.1 Estimation de flux et de couple .....	61
III.4.2 Élaboration de vecteur de commande .....	62
III.4.3 Élaboration de la table de commande .....	64
III.4.4 Structure générale du contrôle direct de couple d'une GASDE .....	65
III.5 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION .....	66
III.5.1 Application profil constant .....	66
III.6 CONCLUSION .....	69
CONCLUSION GENERALE .....	70
BIBLIOGRAPHIE .....	72
ANNEXE A .....	76

## LISTE DES FIGURES :

Fig. I. 1. Éoliennes à axe vertical. ....	1
Fig. I. 2. Éoliennes à axe horizontal. ....	1
Fig. I. 3. Fonctionnement fondamental d'un système éolien. ....	1
Fig. I. 4. Principaux composants d'un système éolien . ....	1
Fig. I. 5. Illustration de la loi de Betz. ....	1
Fig. I. 6. Le rapport entre la puissance extraite par la turbine éolienne et la puissance totale du flux d'air non perturbé, en fonction du rapport des vitesses du vent en aval et en amont, est établi par . ....	1
Fig. I. 7. La puissance effective transmise par l'arbre en fonction de la vitesse du vent. ....	1
Fig. I. 8. Courbe de puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour diverses vitesses du vent. ....	1
Fig. I. 9. Système éolien utilisant une machine asynchrone à cage connectée au réseau. ....	1
Fig. I. 10. Système éolien utilisant une machine synchrone. ....	1
Fig. I. 11. Système éolien utilisant une machine asynchrone à cage. ....	1
Fig. I. 12. Système éolien utilisant une machine asynchrone à double alimentation. ....	1
Fig. I. 13. Système éolien utilisant une machine asynchrone à double étoile. ....	1
Fig. II. 1. Représentation des enroulements de la GASDE. ....	1
Fig. II. 2. Représentation de la MASDE et sa machine biphasée. ....	1
Fig. II. 3. Représentation des enroulements de la MASDE selon le repère de Park. ....	1
Fig. II. 4. Réponse de MASDE alimentée directement par des sources sinusoïdales. ....	1
Fig. II. 5. Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension. ....	1
Fig. II. 6. Schéma de l'Onduleur de tension triphasé à deux Niveaux. ....	1
Fig. II. 7. Représentation d'une paire (transistor, diode) par un interrupteur. ....	1
Fig. II. 8. Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur . ....	1
Fig. II. 9. Modèle mécanique simplifié de la turbine. ....	1
Fig. II. 10. Profil aérodynamique d'une pale. ....	1
Fig. II. 11. Coefficient aérodynamique en fonction de ratio de vitesse $\lambda$ pour une éolienne de 1.5 MW. ....	1
Fig. II. 12. Schéma bloc du modèle de la turbine. ....	1
Fig. III. 1. Evolution de l'extrémité du vecteur $\phi_s$ . ....	1
Fig. III. 2. Séquences de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux. ....	1
Fig. III. 3. Sélection des tensions correspondante du contrôle de l'amplitude de flux statorique. ....	1
Fig. III. 4. Correcteur de couple à trois niveaux. ....	1
Fig. III. 5. Structure générale du contrôle direct de couple d'une GASDE. ....	1
Fig. III. 6. Profil constant. ....	1
Fig. III. 7. Résultats de simulation de la DTC de l'aérogénérateur asynchrone double étoile. .	1

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tab. III. 1.Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux .....	1
Tab. III. 2.Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux .....	1

## NOTATIONS SYMBOLIQUES

<b>Symbole</b>	<b>Signification</b>	<b>Unité</b>
$\alpha$	Angle entre le stator 1 et stator 2	(°)
$\beta$	Angle de calage des pales de la turbine.	(°)
$C_p$	Coefficient de puissance	<b>Sans unité</b>
$C_{aer}$	Couple aérodynamique	<b>N.m</b>
$C_{em}$	Couple électromagnétique	<b>N.m</b>
$C_r$	Couple mécanique de la turbine	<b>N.m</b>
$f$	Fréquence du réseau	<b>Hz</b>
$K_f$	Le coefficient de frottement.	<b>Kg/m<sup>2</sup></b>
$J$	Le Moment d'inertie de la machine	<b>Kg .m<sup>2</sup></b>
$G$	Multiplicateur de vitesse	<b>Sans unité</b>
$L_m$	Inductance de magnétisation.	<b>H</b>
$L_{s1}$	Inductance propre de la 1 <sup>ère</sup> étoile	<b>H</b>
$L_{s2}$	Inductance propre de la 2 <sup>ème</sup> étoile	<b>H</b>
$L_{mr}$	Mutuelle rotorique	<b>H</b>
$L_r$	Inductance propre d'une phase du rotor	<b>H</b>
$L_{ms}$	Mutuelle statorique	<b>H</b>
$M_{sr}$	Inductance mutuelle entre une étoile	<b>H</b>
$P$	Nombre de paires de pôles de la machine.	<b>Sans unité</b>
$\rho$	Densité de l'air	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
$S$	Surface balayée par la turbine	<b>m<sup>2</sup></b>
$V_{vent}$	Vitesse de vent	<b>m/s</b>
$\omega_{coor}$	Vitesse de rotation du repère (d, q) par rapport au l'étoile 1	<b>tr/mn</b>
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique	<b>rad/s, tr/mn</b>

$\omega_{gl}$	Pulsation électrique fondamentale du glissement.	<b>rad/s</b>
$\omega_r$	Pulsation électrique rotorique	<b>rad/s, tr/mn</b>
$\Omega_m$	La vitesse mécanique du rotor.	<b>tr/mn</b>
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine	<b>Rad/s</b>
$\Omega_s$	Vitesse liée au nombre de paires de pôles par la relation	<b>Rad/s</b>
$\Omega_{mec}$	La Vitesse de rotation mécanique du rotor	<b>Rad/s</b>
$\lambda_{opt}$	Rapport de vitesse optimale	<b>Sans unité</b>
$\lambda$	Rapport de vitesse	<b>Sans unité</b>
$\phi_r$	Flux rotorique	<b>Wb</b>
$a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}$	Les indices correspondants aux trois phases du stator1.	<b>Sans unité</b>
$a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}$	Indices correspondants aux trois phases du stator2.	<b>Sans unité</b>
$a_r, b_r, c_r$	Indices correspondants aux trois phases du rotor.	<b>Sans unité</b>
$\theta_0$	La position initiale du rotor par rapport au l'étoile1	<b>(°)</b>

**GLOSSAIRE**

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
<b>GASDE</b>	Génératrice Asynchrone Double Etoile.
<b>MASDE</b>	Machine Asynchrone Double Etoile.
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion.
<b>DTC</b>	Direct Torque Control

# **INTRODUCTION GENERALE**

## 1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUES :

Avec l'augmentation de la consommation d'énergie et la voracité de l'industrie ainsi que la croissance de la consommation domestique ces dernières années, la recherche de sources d'énergie durables est devenue une nécessité urgente. L'énergie nucléaire, adoptée par les pays avancés, offre une solution prometteuse pour la production d'électricité sans émissions polluantes, contrairement aux centrales thermiques (à vapeur ou à gaz). Cependant, les risques d'accidents nucléaires et les défis liés au traitement des déchets jettent une ombre sur l'avenir de ce type d'énergie et suscitent des préoccupations chez les générations futures.

Face à ces problèmes, les énergies renouvelables offrent un rayon d'espoir pour les générations futures, en constituant une alternative prometteuse. Ces sources, telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne, se distinguent par leur durabilité, ne produisant aucune émission nocive de CO<sub>2</sub> résultant de la combustion des combustibles fossiles [TOU 10].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en génie électrique à mener des études pour améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Cette étude vise à explorer les potentialités de l'énergie éolienne en tant que source d'énergie renouvelable prometteuse. Elle aborde deux aspects principaux : d'une part, elle se concentre sur les avancées technologiques dans le domaine de l'énergie éolienne qui ont permis la construction et le fonctionnement des éoliennes, ainsi que leur intégration dans la production d'énergie électrique ; d'autre part, nous nous concentrons sur la conception d'un système optimal de conversion de l'énergie éolienne en utilisant un générateur asynchrone double étoile (GASDE).

Les moteurs sont principalement des machines asynchrones, tandis que les générateurs sont des machines synchrones. Toutefois, ces dernières années, la recherche dans le domaine des énergies renouvelables a entraîné l'introduction de machines asynchrones en tant que générateurs, principalement en raison de leurs bénéfices, tels que l'absence de collecteurs mécaniques.

Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant à chaque fois le point de fonctionnement à maximum de puissance.

Dans le domaine du contrôle des éoliennes, les recherches se dirigent de plus en plus vers l'application des techniques de contrôle modernes. Dans ce travail, des techniques de contrôle

ont été proposées et développées, où la puissance active et réactive sont estimées à partir des seules grandeurs électriques mesurables, dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie et de réduire les distorsions produites par les convertisseurs des électroniques de puissance. Parmi ces techniques, on trouve la commande directe de couple (CDC). [Ame16B] [Lie06]

L'objectif de cette étude est d'examiner la technique de contrôle et d'amélioration des systèmes de conversion de l'énergie éolienne (SCEE) basés sur une machine asynchrone double étoile alimentée par des turbines éoliennes à vitesse variable.

## **2 CONTRIBUTIONS :**

Cette section présente l'apport du travail actuel dans le domaine des diverses méthodes de contrôle et de l'amélioration du système de conversion de l'énergie éolienne (SCEE) utilisant une machine asynchrone double étoile.

i. Dans le but d'améliorer les performances dynamiques, statiques et la robustesse du contrôle du Système de Conversion d'Énergie Éolienne (SCEE) basé sur une machine asynchrone double étoile, une technique de contrôle a été proposée, à savoir le Contrôle Direct du Couple (CDC). Par la suite, les résultats de simulation ont été présentés pour confirmer cette affirmation.

## **3 STRUCTURE DU MEMOIRE :**

Le travail en cours est structuré en trois chapitres approfondis de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à présenter le modèle dynamique du convertisseur d'énergie éolienne synchrone double. Tout d'abord, nous décrivons brièvement l'histoire et l'évolution de l'utilisation de l'énergie éolienne, puis nous passons en revue les différents types de turbines éoliennes et de générateurs utilisés, ainsi que les principaux éléments de la chaîne de conversion électromagnétique.

La modélisation de la machine asynchrone double étoile est abordée dans le deuxième chapitre, avec pour objectif de fournir une représentation simulable du système.

Dans le dernier chapitre, nous développerons une technique de commande (CDC) pour le convertisseur d'énergie éolienne synchrone double. Les performances et les améliorations apportées par cette technique seront présentées à travers les résultats de simulation.

Pour conclure ce travail, quelques remarques sont faites et une conclusion générale est présentée pour fournir un aperçu potentiel de la poursuite de ce travail.

# **CHAPITRE. I : "SYSTEMES DE CONVERSION EOLIENS"**

## I.1 INTRODUCTION

Après deux ans de pandémie de la COVID-19, l'espoir d'une relance verte pour reconstruire de manière plus durable était palpable dans le monde entier. Cependant, la transition énergétique mondiale tarde à se concrétiser. La reprise de l'activité économique a entraîné une augmentation d'environ 4 % de la demande mondiale d'énergie, principalement satisfaite par les combustibles fossiles. La montée des prix de l'énergie au second semestre de l'année, combinée à l'invasion de l'Ukraine par la Russie début 2022, a déclenché une crise énergétique mondiale sans précédent et a secoué les marchés des matières premières.

Nous sommes à un moment charnière pour la transition énergétique. L'urgence de la crise menaçant notre dépendance actuelle aux combustibles fossiles est alarmante. Il est impératif que nous nous tournions de toute urgence vers les énergies renouvelables dans tous les aspects de nos activités économiques et sociales. Les énergies renouvelables doivent être au cœur des réponses politiques à cette crise énergétique. Seule une économie guidée par l'efficacité énergétique et alimentée par les énergies renouvelables peut transformer notre système énergétique en un système plus sûr, résilient, abordable et durable.

## I.2 L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : FONDEMENTS ET CONTRAINTES

Le vent, à la fois principe et limite de l'énergie éolienne, est engendré par le déplacement des masses d'air, résultant des disparités de pression dues aux variations de température causées par l'irradiation solaire et la rotation de la Terre. Ces vents, variant selon la localisation géographique et la saison, sont mesurés en vitesse à l'aide d'un anémomètre et classés selon l'échelle de Beaufort, de la légère brise au violent ouragan.

Cependant, l'exploitation de l'énergie éolienne présente des défis. Malgré son caractère gratuit, inépuisable et écologique, elle est sujette à l'intermittence due aux variations de vent. De plus, la demande énergétique ne coïncide pas toujours avec la production, posant des problèmes de gestion pour les producteurs. Les éoliennes peuvent aussi générer du bruit et altérer le paysage. Avant leur installation, divers paramètres doivent être pris en compte, tels que la topographie, les obstacles, les patterns de vent favorables, et la durée de leur présence. Une analyse minutieuse du site est donc cruciale pour une exploitation efficace de l'énergie éolienne.

### **I.3 L'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

L'histoire de l'utilisation de l'énergie éolienne remonte à l'Antiquité, lorsque les premiers dispositifs étaient utilisés pour propulser les navires. Les premiers prototypes d'aéromoteurs, utilisés pour convertir l'énergie du vent en énergie mécanique, ont été découverts en Asie au début du Ve siècle. Cette technologie a ensuite été adaptée pour alimenter les moulins à vent à axe horizontal et pour pomper de l'eau.

Avec l'avènement de l'électricité et les progrès dans le domaine des générateurs électriques, la fusion entre l'énergie éolienne et les générateurs a été réalisée par Paul La Cour en 1891.

La crise pétrolière de 1974 a été un catalyseur majeur dans le développement et l'expansion des études et des expériences sur l'énergie éolienne. Cette crise a incité de nombreux pays, notamment le Danemark, à investir massivement dans cette source d'énergie renouvelable [Mor14], [Jon11].

### **I.4 VARIÉTÉS D'ÉOLIENNES**

Pour convertir l'énergie éolienne en électricité, plusieurs éléments de base sont nécessaires, tels que :

- Une hélice pour capter le vent.
- Une transmission mécanique pour transférer l'énergie mécanique produite.
- Générateur électromagnétique qui convertit facilement l'énergie mécanique en électricité.
- Un système de régulation et de liaison électrique pour contrôler et distribuer l'électricité produite.

Les différents types d'éoliennes varient principalement en fonction du type d'axe utilisé :

#### **I.4.1 Éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical sont principalement utilisées dans les petits projets éoliens et les applications résidentielles [Rib12]. Contrairement aux éoliennes à axe horizontal, elles ne nécessitent pas de système de direction du vent. Leur avantage majeur réside dans leur capacité à capter des vents très faibles, provenant de toutes les directions, sur 360 degrés. Certaines d'entre elles peuvent même fonctionner lorsque le vent souffle de haut en bas. Cette adaptabilité les rend idéales pour les installations où les conditions de vent sont variables. Cependant, en termes de production électrique, elles sont généralement moins efficaces que les éoliennes à axe horizontal.

Même si elles présentaient des avantages, les constructeurs ont peu à peu abandonné les éoliennes à axe vertical et se sont davantage tournés vers les éoliennes à axe horizontal.



Fig. I. 1. Éoliennes à axe vertical

#### I.4.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont largement prédominantes dans l'industrie éolienne en raison de leur haut rendement. Dans ce type de turbine, l'axe de rotation est horizontal par rapport à la Terre, ou parallèle à l'horizon. Elles sont généralement équipées d'hélices bipales, tripales ou multipales, montées sur des tours et munies d'un système de direction du vent. L'avantage de cette disposition horizontale réside dans sa capacité à générer plus d'électricité pour une quantité de vent donnée. Cependant, elles peuvent rencontrer des difficultés lorsqu'elles sont exposées à des vents turbulents en raison de leur taille. [Pra14], [Zhi13].



Fig. I. 2. Éoliennes à axe horizontal.

## I.5 DESCRIPTION GLOBALE D'UN SYSTÈME ÉOLIEN

Les systèmes de conversion d'énergie électromagnétique dans les éoliennes sont variés, mais l'usage prédominant de l'arbre horizontal à trois pales dans les éoliennes modernes, comme illustré dans la figure I.3, est justifié par plusieurs avantages :

- Production d'un couple important avec un faible niveau sonore
- Stabilité mécanique accrue avec des fluctuations minimales
- Efficacité énergétique supérieure
- Réduction des fluctuations de l'énergie électrique produite

Cette configuration à trois pales est également largement adoptée dans les parcs éoliens, renforçant sa réputation pour une exploitation durable et efficace de l'énergie éolienne.

La conversion de l'énergie éolienne implique des aspects aérodynamiques, mécaniques et électriques. Les pales captent l'énergie cinétique du vent, qui est ensuite convertie en énergie mécanique par une boîte de vitesses entraînant le rotor du générateur électrique.

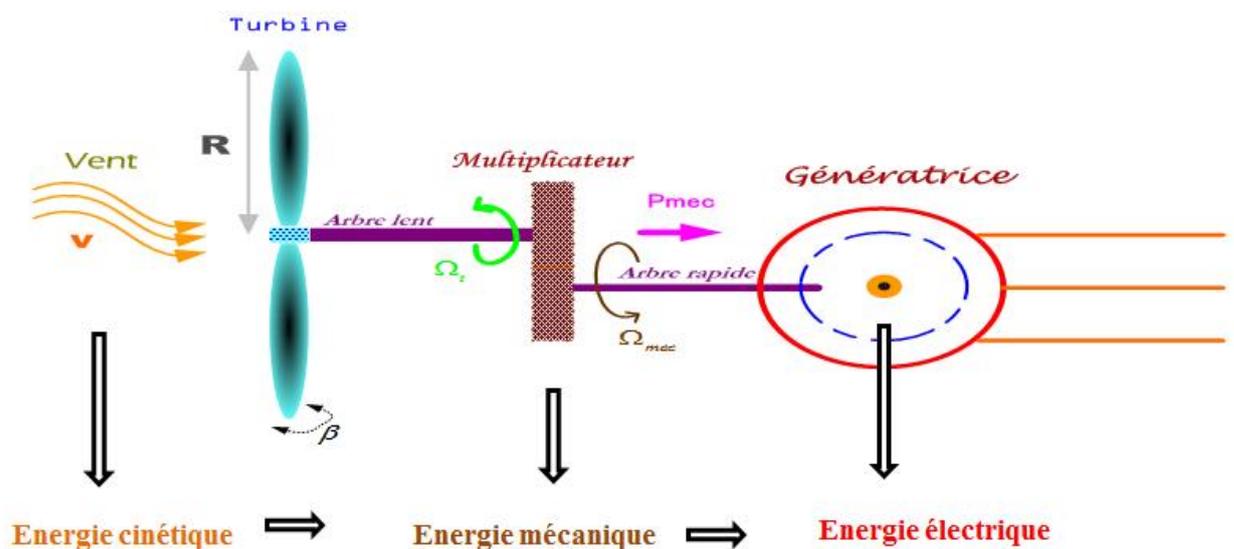


Fig. I. 3. Fonctionnement fondamental d'un système éolien.

Les éoliennes sont érigées sur des tours afin de maximiser la capture d'énergie. Idéalement, elles sont placées à une hauteur d'au moins 100 pieds (30 mètres) au-dessus du sol pour bénéficier de vents plus constants et moins turbulents.

Ces dispositifs peuvent servir à générer de l'électricité pour des habitations individuelles ou des bâtiments, tout en pouvant être connectés au réseau électrique pour une distribution plus large.

En tant que source d'énergie durable, les éoliennes jouent un rôle essentiel dans la production d'électricité, favorisant ainsi l'indépendance énergétique tout en préservant l'environnement.

### I.5.1 Principaux composants d'un système éolien

Les principaux composants d'un système éolien, comme illustré dans la figure (I.4), comprennent :

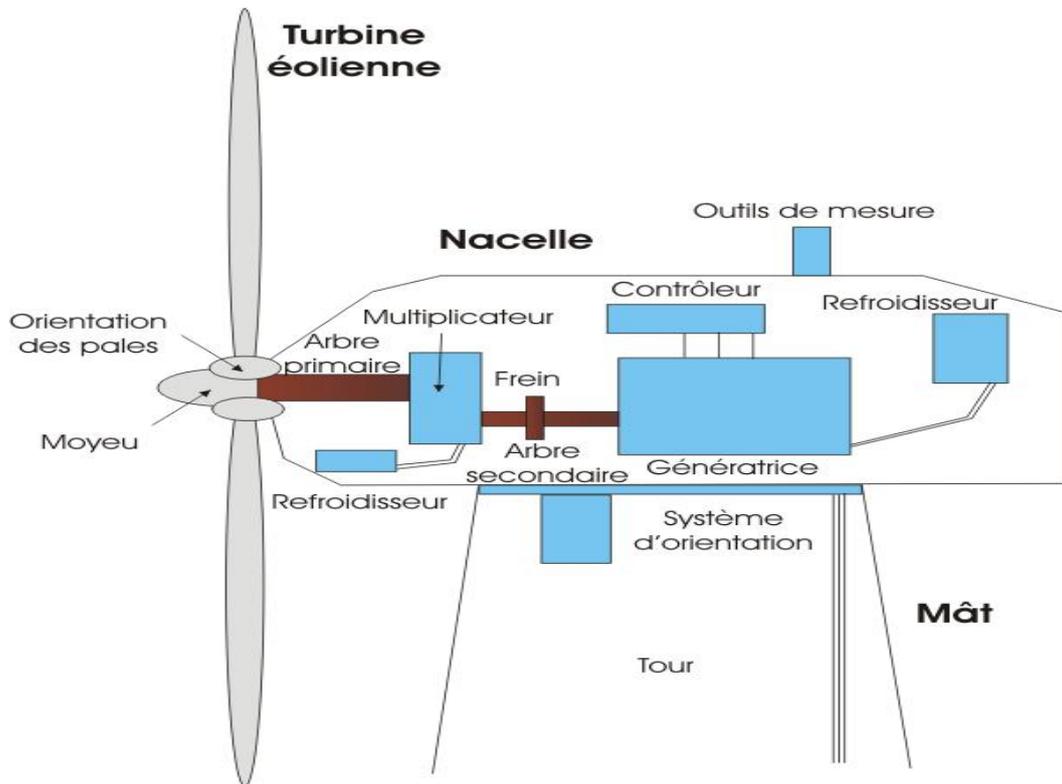


Fig. I. 4. Principaux composants d'un système éolien [Lec09].

- Le rotor et ses pales
- Le moyeu
- L'arbre
- La coquille de la nacelle
- La boîte de vitesses ou le multiplicateur
- Le système de dispositif de freinage sécuritaire
- La génératrice
- Le mât ou la tour
- La nacelle

## I.6 PUISSANCE AÉRODYNAMIQUE CAPTURÉE PAR L'ÉOLIENNE ET COEFFICIENT DE PUISSANCE

Selon le théorème de Betz, la vitesse du vent  $V$  qui traverse la surface  $S$  balayée par le rotor est supposée être égale à la moyenne entre la vitesse moyenne du vent non perturbé en amont de l'éolienne (notée  $V_1$ ) et sa vitesse après le passage à travers le plan du rotor (notée  $V_2$ ), comme illustré dans la figure (I.5). Cette relation est exprimée comme suit [CHA10] :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I. 1})$$

La masse d'air traversant la surface balayée par le rotor d'une éolienne est un aspect crucial pour comprendre son fonctionnement. Cette masse d'air est déterminée par la densité de l'air et la vitesse du vent.

La masse volumique de l'air (notée  $\rho$ ) est d'environ  $1,20 \text{ kg/m}^3$  à une température de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour calculer la masse d'air traversant la surface balayée par le rotor, nous pouvons utiliser la formule suivante :

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

où :

- $m$  : La masse d'air traversant l'éolienne.
- $\rho$  : la masse volumique de l'air (en  $\text{kg/m}^3$ ).
- $S$  : la surface balayée par le rotor (en  $\text{m}^2$ ).

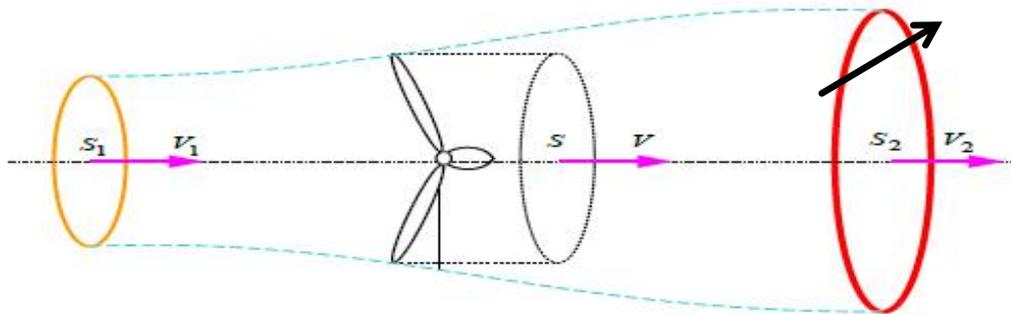


Fig. I. 5. Illustration de la loi de Betz.

Selon le deuxième principe de Newton, La puissance extraite du vent par la turbine peut être formulée comme suit [Abd07] :

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 3})$$

En remplaçant la masse par son évaluation en fonction de la densité, de la surface balayée et de la vitesse du vent au niveau des pales :

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2) \quad (\text{I. 4})$$

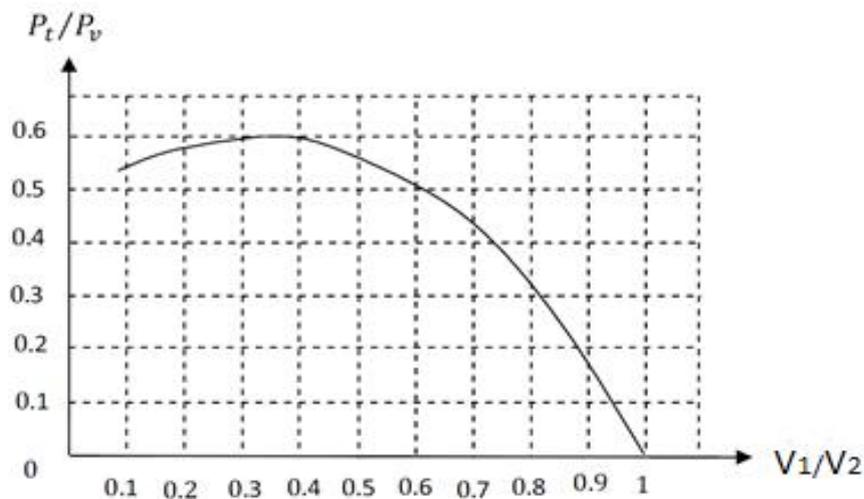
Comparons maintenant ce résultat à la puissance totale d'un flux d'air non perturbé qui traverse une même surface S sans l'intervention du rotor qui perturbe le vent. On observe cette puissance  $P_v$ , qui est fournie par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{I. 5})$$

Le rapport entre la force émise par le vent et la force théoriquement disponible est défini par :

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right) \left( 1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \quad (\text{I. 6})$$

En outre, la figure ci-dessous représente le rapport des deux forces en fonction du rapport des deux vitesses du vent en aval et en amont :



**Fig. I. 6.** Le rapport entre la puissance extraite par la turbine éolienne et la puissance totale du flux d'air non perturbé, en fonction du rapport des vitesses du vent en aval et en amont, est établi par [Ela04].

Selon la figure, nous remarquons que la fonction atteint son maximum pour une certaine valeur de  $(1/3)$ . La puissance maximale extractible du vent équivaut à 59 % de la puissance totale contenue dans le vent. Cependant, il est essentiel de noter que le dispositif de conversion extrait généralement une puissance inférieure à cette valeur. Pour quantifier cela, le coefficient de puissance de l'aérogénérateur est défini par la relation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{I. 7})$$

Avec :  $C_p < 1$  .

On peut également écrire :

$$P_t = C_p P_v \quad (\text{I. 8})$$

En remplaçant  $P_v$  par son expression (I.5) dans (I.8), nous obtenons :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V_1^3 \quad (\text{I. 9})$$

Où  $C_p$  est le coefficient de puissance qui dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut être exprimé en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  comme suit :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{I. 10})$$

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{I. 11})$$

Représente la vitesse spécifique, avec  $\Omega_t R$  étant la vitesse linéaire périphérique au bout de la pale de l'hélice.

Il est à noter que  $C_p$  peut varier pour le même type de turbine en fonction du nombre de pales (1, 2, 3 ou 4), mais sa valeur reste généralement en dessous de la limite de Betz (0.59). De plus, pour une même turbine, ce coefficient peut également varier en fonction de l'angle de calage, qui représente l'inclinaison des pales à chaque fois.

## I.7 RÉGLAGE MÉCANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE

La relation (I.9) énonce que la puissance captée par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Ainsi, il existe une vitesse nominale du vent pour laquelle l'éolienne est correctement dimensionnée dans tous ses composants. Cette vitesse nominale permet à la turbine éolienne de maintenir sa vitesse à une valeur optimale et d'éviter toute dégradation mécanique [Nic94] [Ela04].

En plus de cette vitesse nominale  $V_n$ , deux autres vitesses importantes sont spécifiées :

- La vitesse de démarrage  $V_d$  : C'est la vitesse minimale à laquelle la turbine commence à fonctionner.
- La vitesse maximale du vent  $V_{max}$  : Au-delà de cette vitesse, la turbine cesse de convertir l'énergie éolienne pour des raisons de sécurité.
- Dans le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent, ces vitesses, ainsi que la vitesse nominale, établissent quatre zones de fonctionnement, comme le

montre la figure (I.7). Chaque zone représente un comportement particulier de l'aérogénérateur en fonction des conditions de vent. [Ami13] :

- Zone I :  $P = 0$ . Dans cette zone, La turbine n'est pas du tout en marche.
- Zone II :  $V_d < V_{vent} < V_n$  . C'est la zone où La puissance exercée sur l'arbre varie en fonction de la vitesse du vent. La production reste normale jusqu'à ce que la puissance nominale soit atteinte.
- Zone III :  $V_n < V_{vent} < V_{max}$  . Dans cette zone, La vitesse de rotation reste invariable. La production est restreinte à sa valeur nominale grâce à la régulation de puissance.
- Zone IV :  $V_{vent} < V_{max}$  . À des vitesses de vent d'environ 90 km/h, le système de sécurité arrête le transfert d'énergie, entraînant l'arrêt de l'éolienne.

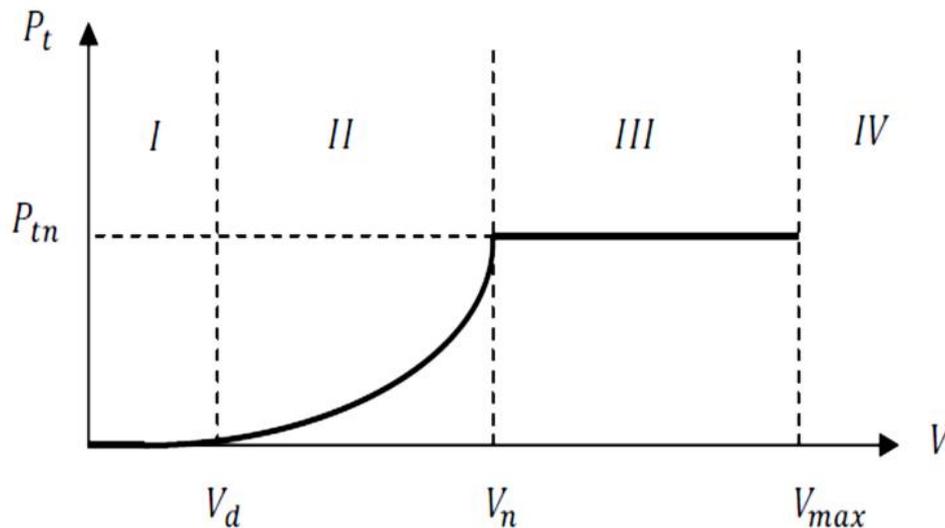


Fig. I. 7. La puissance effective transmise par l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Deux techniques de contrôle sont couramment utilisées dans les grandes éoliennes pour contrôler la puissance aérodynamique captée et la limiter lorsque le vent atteint des vitesses élevées : le contrôle de pas (ou "Pitch Control") et le contrôle de décrochage (ou "Stall Control"). Voici une description de ces approches :

### I.7.1 Le "Pitch Control"

Le contrôle de pas implique la variation de l'angle de calage des pales autour de leur axe longitudinal en réponse à la vitesse du vent et à la puissance active à extraire.

En utilisant le Pitch Control, le coefficient de puissance  $C_p$  n'est plus ajusté en fonction de  $\lambda$  comme auparavant, mais plutôt en fonction de la vitesse du vent à une vitesse de rotation

constante. Cela permet de maintenir la puissance constante dans la Zone III à sa valeur maximale [Ami13].

Il convient de noter que pour ajuster l'angle de calage dans le système de Pitch Control, un régulateur électronique est nécessaire, équipé soit de masselottes centrifuges, soit de servomoteurs, permettant ainsi [Adb07] :

- Le démarrage à une vitesse du vent  $V_d$  réduite.
- La régulation de la vitesse angulaire de la turbine  $\Omega_t$  pour une vitesse du vent supérieure à la vitesse nominale.
- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie lorsque la vitesse du vent évolue entre  $V_d$  et  $V_n$ .
- La protection de l'éolienne contre les fortes vitesses du vent ( $>V_{max}$ ) en mettant les pales en drapeau, sans nécessité d'un système de freinage puissant pour les arrêts d'urgence.

### **I.7.2 Le "Stall Control"**

Le décrochage aérodynamique est un régulateur dont le comportement géométrique des pales peut varier en fonction du rapport entre les vitesses du vent et de la turbine. Cela offre la possibilité de se détacher à partir d'une certaine vitesse de vent. Ce décrochage est essentiellement influencé par l'angle de calage des pales, qui peuvent être fabriquées avec un pas variable le long de la pale et équipées d'un freinage à l'extrémité. Cette approche de "Stall Control" offre également de nombreux bénéfices :

- Il n'y a pas de dispositif de contrôle d'angle de pas.
- La conception et la réalisation du rotor sont plus simples et moins coûteuses.
- Maintenance plus facile et meilleure fiabilité.

Pour améliorer l'efficacité de la capture d'énergie par le Stall Control, il est possible de le combiner avec une machine à deux vitesses de rotation, élargissant ainsi la plage de production pour la rendre comparable à celle obtenue avec le Pitch Control.

Certains aérogénérateurs intègrent un système hybride appelé Stall Actif, qui fusionne les avantages des deux systèmes. Dans ce système, le décrochage aérodynamique est progressivement induit par une légère orientation des pales, nécessitant des dispositifs de réglage plus économiques et robustes que dans le cas du Pitch Control.

### I.7.3 Vitesse du vent de manière continuellement variable

L'exploitation à vitesse variable constitue un élément crucial dans la conception des éoliennes. Voici une synthèse des points essentiels :

- Vitesse Constante [Zhi13] :

Les éoliennes opérant à vitesse fixe présentent les attributs suivants :

- Un système électrique plus facile.
- Une fiabilité accrue.
- Un risque moindre d'exciter les fréquences de résonance des composants de l'éolienne.
- Aucun besoin de système électronique de commande.
- Des coûts réduits.
- Vitesse Variable [Bel10] :

Les avantages du fonctionnement à vitesse variable sont les suivants :

- Accroissement de l'efficacité énergétique.
- Diminution des oscillations du couple dans le système de transmission.
- Réduction des contraintes sur le système de transmission.
- Production d'une puissance de meilleure qualité.

L'importance du fonctionnement à vitesse variable est indéniable, surtout lorsque la génératrice électrique est directement connectée au réseau. Dans ce scénario, la vitesse du vent reste généralement constante, ce qui signifie que le rendement aérodynamique ne peut être optimal que pour une seule vitesse du vent ( $\lambda_{opt}$ ). Bien que la possibilité d'un système à deux vitesses de rotation existe, une vitesse électroniquement variable offre bien plus en termes d'efficacité énergétique. La figure (I.8) illustre que la position du pic de la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation varie avec la vitesse du vent. En général, un ajustement direct ou indirect de la vitesse est nécessaire pour optimiser efficacement les transferts d'énergie.

Où :  $\lambda_{opt}$  : est la vitesse spécifique optimale de l'éolienne.

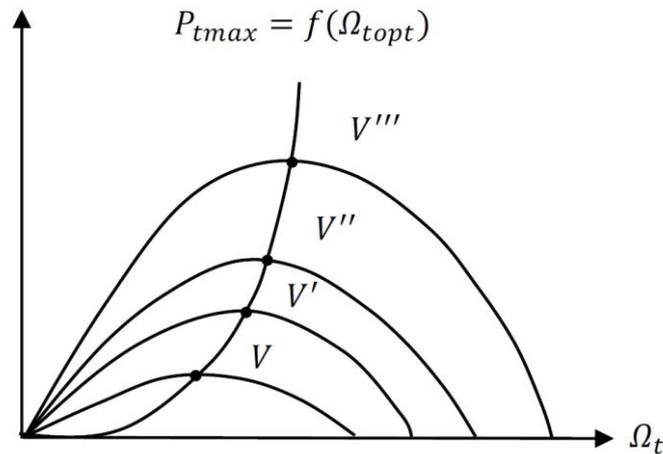


Fig. I. 8. Courbe de puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour diverses vitesses du vent.

#### I.7.4 Types de machines électriques employées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance requis pour l'alimentation du réseau ou de la charge.
- Le choix entre une installation sur terre (onshore) ou en mer (offshore).
- Et surtout, la méthode de conversion de l'énergie électrique pour l'incorporer au réseau ou pour un usage autonome.

##### I.7.4.1 Systèmes autonomes non connectés au réseau électrique alternatif

Pour les réseaux de petite puissance dans des sites isolés, une solution couramment utilisée consiste à combiner des éoliennes avec un ou plusieurs groupes électrogènes, généralement diesel. Dans la configuration la plus répandue, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto-excitée par des condensateurs, comme illustré dans cette figure [Cam03] [Lop08].

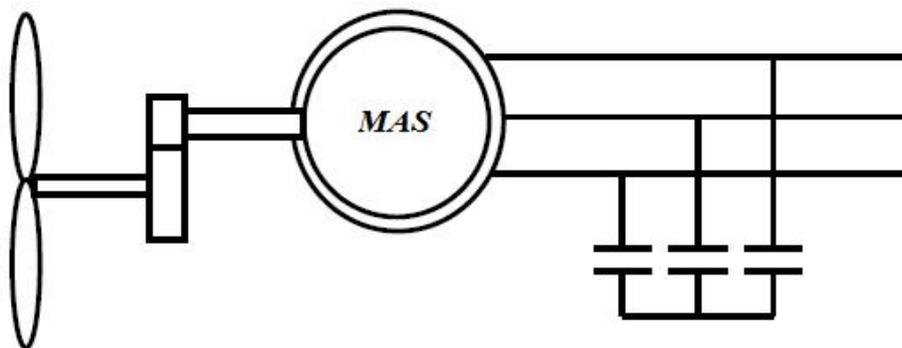


Fig. I. 9. Système éolien utilisant une machine asynchrone à cage connectée au réseau.

##### I.7.4.2 Systèmes connectés au réseau électrique alternatif

Les deux principales variantes de machines électriques utilisées dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones.

### A. Machines synchrones

Ce type de machine (MS) est largement utilisé dans les processus traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance tels que les centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires. Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, allant de 500 kW à 2 MW, sont nettement plus coûteux que les générateurs asynchrones de taille similaire. De plus, lorsqu'une telle machine est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et dépend de la fréquence du réseau. En raison de cette connexion rigide entre le générateur et le réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se répercutent sur la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas couramment utilisées dans les éoliennes connectées directement au réseau. En revanche, elles sont employées lorsqu'elles sont reliées au réseau via des convertisseurs de puissance.

La technologie des matériaux magnétiques a permis de rendre la construction de machines synchrones à aimants permanents plus avantageuse en termes de coûts. Ces machines, équipées d'un nombre considérable de pôles, peuvent produire des couples mécaniques importants. La figure ci-dessous représente un système utilisant la machine synchrone.

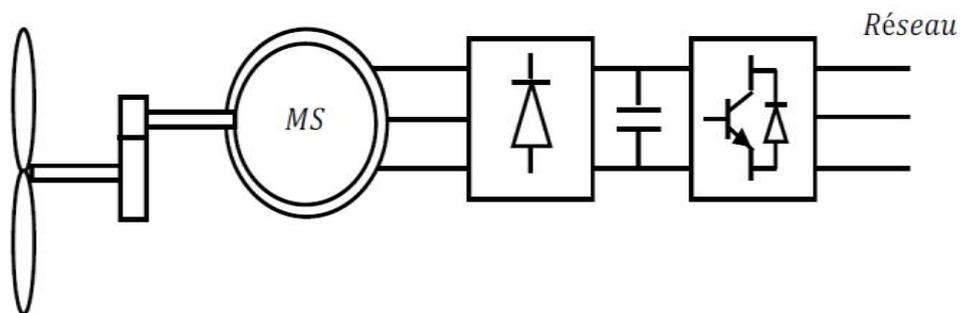


Fig. I. 10. Système éolien utilisant une machine synchrone.

### B. Machines asynchrones à cage (MAS)

Les machines asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles bénéficient de l'avantage d'être standardisées, produites en grande quantité et dans une large gamme de puissances. Elles nécessitent également moins d'entretien et présentent un faible taux de défaillance. Dans les éoliennes de grande taille avec des pales de grand rayon, la vitesse de rotation est généralement faible. Cependant, concevoir une génératrice asynchrone à basse vitesse avec un rendement satisfaisant n'est pas réalisable. Par conséquent, il est nécessaire d'installer un multiplicateur mécanique de vitesse entre la turbine et la machine asynchrone. Lorsqu'elles sont connectées directement au réseau, les machines asynchrones offrent une transition plus douce grâce à la variation du glissement entre le flux du stator et la

vitesse de rotation du rotor. C'est pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines asynchrones.

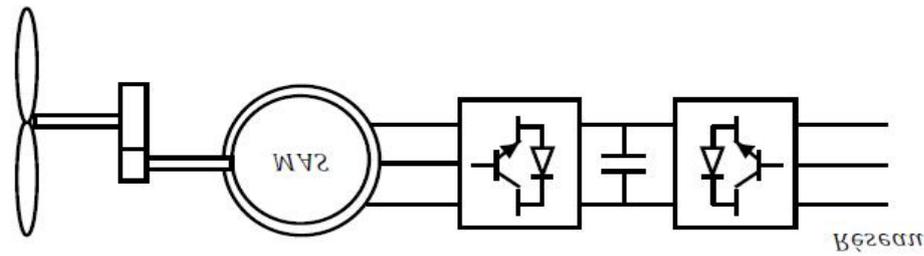


Fig. I. 11. Système éolien utilisant une machine asynchrone à cage.

### C. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné présente un avantage significatif. Son principe est dérivé de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté au réseau avec une tension et une fréquence fixe, tandis que le rotor (ou le stator) est relié au réseau via un convertisseur de fréquence, comme illustré dans la figure (I.12). Si la variation de vitesse nécessaire reste restreinte autour de la vitesse de synchronisme, il est possible de diminuer la taille du convertisseur de fréquence (électronique de puissance). Malgré leur complexité légèrement supérieure à celle des machines asynchrones à cage, avec lesquelles elles partagent la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, leur résistance est légèrement diminuée par la présence de systèmes à bagues et balais. Cependant, les avantages de fonctionnement à vitesse variable justifient largement leur utilisation par de nombreux fabricants.

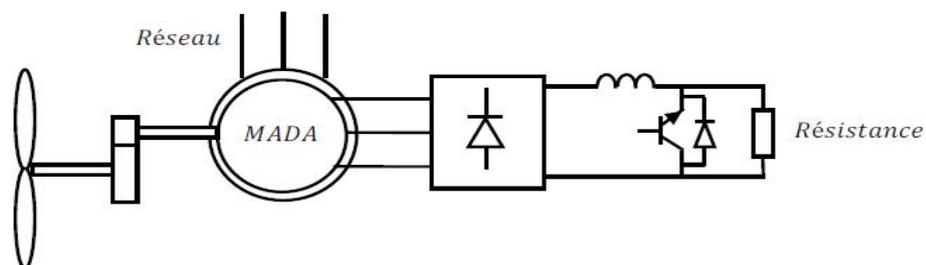


Fig. I. 12. Système éolien utilisant une machine asynchrone à double alimentation.

### D. Machine asynchrone à double stator (double étoile)

Cette configuration d'éolienne permet d'avoir un fonctionnement à deux vitesses. En effet, en utilisant un double bobinage au stator (voir figure I.13), on peut obtenir un nombre variable de paires de pôles, ce qui donne des plages de vitesses différentes. On peut ainsi imposer deux vitesses de synchronisme en modifiant le nombre de pôles. D'un côté, un stator de faible

puissance avec un grand nombre de paires de pôles est utilisé pour les basses vitesses de vent. La puissance est déterminée par l'équation suivante [Mer13] :

$$P_{mg} = C_{em} \Omega_s \quad (I.12)$$

Avec :

- $P_{mg}$  : Puissance transmise par la génératrice ;
- $\Omega_s$  : Vitesse liée au nombre de paires de pôles par la relation :

$$\Omega_s = \omega / P \quad (I.13)$$

Une vitesse faible correspond à un grand nombre de paires de pôles. Par ailleurs, on utilise un stator puissant pour les vitesses de vent élevées, ce qui signifie qu'il y a moins de paires de pôles.

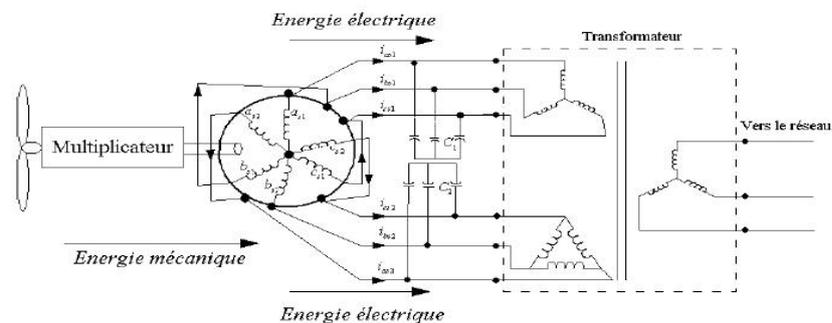


Fig. I. 13. Système éolien utilisant une machine asynchrone à double étoile.

## I.8 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Voici de manière succincte les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne [Bek14] et [Mek14] :

Avantages de l'énergie éolienne :

- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable infiniment durable qui ne nécessite aucun carburant, étant produite par les vents et les brises souvent présents près de la mer ou en montagne.
- Le vent est une source d'énergie inépuisable, contrairement aux combustibles fossiles ou fissiles, en faisant une source d'énergie abondante et gratuite à 100%.
- L'exploitation de l'énergie éolienne peut être facilement arrêtée, contrairement à d'autres processus thermiques ou nucléaires continus.
- Les éoliennes peuvent être intégrées directement dans des espaces urbains, réduisant ainsi les coûts et les pertes liées au transport de l'énergie entre le producteur et le consommateur.

- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et peuvent être démontés facilement sans laisser de traces.
- Cette source d'énergie est particulièrement intéressante pour les pays en développement en répondant à leur besoin urgent d'énergie pour le développement, avec une installation relativement simple.
- L'énergie éolienne peut être facilement intégrée dans les systèmes électriques existants.

Inconvénients de l'énergie éolienne :

- L'impact sur l'écosystème, malgré les progrès réalisés dans la réduction du bruit mécanique ou aérodynamique produit par le sifflement des pales et des engrenages.
  - Le rôle des éoliennes dans les voies migratoires des oiseaux et l'effet visuel.
  - Les éoliennes peuvent perturber la propagation des ondes et causer des interférences avec les transmissions hertziennes, provoquant des images brouillées sur les récepteurs.
  - Les éoliennes présentent des risques d'accidents.

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré divers aspects de l'énergie éolienne. Nous avons d'abord présenté une introduction générale à cette forme d'énergie, son historique et son évolution au fil du temps. Ensuite, nous avons examiné les différents types d'éoliennes disponibles sur le marché. Nous avons également étudié la loi aérodynamique de Betz, qui régit la puissance maximale qu'une éolienne peut extraire du vent en fonction de sa vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent.

De plus, nous avons exploré deux techniques courantes de régulation de puissance : le "Pitch Control" et le "Stall Control". Ces méthodes permettent d'optimiser la production d'énergie en ajustant la puissance de l'éolienne en fonction des conditions éoliennes.

En ce qui concerne les machines électriques utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne, nous avons examiné leurs caractéristiques spécifiques, notamment celles liées aux différentes structures d'alimentation.

Enfin, nous avons souligné les avantages de l'expansion de l'énergie éolienne, ainsi que les obstacles potentiels à son développement.

Le prochain chapitre se concentrera sur la modélisation du système éolien, en mettant l'accent sur la turbine, son convertisseur mécanique et la commande vectorielle de l'aérogénérateur. Nous explorerons également les différents convertisseurs électroniques qui

assurent la gestion de la génération d'énergie éolienne, en cherchant à maximiser l'utilisation de l'énergie disponible dans le vent.

**CHAPITRE II : DESCRIPTION ET  
MODEILISATION DE LA MACHINE  
ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE.**

## II.1 INTRODUCTION

Le texte aborde le chapitre centré sur la modélisation et le contrôle du système d'énergie éolienne après avoir examiné l'état de l'art et expliqué le principe de conversion de l'énergie éolienne. Ce chapitre commence par modéliser les composants de base de ce système, notamment la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE). Ce modèle est construit à partir des équations électriques, mécaniques, ainsi que des turbines et des multiplicateurs de vitesse. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée au contrôle vectoriel du GASDE, avec une explication des stratégies de contrôle des turbines et de la boucle de contrôle de la vitesse basée sur des régulateurs PI traditionnels et flous. Des résultats de simulation seront également présentés pour illustrer l'amélioration du comportement du système et sa précision.

## II.2 MODELISATION DU SYSTEME EOLIEN A ETUDIER

Le système éolien à étudier se compose d'une génératrice asynchrone à double étoile, d'une turbine à vitesse variable, de convertisseurs statiques et d'un filtre connecté au réseau électrique.

### II.2.1 Description de la génératrice asynchrone double étoile

Dans le stator de la génératrice asynchrone à double étoile (GASDE), il y a deux ensembles de bobinages triphasés. Il existe différentes formes de bobinages triphasés, telles qu'un angle électrique ( $\alpha = 30^\circ$  dans ce modèle), des bobines de rotor ou des bobines à cage d'écureuil. L'analyse est simplifiée en supposant que le circuit électrique du rotor est semblable aux bobinages triphasés en court-circuit. [HAD].

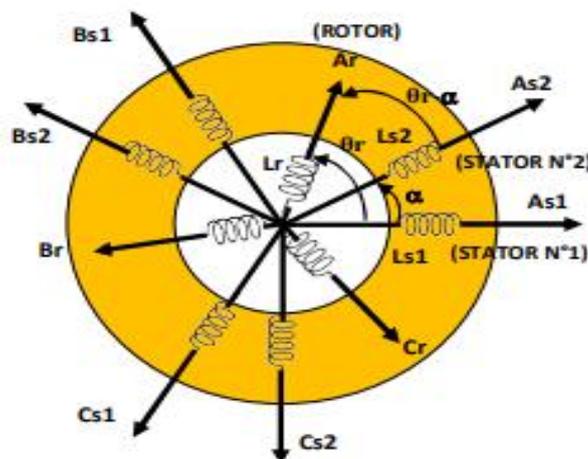


Fig. II. 1. Représentation des enroulements de la GASDE[KIY20].

On notera par l'indice S1 les grandeurs relatives à la première étoile (stator 1) et par l'indice S2 celles relatives à la deuxième étoile (stator 2).

Les phases de la première étoile  $A_{s1}, B_{s1}, C_{s1}$ , et les phases de la deuxième étoile prennent  $A_{s2}, B_{s2}, C_{s2}$ , les phases rotoriques sont notées par  $A_r, B_r, C_r$ . L'angle de décalage entre les deux étoiles est  $\alpha$ .

\*  $\theta_r$  Exprime la position du rotor (phase  $A_r$ ) par rapport à l'étoile 1 (phase  $A_{s1}$ ).

Cet angle est déterminé par l'équation suivante [YAH11] :

$$\theta_r = \Omega_m t + \theta_0 \quad (\text{II.1})$$

$$\theta_2 = \theta_r - \alpha \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- $\Omega_m$  : La vitesse mécanique du rotor.
- $\theta_0$  : La position initiale du rotor par rapport au l'étoile 1.

### II.2.2 Hypothèses simplificatrices

La génératrice asynchrone à double étoile (GASDE) se distingue par une répartition complexe de ses bobinages et une structure géométrique complexe, rendant son analyse précise difficile. Pour rendre l'analyse plus gérable, nous recourons à certaines hypothèses simplificatrices dans le but de créer un modèle simplifié. [Tah08] [Fou16] [Bra20].

- Symétrie géométrique : La machine possède une structure géométrique symétrique.
- Linéarité du circuit magnétique : Aucune saturation du circuit magnétique n'a lieu, permettant de représenter les flux comme des fonctions linéaires des courants.
- Négligence des pertes : Les pertes dues au retard magnétique et aux courants de Foucault sont négligées.
- Distribution magnétique en poche : Les forces magnétomotrices créées par chaque bobinage sont distribuées en poche.
- Négligence des effets de la température : L'effet variable de la température sur la résistance de la partie fixe et mobile n'est pas pris en compte.
- Négligence de l'amortissement : L'effet de l'amortissement dans la partie mobile est négligé.
- Symétrie des phases : Toutes les six phases dans la partie fixe ont les mêmes caractéristiques électriques.

- Négligence de l'effet des encoches : L'effet des encoches sur les performances de la machine n'est pas pris en compte.

### II.2.3 Modèle général de la MASDE

Étant donné les hypothèses simplifiées et la notation des vecteurs de tension, de courant et de flux, il est possible de le rédiger de la manière suivante :

#### II.2.3.1 Les équations des tensions

En combinant la loi d'Ohm et la loi de Lenz, on obtient la relation suivante :

$$[V_{as1}] = [R_{as1}][I_{as1}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{as1}] \quad (\text{II.3})$$

$$[V_{as2}] = [R_{as2}][I_{as2}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{as2}] \quad (\text{II.4})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II.5})$$

Tels que :

Les matrices de résistance statorique (étoile 1 et étoile 2) et les matrices de résistance rotorique. Les vecteurs de tension, de courant et de flux statorique sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} [V_{s1}] &= [v_{as1}, v_{bs1}, v_{cs1}]^T \\ [I_{s1}] &= [i_{as1}, i_{bs1}, i_{cs1}]^T \\ [\Phi_{s1}] &= [\phi_{as1}, \phi_{bs1}, \phi_{cs1}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{aligned} [V_{s2}] &= [v_{as2}, v_{bs2}, v_{cs2}]^T \\ [I_{s2}] &= [i_{as2}, i_{bs2}, i_{cs2}]^T \\ [\Phi_{s2}] &= [\phi_{as2}, \phi_{bs2}, \phi_{cs2}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

Les vecteurs de tensions, courant et flux rotorique sont donnés par :

$$\begin{aligned} [V_r] &= [v_{ar}, v_{br}, v_{cr}]^T \\ [I_r] &= [i_{ar}, i_{br}, i_{cr}]^T \\ [\Phi_r] &= [\phi_{ar}, \phi_{br}, \phi_{cr}]^T \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

#### II.2.3.2 Les équations des flux

Selon les courants, les inductances propres et les inductances mutuelles, les flux magnétiques du stator et du rotor dans MASDE sont exprimés par les équations suivantes.

$$[\Phi_{s1}] = [L_{s1,s1}] [I_{s1}] + [M_{s1,s2}] [I_{s2}] + [M_{s1,r}] [I_r] \quad (\text{II.9})$$

$$[\Phi_{s2}] = [M_{s2,s1}] [I_{s1}] + [L_{s2,s2}] [I_{s2}] + [M_{s2,r}] [I_r] \quad (\text{II.10})$$

$$[\Phi_r] = [M_{r,s1}] [I_{s1}] + [M_{r,s2}] [I_{s2}] + [L_{r,r}] [I_r] \quad (\text{II.11})$$

On peut représenter les sous-matrices des inductances dans les équations (II.9) (II.10) et (II.11) de la manière suivante [YAH11] :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \alpha + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \alpha + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \alpha & \cos \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \alpha + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos (\theta_r - \alpha) & \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos (\theta_r - \alpha) & \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( (\theta_r - \alpha) + \frac{4\pi}{3} \right) & \cos (\theta_r - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Où :

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^T ; [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^T ; [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^T .$$

Avec :

- $L_{s1}$  : l'inductance propre du 1er étoile.
- $L_{s2}$  : l'inductance propre du 2eme étoile.
- $L_r$  : l'inductance propre d'une phase du rotor.
- $L_{ms}$  : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.
- $L_{mr}$  : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.

➤  $M_{sr}$  : la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

### II.2.3.3 Equation mécanique

Le couple électromagnétique dans MASDE peut être calculé en dérivant partiellement l'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle de rotation géométrique de la partie mobile. [SAM11].

$$C_{em} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{geo}} = \mathbf{P} \frac{\partial w}{\partial \theta_{ele}} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$w = \frac{1}{2} ([i_{s1}]^t [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^t [\varphi_{s2}] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad (\text{II.20})$$

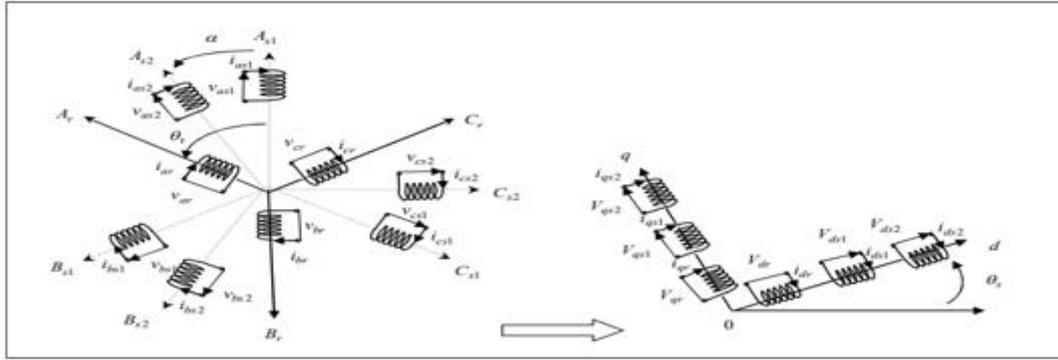
Le couple électromagnétique est exprimé comme suit :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left( [i_{s1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [i_r]^t + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [i_r]^t \right) \quad (\text{II.21})$$

Comme il est clair, en écrivant les équations  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$  et  $V_r$  en fonction du courant, on obtient un système d'équations dont les coefficients ne peuvent pas être constants au fil du temps. Ainsi, il est essentiel de résoudre ces systèmes complexes afin de résoudre ce problème. Il est donc nécessaire de faire appel à la modification de Park, une option qui permet d'obtenir un modèle plus simple et plus facile à utiliser.

## II.3 LA TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park est généralement appelée la transformation à deux axes ou la transformation des axes et c'est un outil mathématique utilisé pour simplifier les modèles de MASDE. Du point de vue physique, l'application de cette transformation sur MASDE équivaut à convertir trois enroulements en deux enroulements équivalents, que ce soit en termes de tension magnétique finale, de flux, de couple ou d'autres aspects. En particulier, l'image sera parfaitement mise à l'échelle. De plus, la transformation de Park produit un modèle mathématique avec des coefficients constants. [BEN19].



a) Modèle la Machine double étoile.

b) Modèle biphasé équivalent.

Fig. II. 2. Représentation de la MASDE et sa machine biphasée.

### II.3.1 Application de la transformation de Park

La transformation de Park est utilisée pour transformer un système d'axes triphasé (A, B, C) en un système d'axes biphasé équivalent (D, Q), résultant en des forces magnétiques identiques. La deuxième modification de Park est connue sous le nom de modification de Park. Dans les systèmes triphasés, ces modifications permettent d'économiser de l'énergie par rapport aux systèmes biphasés, et inversement.

Les grandeurs triphasées de la machine sont projetées sur les deux axes orthogonaux d et q pour obtenir la formule générale de la transformation de Park [LAK14] [LAG19].

On peut représenter les deux transformations par les deux équations suivantes :

$$[G_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [G_{abc}] \tag{II.22}$$

$$[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [G_{dq0}] \tag{II.23}$$

Avec :

- $G_{dq0}$  : grandeurs biphasées dans le repère (d, q).
- $G_{abc}$  : grandeurs triphasées équilibrées.

La matrice général de Park :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{II.24}$$

Matrice inverse général de Park :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{II.25}$$

Ces différentes matrices de transition de parc direct et inversé permettent de passer d'un système triphasé à un système biphasé et inversement [KIY20] :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } P(\theta_{s1}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } P(\theta_{s2}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Pour le rotor :

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

La figure ci-dessous montre comment un système triphasé se transforme en un système biphasé :

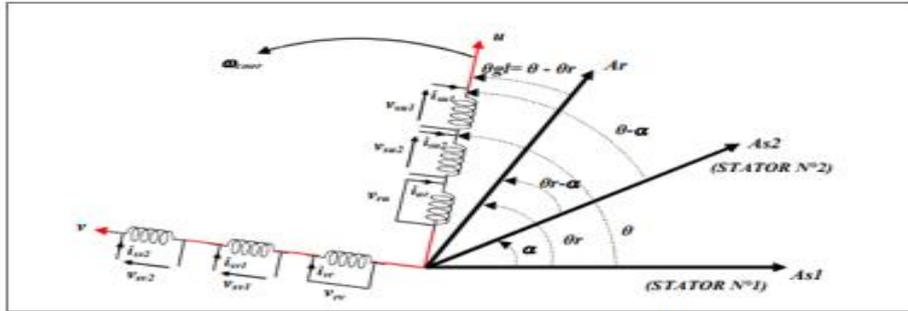


Fig. II. 3.Représentation des enroulements de la MASDE selon le repère de Park. [KIY20]

### II.3.2 Équations des tensions

Après avoir effectué les transformations précédentes, on peut écrire les équations qui définissent les tensions pour les deux étoiles et le rotor à court-circuit dans la MASDE comme suit :

$$\begin{aligned} v_{ds1} &= R_{s1} i_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_{s1} \Phi_{qs1} \\ v_{ds2} &= R_{s2} i_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_{s2} \Phi_{qs2} \\ v_{qs1} &= R_{s1} i_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} - \omega_{s1} \Phi_{ds1} \end{aligned} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{aligned}
v_{qs2} &= R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\Phi_{qs2} - \omega_s\Phi_{ds2} \\
0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\Phi_{dr} - \omega_{gl}\Phi_{qr} \\
0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\Phi_{qr} - \omega_{gl}\Phi_{dr}
\end{aligned}$$

En raison de la vitesse du rotor, les axes (d, q) fixés sur le rotor se déplacent à une vitesse relative par rapport au cadre de référence tournant synchronement, ce qui donne :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r \quad (\text{II.30})$$

Ces équations sont plus simples que les équations originales. Ces équations sont exprimées en termes de courant total et de débit total [LAK14].

### II.3.3 Équations des flux

La transformation de Park est appliquée aux équations simultanées des équations (II.9), (II.10) et (II.11), ce qui donne :

$$\begin{aligned}
\Phi_{ds1} &= L_{s1}i_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds2} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{dr} \\
\Phi_{qs1} &= L_{s1}i_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs2} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{qr} \\
\Phi_{ds2} &= L_{s2}i_{ds2} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds2} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{dr} \\
\Phi_{qs2} &= L_{s2}i_{qs2} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs1} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs2} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{qr} \\
\Phi_{dr} &= L_r i_{dr} + \frac{3}{2}L_{mr}i_{dr} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{ds1} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{ds2} \\
\Phi_{qr} &= L_r i_{qr} + \frac{3}{2}L_{mr}i_{qr} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{qs1} + \frac{3}{2}M_{sr}i_{qs2}
\end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

On a :

$$\frac{3}{2}L_{ms} = \frac{3}{2}L_{mr} = \frac{3}{2}M_{sr} = L_m$$

Avec :

➤  $L_m$  : l'inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1, l'étoile 2 et le rotor.

Ainsi, le système d'équations (II.32) peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned}
\Phi_{ds1} &= L_{s1}I_{ds1} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\
\Phi_{qs1} &= L_{s1}I_{qs1} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\
\Phi_{ds2} &= L_{s2}I_{ds2} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\
\Phi_{qs2} &= L_{s2}I_{qs2} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr}) \\
\Phi_{dr} &= L_r I_{dr} + L_m(i_{ds1} + i_{ds2} + i_{dr}) \\
\Phi_{qr} &= L_r I_{qr} + L_m(i_{qs1} + i_{qs2} + i_{qr})
\end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

- $L_{s1} + L_m$  : Cycle d'auto-inductance de l'étoile 1.
- $L_{s2} + L_m$  : La cyclicité de l'auto-inductance de l'étoile 2.
- $L_r + L_m$  : L'inductance cyclique propre du rotor.

### II.3.4 Equation mécanique

Si le cadre de référence est modifié, l'équation du couple électromagnétique doit être trouvée dans le nouveau cadre de référence.

On peut représenter la puissance instantanée absorbée par le moteur asynchrone à double étoile de la manière suivante : [Lak14]

$$P_{abs} = [V_{s1}]^T [i_{s1}] + [V_{s2}]^T [i_{s2}] \quad (II.33)$$

$$P_{abs} = V_{as1}i_{as1} + V_{bs1}i_{bs1} + V_{cs1}i_{cs1} + V_{as2}i_{as2} + V_{bs2}i_{bs2} + V_{cs2}i_{cs2} \quad (II.34)$$

Comme nous l'avons vu précédemment, la conversion de Park permet d'économiser de l'énergie et peut s'écrire ainsi :

$$P_{abs} = V_{ds1}i_{ds1} + V_{qs1}i_{qs1} + V_{ds2}i_{ds2} + V_{qs2}i_{qs2} \quad (II.35)$$

Dans l'équation (II.36), en substituant les tensions par leurs expressions, nous obtenons l'expression suivante pour la puissance absorbée instantanée :

$$\begin{aligned} P_{abs} = & [R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 + R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s2}i_{qs2}^2] \\ & + [\omega_s(\Phi_{ds1}i_{qs1} - \Phi_{qs1}i_{ds1} + \Phi_{ds2}i_{qs2} - \Phi_{qs2}i_{ds2})] \\ & + \left[ \frac{d\Phi_{ds1}}{dt}i_{qs1} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt}i_{ds1} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt}i_{qs2} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt}i_{ds2} \right] \end{aligned} \quad (II.36)$$

Ce mot est composé de trois parties distinctes : la première partie correspond aux pertes causées par l'effet Joule, la deuxième partie correspond à la fluctuation de l'énergie électromagnétique, et la troisième partie correspond à la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

### II.3.5 Couple électromagnétique :

Le couple et la puissance électromagnétiques peuvent être écrits sous la forme universelle suivante [LAK14] :

$$P_{em} = \Omega_{mec} C_{em} \quad (II.37)$$

$$P_{em} = \omega_s (\Phi_{ds1}i_{qs1} - \Phi_{qs1}i_{ds1} + \Phi_{ds2}i_{qs2} - \Phi_{qs2}i_{ds2}) \quad (II.38)$$

Avec :

- $\Omega_{mec}$  : La vitesse mécanique de rotation du rotor.
- $C_{em}$  : Le développement du couple électromagnétique.

Selon les équations première et deuxième, il est clair que le couple électromagnétique est écrit comme suit :

$$C_{em} = p(\Phi_{ds1}i_{qs1} - \Phi_{qs1}i_{ds1} + \Phi_{ds2}i_{qs2} - \Phi_{qs2}i_{ds2}) \quad (II.39)$$

Avec :

- **P** : est la quantité de paires de pôles présentes dans la machine.

### II.3.6 Choix de référence

La théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile peut être étudiée à l'aide de trois systèmes d'axes de coordonnées sur le plan (d, q). Le référentiel lié au stator, le référentiel lié au rotor et le référentiel lié au champ tournant font partie de ces systèmes.

#### II.3.6.1 Référentiel lié au stator

Dans cette documentation, les axes (d, q) sont invariables par rapport au stator ( $\omega_{\text{coor}} = 0$ ) lorsque la phase As1 est en phase avec d. Cette base de données est la plus adaptée pour l'utilisation des grandeurs instantanées, car elle ne requiert pas de conversion vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les manières de démarrer et d'arrêter les machines à courant fort.

#### II.3.6.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) restent fixes par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_r$  ce qui signifie que ( $\omega_{\text{coor}} = \omega_r$ ). Grâce à l'emploi de ce cadre, il est possible d'analyser les systèmes transitoires dans les moteurs alternatifs synchrones et asynchrones qui ont des circuits du rotor non symétriques.

#### II.3.6.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans cette norme, les axes (d, q) demeurent constants par rapport au champ électromagnétique généré par les deux étoiles du stator ( $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$ ). En général, on utilise ce cadre pour effectuer des commandes de vitesse, de couple, etc., car les valeurs dans ce référentiel sont constantes.

### II.3.7.1 Modèle de la machine

Dans notre étude, les références associatives sont utilisées pour modéliser et contrôler la MASDE. Dans ce cas, le modèle MASDE est [AMI 12] :

$$\begin{aligned}
v_{ds1} &= R_s i_{ds1} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} - \omega_s \Phi_{qs1} \\
v_{ds2} &= R_s i_{ds2} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} - \omega_s \Phi_{qs2} \\
v_{qs1} &= R_s i_{qs1} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} - \omega_s \Phi_{ds1} \\
v_{qs2} &= R_s i_{qs2} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} - \omega_s \Phi_{ds2} \\
0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\
0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr}
\end{aligned} \tag{II.40}$$

### II.3.7.2 Mise sous forme d'équation d'état

Comme la représentation de l'équation d'état de MASDE consiste à représenter le modèle de la machine dans un cadre de référence (d, q), l'équation (II.29) peut être réécrite comme suit [RAH20] :

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \tag{II.41}$$

Donc :

$$\frac{d}{dt} [\Phi] = \mathbf{A} \cdot [\Phi] + \mathbf{B} \cdot [\mathbf{V}] \tag{II.42}$$

Tous les flux magnétiques sont regroupés dans le vecteur d'état, tandis que les tensions statoriques du même ordre que le vecteur de commande sont regroupées dans le vecteur d'entrée. Il est donc nécessaire de générer deux matrices A et B en utilisant l'équation (II.29).

Dans ce qui suit, les vecteurs d'état et d'entrée sont choisis : [RAH20]

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{pmatrix} \tag{II.43}$$

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_{ds2} \\ V_{qs1} \\ V_{qs} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \tag{II.44}$$

D'après l'équation (II.31), les différents courants peuvent être exprimés comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ds1} = \frac{\Phi_{ds1} + \Phi_{md}}{L_{s1}} \\ I_{ds2} = \frac{\Phi_{ds2} + \Phi_{md}}{L_{s2}} \\ I_{qs1} = \frac{\Phi_{qs1} + \Phi_{mq}}{L_{s1}} \\ I_{qs2} = \frac{\Phi_{qs2} + \Phi_{mq}}{L_{s2}} \\ I_{dr} = \frac{\Phi_{dr} + \Phi_{md}}{L_r} \\ I_{qr} = \frac{\Phi_{qr} + \Phi_{mq}}{L_r} \end{array} \right. \quad (\text{II.45})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{md} = L_\alpha \left( \frac{\Phi_{ds1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{ds2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{dr}}{L_r} \right) \\ \Phi_{mq} = L_\alpha \left( \frac{\Phi_{qs1}}{L_{s1}} + \frac{\Phi_{qs2}}{L_{s2}} + \frac{\Phi_{qr}}{L_r} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II.46})$$

Ou :

$$1. \quad L_\alpha = \frac{1}{\frac{1}{L_{s1}} + \frac{1}{L_{s2}} + \frac{1}{L_r} + \frac{1}{L_m}} \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant les équations (II.46) dans l'équation (II.45), puis dans le système d'équations (II.29), nous obtenons des équations de la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \Phi_{ds1} = v_{ds1} - \left( \frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{R_{s1}L_{s2}} \Phi_{ds2} + \omega_s \Phi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{R_r L_{s1}} \Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{ds2} = v_{ds2} - \left( \frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{R_{s1}L_{s2}} \Phi_{ds1} + \omega_s \Phi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{R_r L_{s2}} \Phi_{dr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs1} = v_{qs1} - \left( \frac{R_{s1}}{L_{s1}} - \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} \right) \Phi_{qs1} + \frac{R_{s1}L_a}{R_{s1}L_{s2}} \Phi_{qs2} - \omega_s \Phi_{ds1} + \frac{R_{s1}L_a}{R_r L_{s1}} \Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qs2} = v_{qs2} - \left( \frac{R_{s2}}{L_{s2}} - \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} \right) \Phi_{qs2} + \frac{R_{s2}L_a}{R_{s1}L_{s2}} \Phi_{qs1} - \omega_s \Phi_{ds2} + \frac{R_{s2}L_a}{R_r L_{s2}} \Phi_{qr} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = - \left( \frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \Phi_{dr} + \frac{R_r L_a}{R_r L_{s1}} \Phi_{ds1} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} + \frac{R_r L_a}{R_r L_{s2}} \Phi_{ds2} \\ \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = - \left( \frac{R_r}{L_r} - \frac{R_r L_a}{L_r^2} \right) \Phi_{qr} + \frac{R_r L_a}{R_r L_{s2}} \Phi_{qs1} - (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} + \frac{R_r L_a}{R_r L_{s2}} \Phi_{qs2} \end{array} \right. \quad (\text{II.48})$$

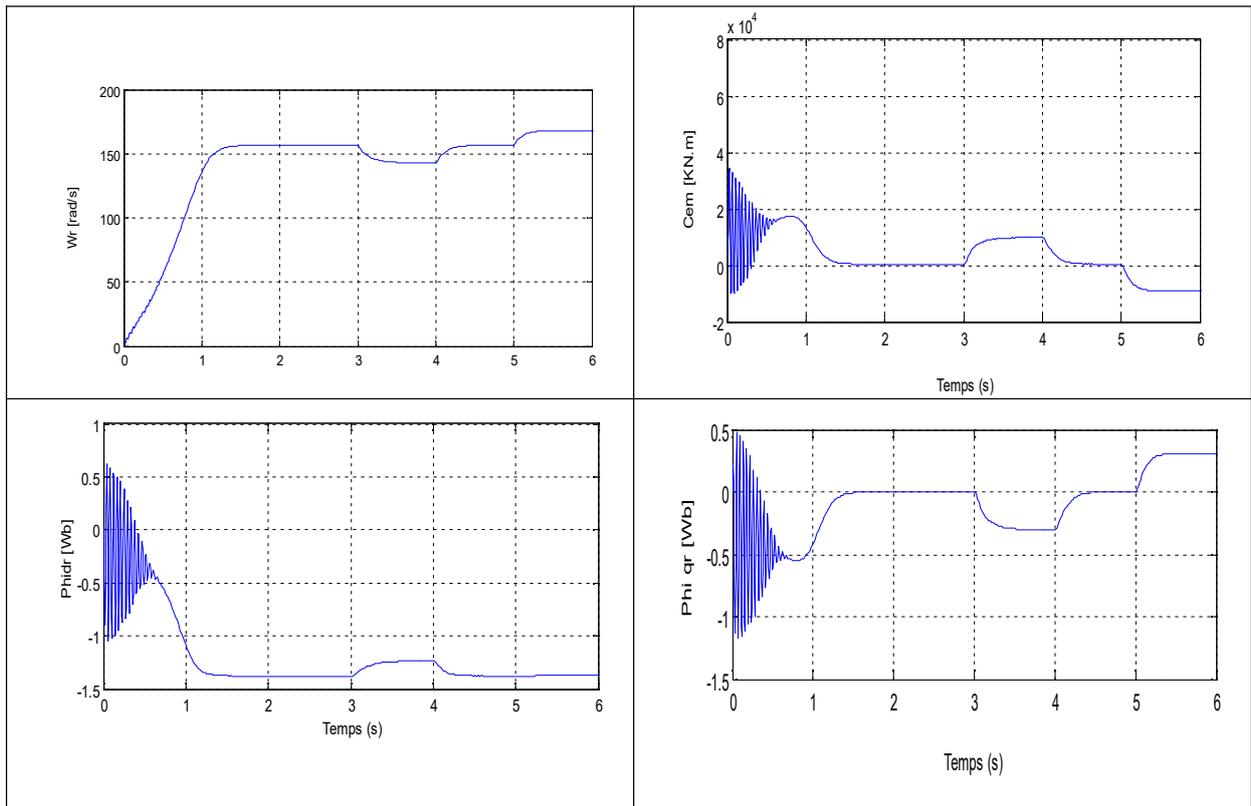
Enfin, les équations simultanées de l'équation (II.48) sont ajustées à la forme de l'équation (II.42) pour obtenir les deux matrices A et B :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \omega_s & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_r} & 0 \\ \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} & 0 & \omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} & 0 \\ -\omega_s & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_r} \\ 0 & -\omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s2}}{L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}L_r} \\ \frac{R_rL_a}{L_{s1}L_r} & \frac{R_rL_a}{L_{s2}L_r} & 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} & \omega_{gl} \\ 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_{s1}L_r} & \frac{R_rL_a}{L_{s2}L_r} & -\omega_{gl} & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

Et :

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.50)$$

### II. 3.7.3 Résultats de simulation



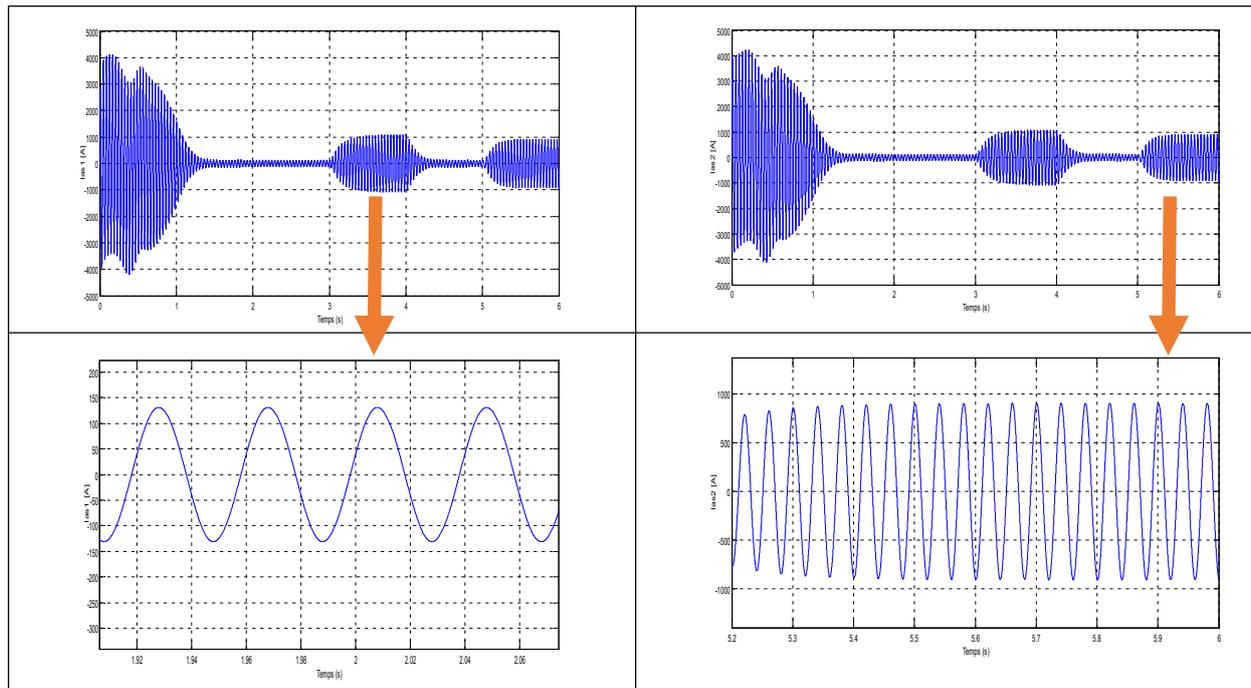


Fig. II. 4. Réponse de MASDE alimentée directement par des sources sinusoïdales.

- **Interprétation des résultats**

Le graphique ci-dessus illustre les performances d'un tuyau MASDE alimenté directement par une tension sinusoïdale (220 / 380 volts, 50 hertz). Il fonctionne sans charge pendant la période [0, 3] secondes, puis fonctionne sous charge ( $C = 9550 \text{ k} \cdot \text{m}$ ,  $= -9550 \text{ k} \cdot \text{m}$ ) pendant des intervalles de temps successifs. Ces intervalles sont [3, 4] secondes et [5, 6] secondes.

La vitesse du rotor se stabilise à 156,6 rad/s, proche de la vitesse de synchronisation (157 rad/s), car la charge est nulle (glissement minimale) après avoir traversé une région transitoire de 1,2 s (durée très courte), qui correspond au temps de réponse de la machine. Le couple électromagnétique lors du démarrage est très élevé, atteignant des valeurs de  $(35 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{m})$ , et les oscillations se stabilisent à des valeurs faibles, ce qui compense les pertes causées par le frottement et la ventilation. Lorsqu'une charge de  $C_r = (9550 \text{ KN} \cdot \text{m})$  est appliquée, la vitesse diminue à (143 rad /s) et le courant augmente à 1065A.

Pendant le démarrage, les courants statoriques de l'étoile 1 et de l'étoile 2 ont une valeur de crête égale au courant nominal de la machine (valeur =.....) en passant par une zone transitoire où la valeur de crête est 4 à 5 fois plus élevée que le courant nominal de la machine.

Au démarrage, les courants statoriques ( $I_{a1}$  et  $I_{a2}$ ) de l'étoile 1 et de l'étoile 2 sont de l'ordre de 4108 A, car le couple électromagnétique surmonte l'inertie de la machine. Ils

diminuent ensuite et deviennent sinusoïdaux en régime permanent, atteignant une valeur de ( $I_{as1} = -131$  A. Les deux étoiles ont la même courbe et la même valeur.

Il est également important de souligner que les deux flux de rotation suivants sont directement influencés par l'augmentation ou la baisse du couple.

## II.4 ALIMENTATION DE LA MASDE PAR ONDULEUR DE TENSION À COMMANDE MLI

Afin de produire la tension triphasée dont la machine est alimentée, nous employons un convertisseur. La tension d'amplitude et de fréquence du convertisseur peuvent être ajustées à partir d'un réseau standard de 220/380-50 Hz. La tension et la fréquence du convertisseur peuvent être ajustées à partir d'un réseau standard de 220/380-50 Hz. Deux rouleaux de stator. La présence de deux enroulements de stator nécessite l'utilisation de deux convertisseurs de tension, où la commande MLI est décalée d'un angle  $\alpha$ . Un pont de diodes alimente les deux onduleurs, dont la tension de sortie est filtrée par un filtre. [Adi11]

La structure générale de l'alimentation de la MASDE est illustrée dans la figure :

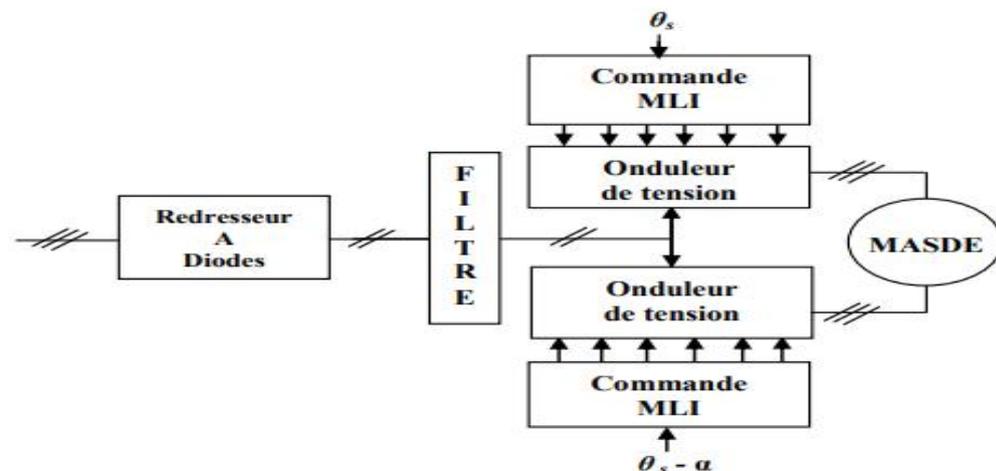


Fig. II. 5. Alimentation de la MASDE par deux onduleurs de tension.

### II.4.1 Modélisation de l'onduleur de tension commande MLI

Les convertisseurs statiques, appelés onduleurs, convertissent l'énergie continue en énergie alternative. Ils ont la capacité de réguler l'amplitude du signal alternatif et de fonctionner à une fréquence fixe ou variable. [RAH20]

Les machines dont la vitesse et le couple sont réglables doivent également agir simultanément sur l'amplitude et la fréquence de la tension d'alimentation. Cette alimentation est assurée par deux onduleurs de tension triphasés symétriques à fréquence variable en

parallèle avec un onduleur (MLI). Chaque onduleur, avec une commutation contrôlée, alimente chaque étoile. [RAH20].

La structure de l'onduleur est illustrée à la figure 7 et se compose de trois branches, chacune comportant deux interrupteurs avec plusieurs dispositifs semi-conducteurs représentés par des transistors, en particulier dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable, où des transistors bipolaires ou des thyristors GTO sont utilisés pour les puissances nominales élevées, Pour les puissances moyennes, on utilise des transistors à commutation rapide (IGBT ou MOSFET)[AME] , avec des diodes associées en position dos à dos pour contrôler de manière fiable l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur, assurer la continuité du courant alternatif et éviter les courts-circuits à la source. [RAH20].

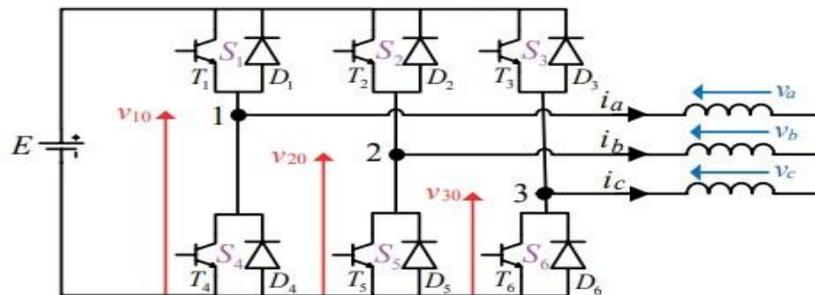


Fig. II. 6. Schéma de l'Onduleur de tension triphasé à deux Niveaux.

Il est nécessaire de vérifier de manière complémentaire les interrupteurs  $T_i$  (qui sont considérés comme des interrupteurs idéaux) [LAG19].

La paire "transistor-diode" représente chaque interrupteur de la manière suivante :

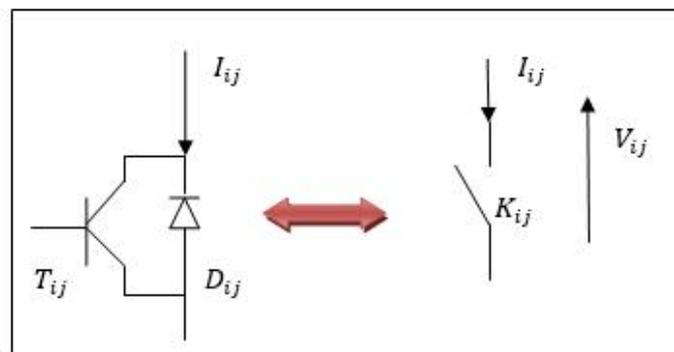


Fig. II. 7. Représentation d'une paire (transistor, diode) par un interrupteur.

Avec :

- : Tension commutée.
- : Courant commuté.

Pour faciliter l'analyse de la structure et la compréhension du comportement de l'onduleur à deux niveaux, nous supposons quelques conditions idéales : [BER16]

- On suppose que la vitesse de commutation des interrupteurs (transistors) soit immédiate.
- Négliger la chute de tension aux bornes des interrupteurs.
- Les diodes (D1, D2, ...) servent de diodes de protection pour les transistors afin de garantir le fonctionnement du circuit de "roue libre" ou pour la récupération de l'énergie.

D'après la figure (7) :

- $V_a, V_b, V_c$  les tensions de phase
- $V_{10}, V_{20}, V_{30}$  Les tensions de ligne à ligne
- $i_a, i_b, i_c$  Les courants de phase
- $E$  la tension continue constante
- $S_i$  représente l'état de commutation de l'ensemble (transistor + diode),  
( $k_{iji} = 1, 2$  ou  $3$   $j = 1$  ou  $2$ ).

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{Interrupteur fermé} \\ 0 & \text{Interrupteur ouvert} \end{cases}$$

#### II.4.2 Fonction de connexion

Afin de développer le modèle mathématique de l'onduleur, on suppose que tous les semi-conducteurs sont parfaits et que {TBGI, diode} est un interrupteur.

En utilisant la loi des mailles, nous pouvons établir les relations suivantes : [LAY20] :

$$V_{10} - V_a + V_b - V_{20} = 0 \quad (\text{II.51})$$

$$V_{10} - V_a + V_c - V_{30} = 0 \quad (\text{II.52})$$

Nous ajoutons l'équation (II.51) à l'équation (II.52), nous obtenons :

$$2V_{10} - 2V_a + V_b + V_c - V_{20} - V_{30} = 0 \quad (\text{II.53})$$

La charge ayant un point neutre symétrique isolé, la somme des courants ( $i_a, i_b, i_c$ ) doit être nulle. Il en va de même pour les tensions de phase ( $v_a, v_b, v_c$ ). Par conséquent, dans l'équation (II.53),  $v_b + v_c$  peut être remplacé par  $-v_a$  pour obtenir : [AME]

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3}(2V_{10} - V_{20} - V_{30}) \\ V_b &= \frac{1}{3}(-V_{10} + 2V_{20} - V_{30}) \\ V_c &= \frac{1}{3}(-V_{10} - V_{20} + 2V_{30}) \end{aligned} \quad (\text{II.54})$$

Selon que l'interrupteur  $k_{ij}$  est fermé ou ouvert, la tension de dérivation  $v_{j0}$  est égale à  $E$  ou à  $0$ . D'autres variables  $f_{11}$ ,  $f_{21}$  et  $f_{31}$  sont introduites et prennent les valeurs 1 (fermé) ou 0 (bloqué) pour l'interrupteur  $k_{i1}$  respectivement.

On peut réécrire l'équation (II.54) de la manière suivante : [GUE16]

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{pmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Maintenant, en passant à l'alimentation du MASDE composé de deux onduleurs de tension triphasée, nous pouvons écrire les équations suivantes en nous basant sur les équations précédentes : [RAH20]

Pour l'onduleur N°1 :

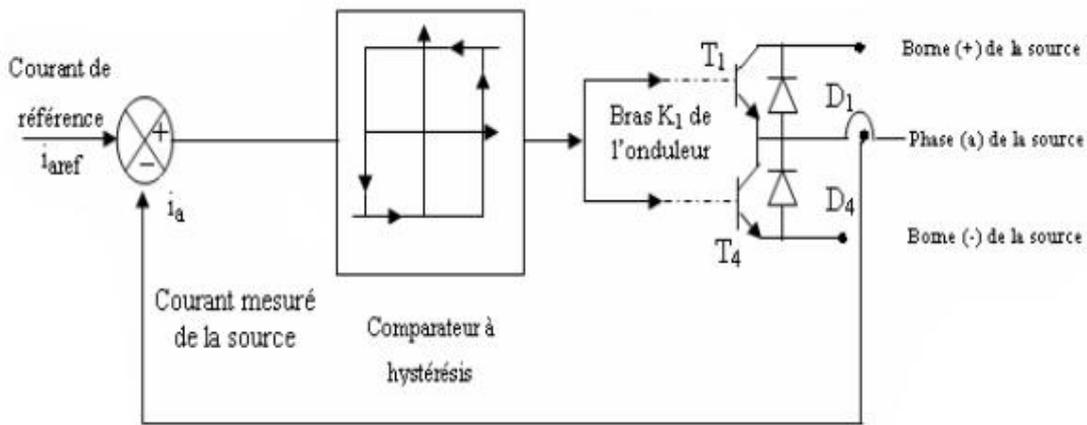
$$\begin{pmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{pmatrix} \quad (\text{II.56})$$

Pour l'onduleur N°2 :

$$\begin{pmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{21} \\ f_{22} \\ f_{23} \end{pmatrix} \quad (\text{II.57})$$

**II.4.3 Commande par MLI à hystérésis**

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) suit le courant de référence avec un écart important par rapport au courant de phase actuel. En appliquant un courant alternatif au moteur, un couple électromagnétique constant est assuré. L'approche la plus simple utilisée à cet effet est une stratégie de contrôle qui compare le courant de phase mesuré au courant de référence en utilisant un comparateur à décalage (voir la figure II. 8). Cela génère des impulsions de démarrage et d'arrêt pour le commutateur de l'onduleur afin de limiter le courant de phase dans une plage d'écart centrée sur le courant de référence et d'une largeur de  $2\Delta i$ .



**Fig. II. 8. Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur**

Les conditions de commutation des commutateurs statiques des deux onduleurs sont définies en termes d'états logiques correspondants comme suit :

$$si \quad i_{ksj} \geq i_{ksjref} + \Delta i; \quad F_{kj} = 1 \tag{II.58}$$

$$si \quad i_{ksj} \leq i_{ksjref} - \Delta i; \quad F_{kj} = 1 \tag{II.59}$$

$$si \quad i_{ksj} = i_{ksjref}; \quad F_{kj} = F_{kj-1} \tag{II.60}$$

Avec :

$i_{ksj}$  (K=1, 2,3/ j=1,2) : sont les courants de phases statoriques ( $i_{as1}, i_{bs1}, i_{cs1}, i_{as2}, i_{bs2}, i_{cs2}$ ), respectivement.

$\Delta i$  : La bande d'hystérésis est sélectionnée de manière à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible du semi-conducteur et à minimiser les harmoniques de courant.

## II.5 MODLISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

Les modèles les plus couramment utilisés dans les études électromécaniques sont généralement relativement simples pour faciliter l'analyse et la conception, et ils reposent sur les hypothèses simplificatrices suivantes [Cha10] :

- Les pales sont considérées comme des modèles identiques avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Le coefficient de frottement entre la pale, l'air et le support est très faible et peut être totalement négligé.

La vitesse du vent est supposée être uniformément répartie entre toutes les pales. Cela implique que chaque pale peut être considérée comme un système mécanique particulier qui se caractérise par la somme de tous les systèmes mécaniques.

Ces hypothèses simplificatrices permettent d'obtenir un modèle mécanique simple, comme le montre la figure (II. 9).

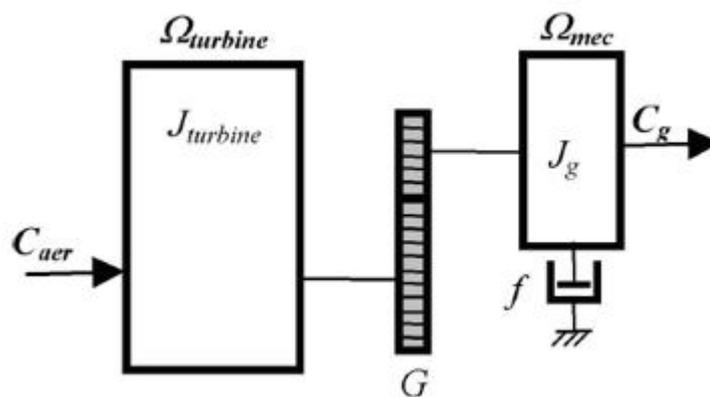


Fig. II. 9. Un modèle simplifié de la mécanique de la turbine.

### II.5.1 Modélisation de la vitesse du vent

Une partie de l'énergie cinétique du vent est récupérée par les turbines et convertie en énergie mécanique et électrique par des générateurs. L'analyse du système complet de conversion d'énergie repose donc sur les propriétés dynamiques du vent, car la puissance éolienne varie comme le cube de la vitesse du vent dans des conditions optimales. Le vent représente un flux à trois dimensions.

Cependant, la direction du vecteur vitesse du vent considérée dans ce modèle est limitée à la direction horizontale. Elle est limitée à la direction horizontale. Par conséquent, le modèle de comportement du vent peut être considérablement simplifié.

La vitesse du vent est généralement exprimée sous la forme d'une fonction scalaire qui varie dans le temps comme suit [Ghe08] :

$$V = f(t) \quad (\text{II. 61})$$

On peut diviser cette fonction de vent en une moyenne, une composante qui varie lentement et des variations. [Cam03] :

$$V_{vent}(t) = V_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(w_i t + \varphi_i) \quad (\text{II. 62})$$

Avec :

➤  $V_0$  : la composante moyenne.

1.  $A_i$ ,  $w_i$  et  $\varphi_i$  : La composante spectrale variable est constituée de trois éléments : l'amplitude, la pulsation et la phase initiale.

### II.5.2 Modélisation de la turbine

Pour calculer la puissance extraite par la turbine, on peut utiliser des modèles de turbine qui prennent en compte la vitesse du vent (incident), la vitesse de rotation de la turbine et la position de l'angle de calage de la pale. On peut donc évaluer le couple appliqué par la turbine à l'arbre de transmission de l'éolienne. Il s'agit donc de décrire le coefficient de puissance de l'éolienne. Les aéro-turbines convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette conversion est réalisée grâce à un multiplicateur de gain  $G$ , associé à une génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, ce qui permet de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation. [Ghe08].

### II.5.3 Génération du couple éolien

Dans la figure (II.10), on peut observer l'aspect global et le profil des pales d'une éolienne à axe horizontal. L'éolienne utilisée dans cette étude est également équipée d'un dispositif de contrôle de l'angle d'inclinaison (Pitch Control).

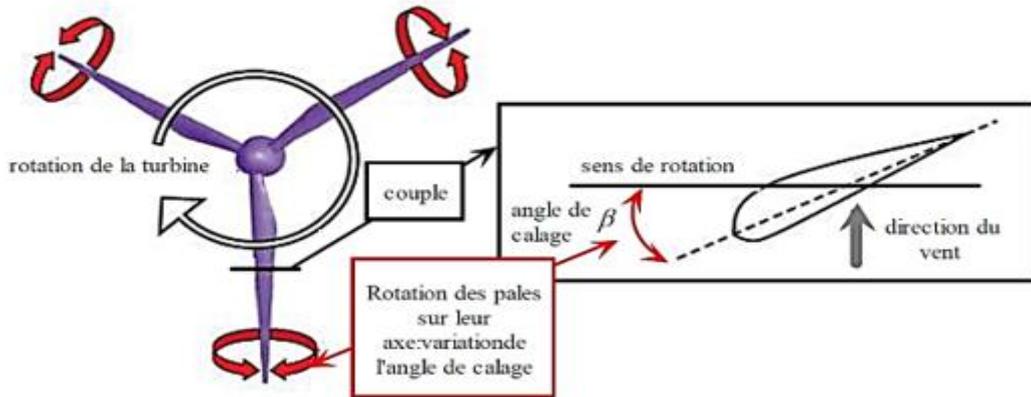


Fig. II. 10. Profil aérodynamique d'une pale.

La puissance éolienne est définie par l'équation suivante [Ela04]:

$$P_v = \frac{\rho}{2} S V^3 \quad (\text{II. 63})$$

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine peut être écrite comme suit :

$$P_t = C_p P_v = 1/2 C_p(\lambda, \beta) \rho S V^3 \quad (\text{II. 64})$$

Le coefficient de puissance représente l'efficacité aérodynamique de l'éolienne et dépend des caractéristiques de la turbine. La figure (II.7) montre la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse et de l'angle d'azimut des pales pour l'éolienne de 1,5 MW utilisée comme exemple dans cette étude [Ela04].

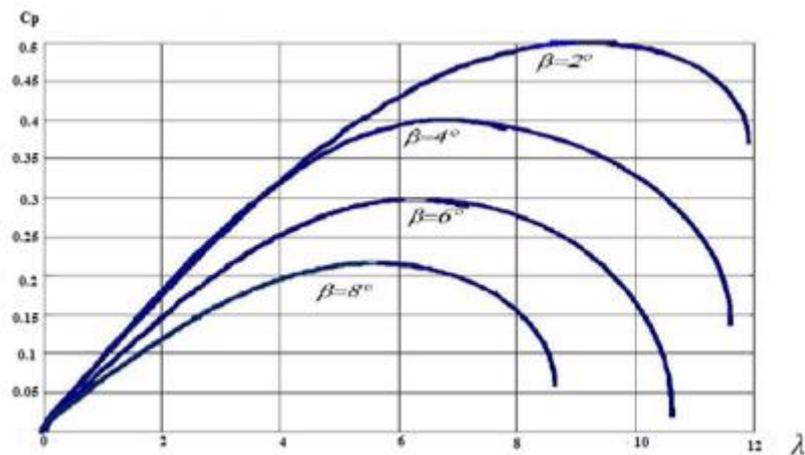


Fig. II. 11. Coefficient aérodynamique en fonction de ratio de vitesse  $\lambda$  pour une éolienne de 1.5 MW.

A partir des valeurs mesurées de cette éolienne de 1,5 MW, l'équation du coefficient de puissance est interpolée comme suit [Ela04] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II. 65})$$

Après avoir déterminé la vitesse de la turbine, on peut directement calculer le couple aérodynamique (couple de la turbine) en utilisant l'équation suivante [Ame12] :

$$C_{aer} = \frac{P_T}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V^3 \quad (\text{II. 66})$$

Un autre coefficient, le couple, peut également être défini en fonction de la vitesse spécifique du vent pour la turbine :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = C_p \frac{v}{R\Omega_t} \quad (\text{II. 67})$$

Alors, nous écrivons :

$$C_{aer} = \frac{1}{2} C_t \rho S V^2 \quad (\text{II. 68})$$

### II.5.4 Modèle du multiplicateur

Les grandeurs mécaniques (vitesse et couple) de la turbine et de la génératrice peuvent être ajustées grâce au multiplicateur de gain, et cela est représenté par la relation mathématique suivante :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \quad (\text{II. 69})$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II. 70})$$

Où est  $C_r$  Le couple de la turbine a un impact sur l'arbre de la génératrice.

#### II.5.4.1 Équations dynamique de l'arbre de la génératrice

En remplaçant les paramètres dynamiques de la turbine sur l'arbre du générateur, nous obtenons un modèle défini par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + D\Omega_r = C_g - C_{em} \quad (\text{II. 71})$$

Avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \quad (\text{II. 72})$$

$$D = \frac{D_t}{G^2} + D_e \quad (\text{II. 73})$$

En analysant l'équation mentionnée précédemment, la figure II.12 peut fournir une représentation physique de la turbine en utilisant les éléments suivants : La position des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

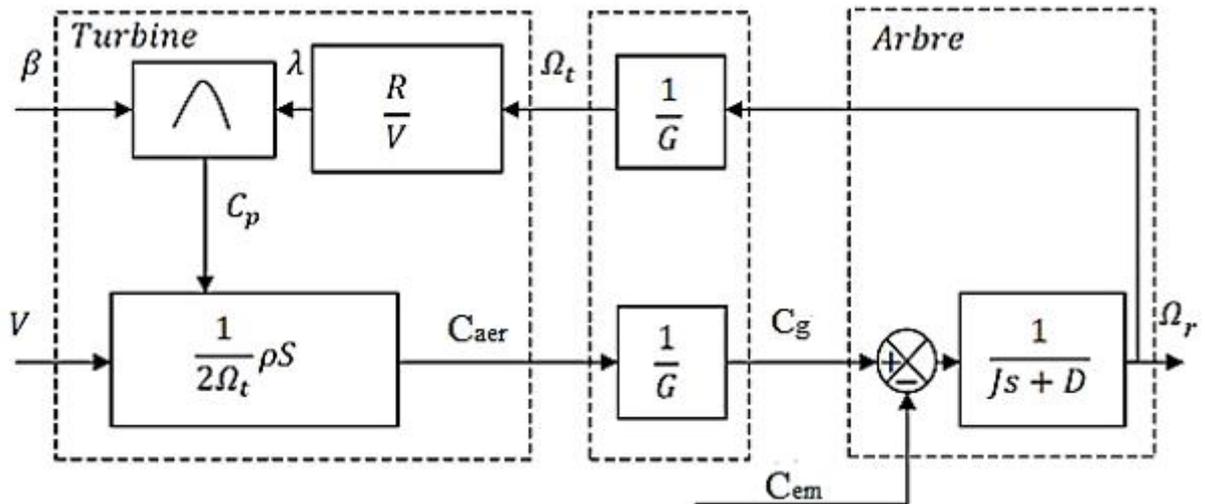


Fig. II. 12. Schéma bloc du modèle de la turbine.

## II.6 CONCLUSION

La modélisation d'une machine asynchrone triphasée à double étoile est étudiée dans ce chapitre. Cette modélisation permet d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité est réduite par certaines hypothèses simplificatrices. Ainsi, un modèle très simple et clair de la machine et un système d'équations d'état peuvent être obtenus à l'aide de la transformation de Park, ce qui est vérifié par simulation numérique.

Une étude des caractéristiques des MASDE alimentés directement par une source d'énergie sinusoïdale et des MASDE alimentés par un onduleur de tension contrôlé par MLI à vide et sous charge a été réalisée. Dans les deux cas, la vitesse est modifiée par l'insertion de la charge. Des méthodes d'interprétation des résultats ont également été présentées. Maintenant que le modèle a été validé, le contrôle du système peut être développé et mis en œuvre efficacement.

Pour surmonter ce problème, la technique de contrôle direct du couple a été proposée, et c'est notre objectif dans le prochain chapitre.

# **CHAPITRE III : Commande direct du couple (CDC)**

### III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre se concentre sur les techniques de contrôle direct du couple (DTC) pour les générateurs d'éoliennes, dans le but d'atteindre des solutions de contrôle de meilleure qualité et des performances dynamiques et constantes pour les générateurs éoliens asynchrones à double étoile.

Pour atteindre cet objectif, ce chapitre présente principalement le principe du contrôle direct du couple (CDC) et son application pour le réglage de la GASDE. Ensuite, il présente les résultats de la simulation et les commente afin de mettre en lumière les performances offertes par cette méthode de contrôle proposée.

### III.2 COMMANDE DIRECTE DU COUPLE (CDC)

La technique de commande directe du couple et du flux, également connue sous le nom de commande directe du couple (CDC), a été introduite par Takahashi [TAK 86] et Depenbrock [DEP 88] en 1985. Cela a permis d'améliorer le contrôle du courant alternatif en contrôlant directement le flux de la machine et le couple de rotation. Cette technique se distingue dans les domaines industriels par sa capacité à orienter le flux sans nécessiter de boucles de rétroaction croisées, en utilisant la modélisation de la machine pour calculer le couple de rotation. Elle contrôle le flux magnétique et le couple de rotation, éliminant ainsi le besoin de capteurs de vitesse.

### III.3 PRINCIPE DE LA COMMANDE DIRECTE DU COUPLE D'UNE GASDE

Les méthodes de contrôle direct du couple (CDC) consistent à commander directement l'ouverture ou la fermeture des interrupteurs de l'onduleur en fonction des erreurs entre les valeurs de référence et les valeurs estimées du couple et du flux. Ce contrôle direct de l'état de l'onduleur découle de la capacité à ajuster directement son état pour réduire l'erreur à l'intérieur d'une bande d'hystérésis spécifique [DER 02].

#### III.3.1 Règles de comportement des grandeurs à contrôler (Flux et Couple)

La régulation correcte du flux magnétique est essentielle pour un contrôle efficace du couple dans les machines multi phasées. dans la régulation de type DTC, le flux statorique est réglé d'abord parce qu'il est le plus facile à estimer et ensuite parce qu'il est plus dynamique que le flux rotorique[Kaz91].

### III.3.1.1 Comportement du flux statorique

Le modèle couramment utilisé pour mettre en œuvre le DTC est celui d'un cadre de référence stationnaire  $\alpha$ - $\beta$ , composé des équations suivantes [Lek13],[Kaz91]:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{s0} + \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt \quad (\text{III. 1})$$

Si un vecteur de tension non nul est appliqué pendant l'intervalle de temps  $[0, T_e]$ , alors dans ce cas :  $V_s \gg R_s I_s$ .

Elle peut s'écrire comme suit :

$$\varphi_s \cong \varphi_{s0} + V_s T_e \quad (\text{III. 2})$$

Où :

- $T_e$  : période d'échantillonnage pendant laquelle le vecteur de tension est appliqué à l'enroulement du stator.

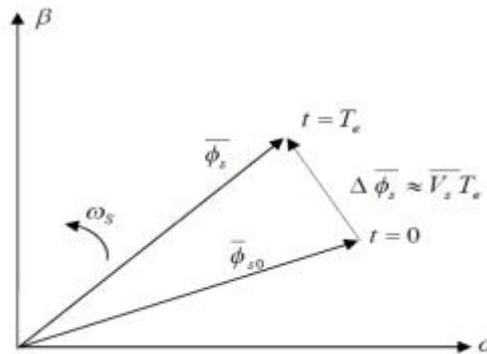


Fig. III. 1. Evolution de l'extrémité du vecteur  $\phi_s$ .

Le flux de stator  $\varphi_s$  concerne le vecteur de tension de stator  $v_s$  par l'équation (III.1) montre que le dérivé de  $\varphi_s$  réagit instantanément aux variations de  $v_s$ . La tension de stator  $v_s$ , en fait, la largeur d'impulsion modulée tension de sortie du convertisseur MLI, qui peut être commandé par le vecteur de référence  $V_{ref}$  dans la modulation de vecteur spatial  $V_{re}$ . Étant donné que  $V_{ref}$  est synthétisé par les vecteurs de tension (états de commutation) du convertisseur, une sélection appropriée des vecteurs peut rendre l'amplitude et l'angle de  $\varphi_s$  réglable [Wu11].

### III.3.1.2 Comportement du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique généré par un générateur asynchrone peut être exprimé de plusieurs manières, parmi lesquelles :

$$C_{em} = \frac{2}{3} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin(\theta) \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

- $\varphi_s$  : sont l'amplitude du vecteur du flux de stator  $\overline{\varphi_s}$ .
- $\varphi_r$  : sont l'amplitude du vecteur du flux de rotor  $\overline{\varphi_r}$ .
- $\theta$  : représente l'angle entre les vecteurs des flux statorique et rotorique.

Selon cette formule, le couple donc fonction est de l'amplitude des deux vecteurs  $\varphi_s$  et  $\varphi_r$  de leur position relative.

### III.4 FONCTIONNEMENT ET SEQUENCES D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE

Il est essentiel de gérer les interrupteurs de l'onduleur de tension de manière à assurer le maintien du flux et du couple de la machine.

Le vecteur de tension du stator  $V_s$  peut être écrit comme suit [Kaz91][Wu11]:

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 \left[ S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right] \quad (\text{III. 4})$$

Où  $(S_a, S_b, S_c)$  : Représentent l'état logique des 3 interrupteurs,  $S_i = 1$  signifie que l'interrupteur haut est fermé et l'interrupteur bas est ouvert ( $V_i = + U_0/2$ ), et  $S_i = 0$  signifie que l'interrupteur haut est ouvert et l'interrupteur bas est fermé ( $V_i = - U_0/2$ ).

On cherche donc à contrôler le flux et le couple via le choix du vecteur de tension qui se fera par une configuration des interrupteurs. Comme nous disposons de trois interrupteurs, il y a donc  $2^3 = 8$  possibilités pour le vecteur  $V_s$ . Les deux vecteurs ( $V_0$  et  $V_7$ ) correspondent au vecteur nul :  $(S_a, S_b, S_c) = (0,0,0)$  et  $(S_a, S_b, S_c) = (1,1,1)$ .

Dans chaque période de modulation, le bras n'est pas commuté deux fois. La figure (III.1) montre les six vecteurs de tension non nuls qui peuvent être générés par un onduleur de tension triphasé à deux niveaux sur le plan complexe. La procédure est la suivante :

Lorsqu'un générateur à induction fonctionne en mode moteur, le vecteur de flux du stator  $\varphi_s$  entraîne le vecteur de flux du rotor  $\varphi_r$  et l'angle de couple  $\theta$  est positif. Dans les systèmes éoliens, le générateur fonctionne normalement en mode générateur. L'angle de couple  $\theta$  est négatif et le couple résultant  $C_{em}$  est négatif [Wu11].

L'angle du couple est :

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

Où :

- $\theta_r$  : L'angle entre le vecteur de flux du rotor et l'axe  $\alpha$ .
- $\theta_s$  : L'angle entre le vecteur de flux de stator et l'axe  $\alpha$ .

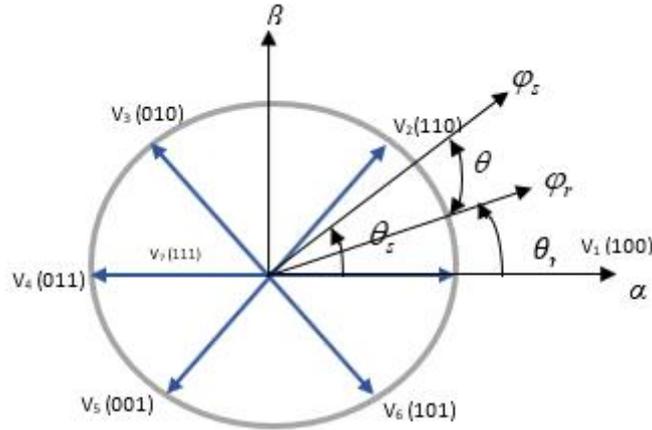


Fig. III. 2. Séquences de fonctionnement d'un onduleur de tension à deux niveaux.

### III.4.1 Estimation de flux et de couple

#### III.4.1.1 Estimation du flux statorique

Dans le contexte du contrôle direct du couple appliqué aux machines asynchrones, l'estimation des composantes du flux de champ fixe est une étape fondamentale pour deux raisons principales : tout d'abord, ces composantes sont nécessaires dans le tableau de sélection du vecteur de commutation optimal. Ensuite, elles sont également requises pour estimer le couple électromagnétique. Il convient également de noter que le flux de champ fixe découle directement de l'équation de tension du stator dans le référentiel du stator :

$$\bar{\varphi}_s = \int_0^t (\bar{V}_s - \bar{R}_s \bar{I}_s) dt \quad (\text{III. 5})$$

Le vecteur flux du stator est calculé à partir de la composante biphasée de l'axe  $(\alpha, \beta)$  comme suit :

$$\bar{\varphi}_s = \varphi_{s\alpha} + j \varphi_{s\beta} \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Les calculs sont effectués dans le repère  $(\alpha, \beta)$  et reviennent en appliquant une transformation de Concordia aux valeurs instantanées du courant  $(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})$  et de la tension statorique (déduite de  $U_0$ ).

$$I_s = I_{s\alpha} + j I_{s\beta} \quad (\text{III. 8})$$

$$\begin{cases} I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \\ I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

On obtient ainsi  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$ , à partir de la tension d'entrée de l'onduleur  $U_0$  et des états de commande  $(S_a, S_b, S_c)$ , soient

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_0 (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

Le module du flux statorique s'écrit comme suit :

$$|\varphi_s| = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (\text{III. 11})$$

L'angle  $\theta_s$  est égal à :

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}} \quad (\text{III. 12})$$

#### III.4.1.2 Estimation du couple électromagnétique

Le couple  $C_{em}$  peut également être estimé en fonction des grandeurs statoriques (flux et courant) à partir de leurs composantes  $(\alpha, \beta)$ , auquel cas le couple est donné par la formule suivante :

$$\hat{C}_{em} = p (\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (\text{III. 13})$$

#### III.4.2 Élaboration de vecteur de commande

Le contrôle direct du couple est effectué par le convertisseur côté machine, tandis que le contrôle de la tension du bus continu et de la puissance réactive du côté réseau sont assurés par le convertisseur connecté au réseau, qui a été discuté au chapitre II et ressemble au contrôle vectoriel. Dans ce schéma, le flux statorique et le couple électromagnétique sont contrôlés séparément pour garantir une performance dynamique optimale. La référence flux de stator  $\varphi_{ref}$  est comparé au flux de stator calculée  $\varphi_s$ , et l'erreur  $\Delta\varphi_s$  est envoyé au comparateur de flux. La référence de couple  $C_{ref}$  est comparée au couple calculé  $C_{em}$ , et leur différence est  $\Delta C$  c'est l'entrée du comparateur de couple. La sortie de comparateurs de flux et de couple ( $\varphi_s$  et  $C_{em}$ ) sont envoyés à l'unité logique de commutation pour la sélection appropriée de la tension, où bien les vecteurs de commutation (états) du convertisseur.

### III.4.2.1 Correcteur de flux

L'objectif est de maintenir le module d'élasticité du vecteur de flux du stator  $\bar{\varphi}_s$  à l'intérieur de la bande d'hystérésis, comme le montre la figure suivante [Vas98],[Kaz91]:

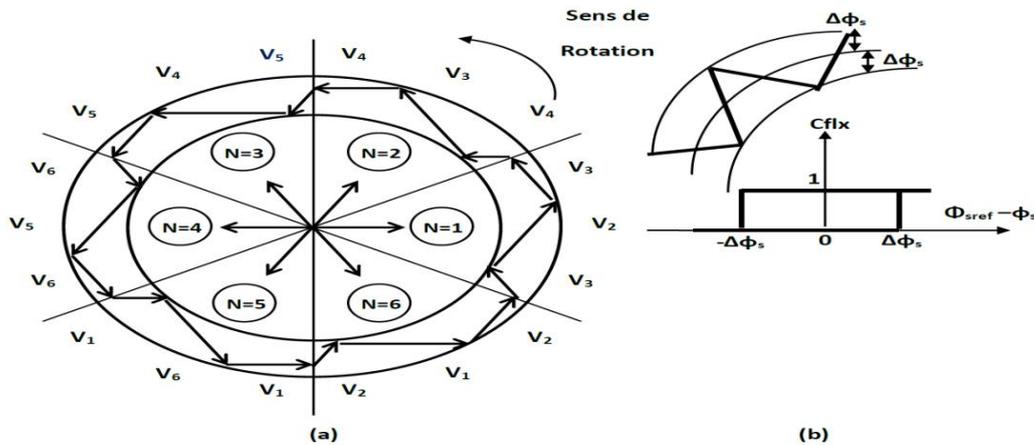


Fig. III. 3. Sélection des tensions correspondante du contrôle de l'amplitude de flux statorique.

Il est nécessaire que la sortie du correcteur affiche le sens de variation du module de  $\bar{\varphi}_s$ , afin de choisir le vecteur de tension approprié. Il est idéal d'utiliser un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux pour cette tâche, offrant également de très bonnes performances dynamiques.

La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne  $Cflx$  indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $Cflx = 1$ ) ou diminuée ( $Cflx = 0$ ) de façon à maintenir :

$$|\varphi_{ref} - \varphi_s| \leq \Delta\varphi_s$$

Avec :

- $\varphi_{ref}$  : Consigne de flux de référence.
- $\Delta\varphi_s$  : Largeur d'hystérésis du correcteur.

### III.4.2.2 Correcteur de couple électromagnétique

La fonction du correcteur de couple est de maintenir le couple dans les limites suivantes :

$$|C_{ref} - C_{em}| \leq \Delta C$$

Avec :

- $C_{ref}$  : Couple de référence.
- $\Delta C$  : La bande d'hystérésis du couple.

Le contrôle du débit présente une distinction, car l'énergie peut être positive ou négative en fonction de l'orientation du rotor.

Le régulateur à trois niveaux, également appelé correcteur à trois niveaux, permet de contrôler de façon précise le couple et la direction de rotation, que ce soit pour un couple positif ou négatif. La valeur du couple doit être augmentée en valeur absolue ou réduite, selon la variable logique représentée par la sortie du régulateur [Kaz91].

La figure (III -3) illustre ce type de correcteur.

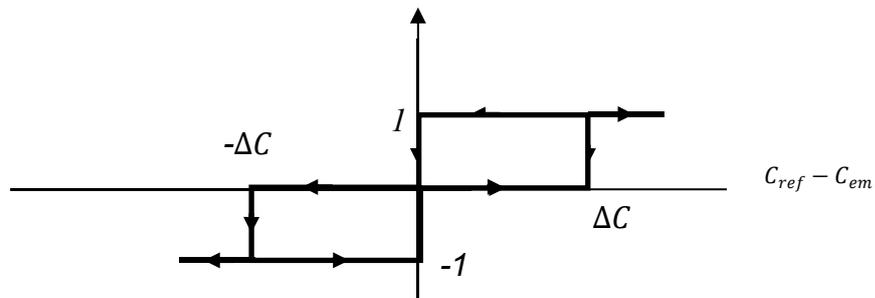


Fig. III. 7. Correcteur de couple à trois niveaux.

### III.4.3 Élaboration de la table de commande

La logique utilisée dans le tableau (III.1) pour la commutation n'est valide que si le générateur fonctionne dans le sens des aiguilles d'une montre. Si le générateur fonctionne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, la logique de commutation indiquée dans le tableau (III.2) est utilisée [Wu11].

Tab. III. 1.Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux  
(Dans le sens inverse des aiguilles).

$Df_s$	$DC_e$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
1	1	110	010	011	001	101	100
	0	111	000	111	000	111	000
	-1	101	100	110	010	011	001
0	1	010	011	001	101	100	110
	0	000	111	000	111	000	111
	-1	001	101	100	110	010	011

Tab. III. 2.Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à trois niveaux  
(Dans le sens horaire).

$Df_s$	$DC_e$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
1	1	101	001	011	010	110	100
	0	111	000	111	000	111	000
	-1	110	100	101	001	011	010
0	1	001	011	010	110	100	101

	0	000	111	000	111	000	111
	-1	010	110	100	101	001	011

### III.4.4 Structure générale du contrôle direct de couple d'une GASDE

Il est intéressant de noter que, pour atteindre le contrôle du point de puissance maximale (MPPT) du système d'énergie éolienne, comme illustré dans la figure (III.4), le couple du générateur  $C_{em}$  doit suivre précisément la référence  $C_{ref}$ . Cette exigence peut être satisfaite en ajoutant un régulateur PI avant le comparateur de couple. Le régulateur PI garantit que le couple du générateur soit égal à la référence fournie par le système MPPT lorsque le système fonctionne en régime permanent [Wu11].

La structure complète de la commande directe du couple pour GASDE est donnée par la figure suivante :

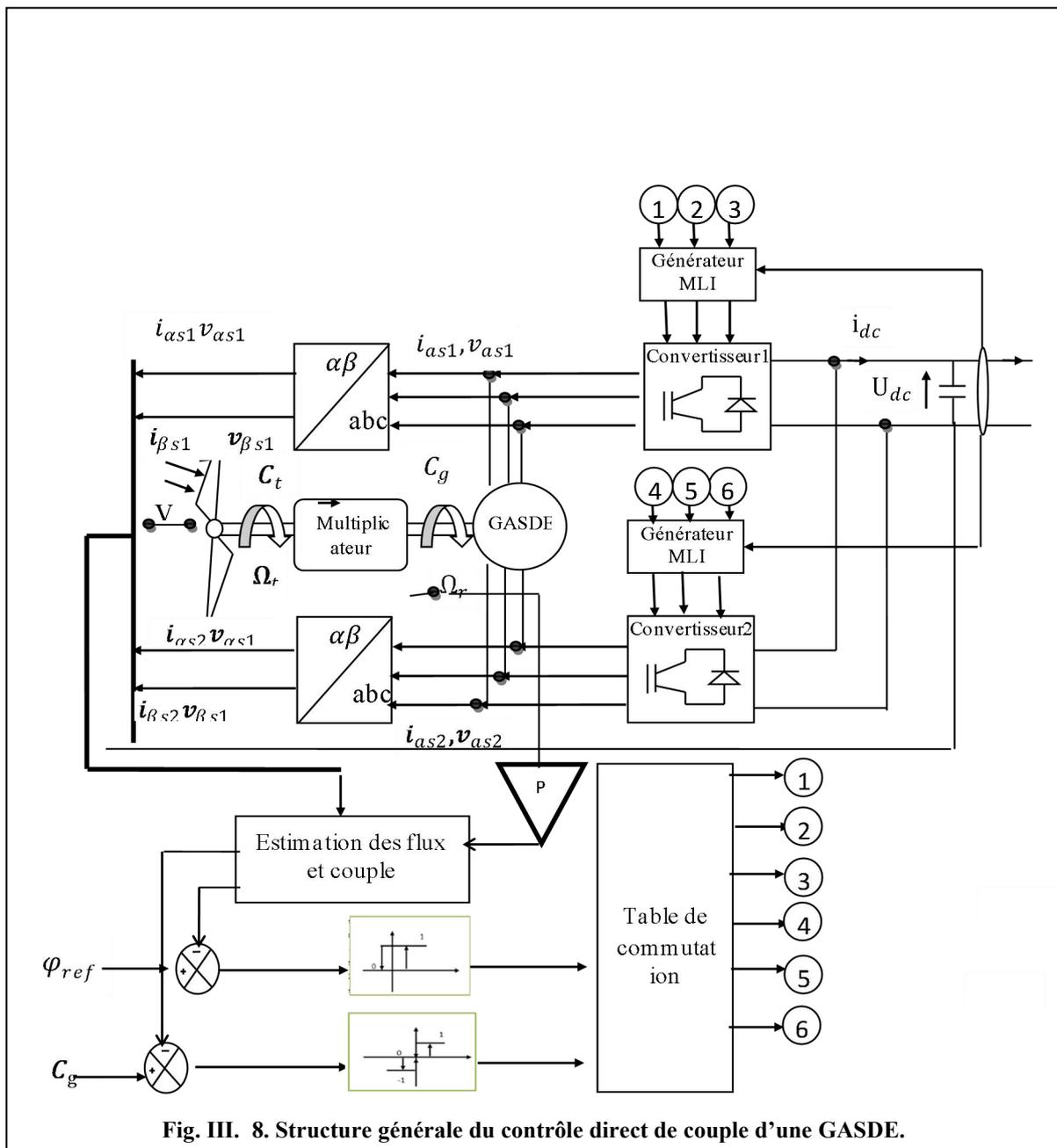


Fig. III. 8. Structure générale du contrôle direct de couple d'une GASDE.

## III.5 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATION

### III.5.1 Application profil constant

Comme dans les chapitres précédents, le système étudié est simulé numériquement à l'aide de la technique de Commande Directe du Couple (DTC) avec un régulateur PI classique. Le système éolien est contrôlé en utilisant la technique DTC avec un régulateur PI classique pour garantir le Point de Puissance Maximale (MPPT) du système éolien. Un profil de vent constant a été utilisé au début de la simulation.

Les figures suivantes les résultats de la simulation DTC pour le générateur éolien asynchrone sont présentés.

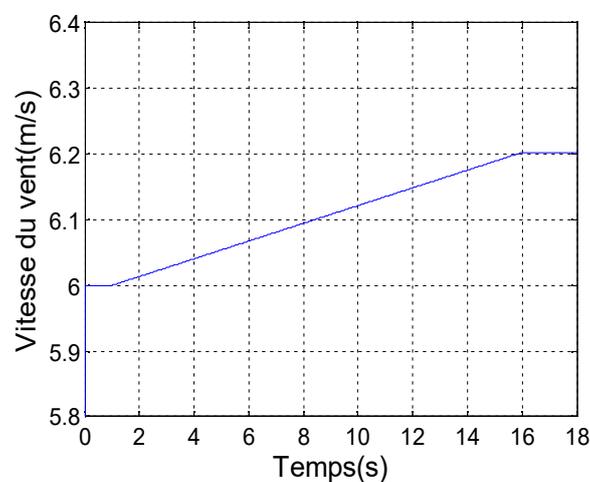
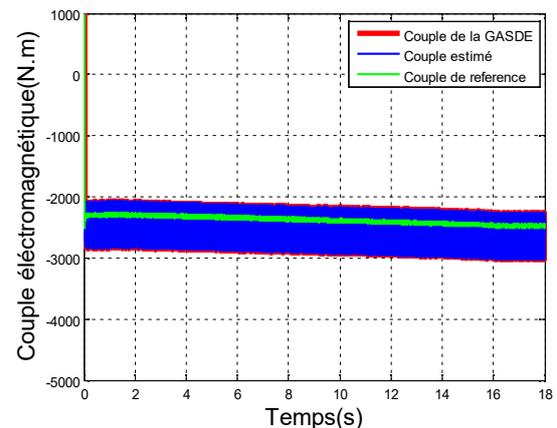
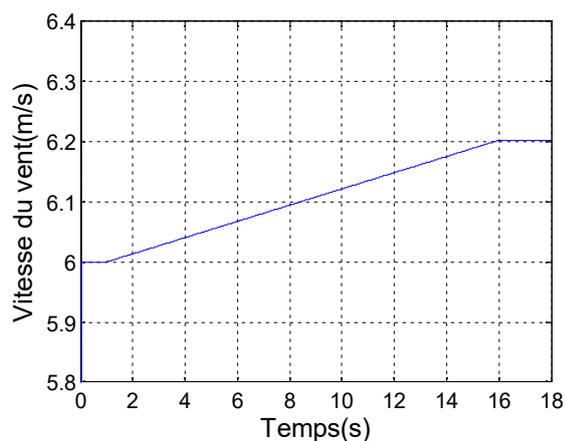
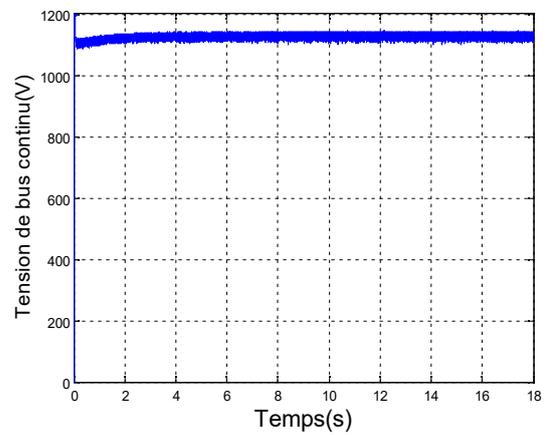
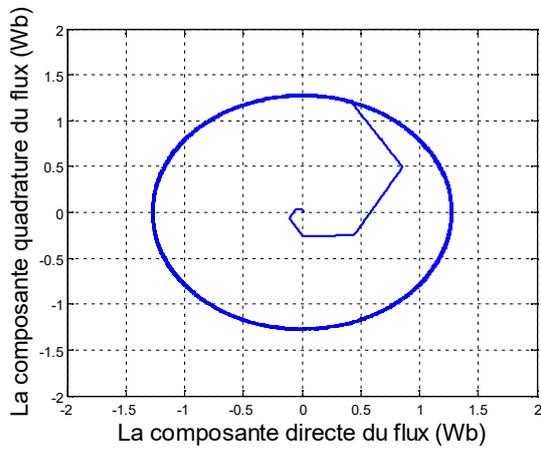
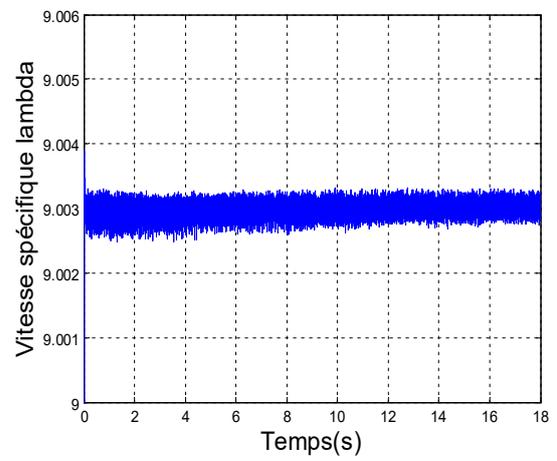
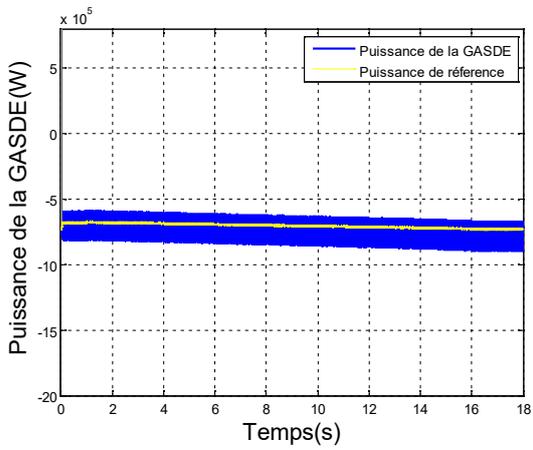
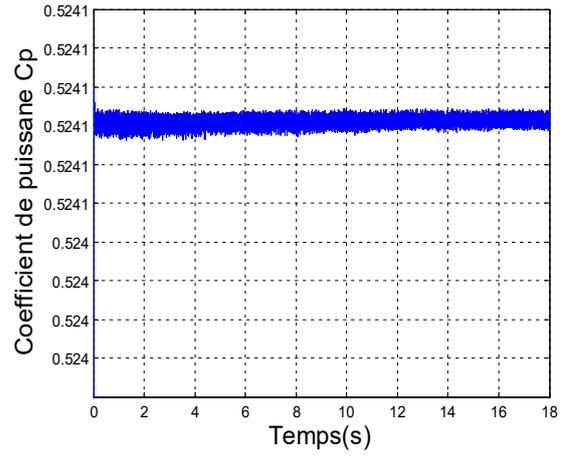
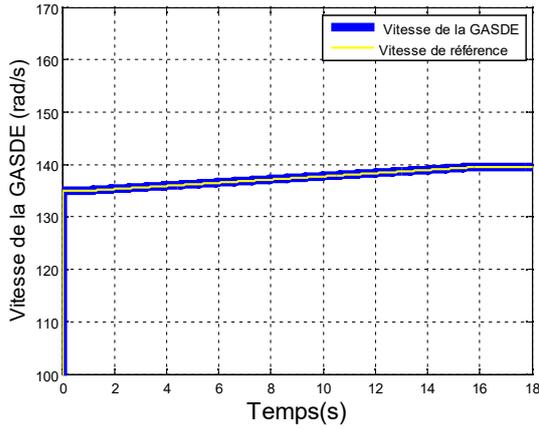


Fig. III. 9. Profil constant.





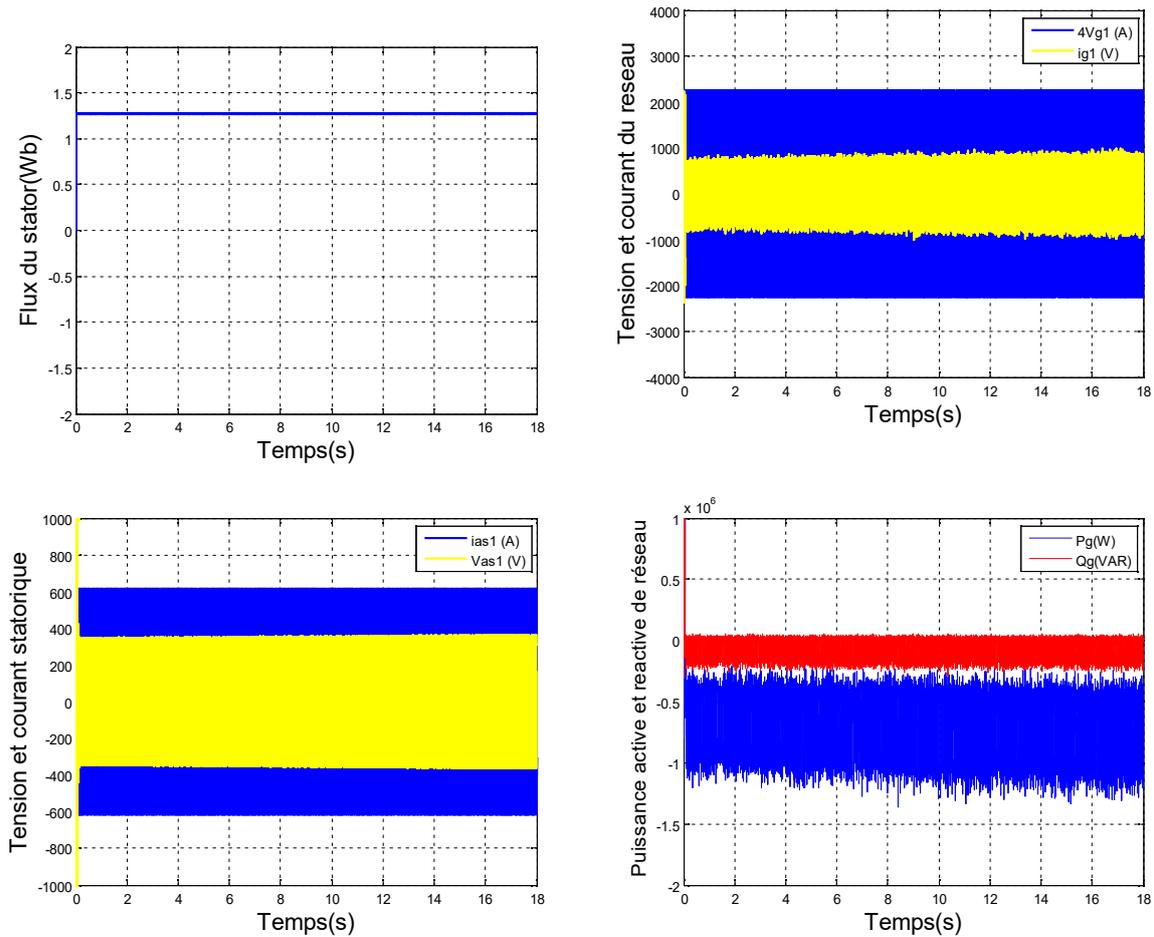


Fig. III. 10. Résultats de simulation de la DTC de l'aérogénérateur asynchrone double étoile.

### • Interprétation

Les résultats de la simulation de la figure (III.6) montrent que :

- Premièrement, on observe une amélioration au niveau de la vitesse spécifique  $\lambda$  ainsi qu'une amélioration du coefficient de puissance  $C_p$ , avec également une réduction des fluctuations autour de leurs valeurs optimales.
- La vitesse de la machine suit la même forme que celle du vent selon sa référence, passant d'une valeur initiale de 135 (rad/s) à une valeur atteignant 139,6 (rad/s). Le couple électromagnétique oscille avec un taux d'ondulation relativement élevé selon sa référence et sa valeur estimée, avec une variation finale du couple d'environ -2205 (N.m) à -2384 (N.m).
- De plus, la puissance active continue de suivre sa référence, avec des valeurs variant de -0.6208 (MW) à -0.7100 (MW).
- La phase statorique présente une forme d'onde sinusoïdale de la tension et du courant, avec un déphasage de  $180^\circ$  entre eux, qui témoigne de la production d'énergie électrique. La tension de phase efficace est de 435 volts, tandis que le courant de phase varie de 280 ampères à 296 ampères.

- Par ailleurs, le flux magnétique dans le repère biphasé ( $\alpha, \beta$ ) du stator forme un cercle.
- Notez que le flux du stator est réglé sur la valeur de référence 1,27.
- La tension de bus continu coïncide par référence valeur 1131V.
- La tension et le courant du réseau suivent une distribution sinusoïdale avec un déphasage de  $180^\circ$  degrés entre eux, ce qui s'explique par le fait que le flux d'énergie est toujours du générateur éolien vers le réseau électrique. La valeur efficace de la tension de phase est de 563 (V) volts, et la valeur efficace du courant de phase varie entre 552 (A) ampères et 668 (A) ampères.
- Pour la puissance active et réactive fournie au réseau électrique, la puissance active varie entre -0,6357 (MW) et -0,7114 (MW), tandis que la puissance réactive est nulle en fonction d'un point de consigne (la puissance négative représente la puissance générée).

Effectivement, les simulations montrent les performances de la commande DTC, qui ont confirmé de manière appropriée le point de puissance maximale du système éolien.

### III.6 CONCLUSION

La technique de commande directe du couple est une méthode efficace pour contrôler les machines électriques en permettant l'imposition indépendante du couple et du flux sur les machines à courant alternatif.

Dans ce chapitre, les résultats de simulation mettent en évidence la capacité de la DTC à réguler avec précision la vitesse, le couple et la puissance générée par l'éolienne, tout en maintenant un excellent comportement dynamique. Grâce à cette approche, il est possible d'optimiser le fonctionnement du système éolien et de garantir une production maximale d'énergie, tout en assurant la stabilité et la fiabilité du réseau électrique.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce travail actuel, nous nous sommes concentrés sur les contributions techniques des techniques de contrôle et d'optimisation appliquées au système de conversion de l'énergie éolienne basé sur un générateur asynchrone à double étoile.

Pour atteindre ces objectifs, le premier chapitre de ce travail était dédié à présenter quelques concepts et un aperçu global de l'état de l'art sur les différents types de éoliennes disponibles, les différentes génératrices utilisées dans la conversion dynamique, et les avantages justifiant le choix d'un générateur double étoile.

Dans le deuxième chapitre et afin de simplifier certaines complexités, la modélisation d'un générateur asynchrone à double étoile est étudiée, établissant ainsi le modèle mathématique des éléments clés constituant la chaîne de conversion électromécanique dans l'éolienne. Cela nous a permis d'obtenir un modèle simple et clair du générateur et un système d'équations d'état en utilisant la transformation de Park, et enfin cela a été vérifié par simulation.

De plus, dans le troisième chapitre, afin d'améliorer les performances dynamiques et statiques du système éolien étudié, d'assurer le suivi en temps réel du point de fonctionnement optimal pour obtenir une production maximale d'électricité pour différentes vitesses du vent, et d'optimiser la qualité de l'énergie fournie au réseau, une technique de contrôle a été proposée et développée dans le dernier chapitre, à savoir la commande directe du couple (CDC). Les résultats de simulation confirment ces affirmations.

Le travail réalisé dans cette thèse ouvre de nombreuses perspectives. Parmi les problèmes qui n'ont pas été abordés en détail ici et qui pourraient faire l'objet de recherches futures, les points suivants ont été mentionnés :

- Analyse de la GASDE en combinaison avec d'autres méthodes de contrôle comme la CDP.
- Mise en pratique concrète des diverses stratégies de contrôle suggérées.
- Étude de l'impact et de l'influence des éoliennes à double étoile asynchrones sur les réseaux électriques.
- Étude de la capacité à développer de nouveaux systèmes de contrôle intelligents pour améliorer l'efficacité de fonctionnement des éoliennes et répondre aux variations des conditions de vent.
- Intégration de GASDE dans le parc éolien.

## BIBLIOGRAPHIE

[**TOU 10**] B. Toual "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2010.

[**Ame16B**] F.AMEUR, K.Kouzi, N.K.Merzouk " Design and Analysis of Direct Power and Flux Control of Dual Stator Induction Generator Integrated in Wind Conversion System connected to the Grid " in *Electrotehnică, Electronică, Automatică (EEA)*, Vol. 64 , N. 3,2016.

[**Lie06**] X.Lie,"Direct Active And Reactive Power Control Of DFIG For Wind Energy Generation ", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, September 2006.

[ **Adb07**] A. Abdelli, "Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[**Ame13**] F. AMEUR, K. Kouzi," Genetic Algorithm Optimized PI and Fuzzy Logic Speed Vector Control of Dual Stator Induction Generator in Wind Energy Conversion System" In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Systems and Control*, October 29-31, Alger, Algerie. pp. 174-180, 2013.

[**Bek14**] Y. Bekakra "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur

Asynchrone à Double Alimentation" Thèse de Doctorat de l'université de Biskra, 2014.

[**Bel10 A**] B. Beltran "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur" Thèse de Doctorat de Université de Bretagne Occidentale ,France2010 .

[**Bel10B**] H. Belghitri, Modelisation, «Simulation Et Optimisation D'un Systeme Hybride Eolien-Photovoltaïque», *Memoire De Magister*, U Niversite Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen, 2010.

[**Cam03**] H. Camblong,"Modélisation de l'impactde Perturbations d'origine Eolienne dans la génération d'électricité par des aerogenerateurs a vitesse variable", Thèse de

Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[**Cha10**] A. Chaiba, "Commande de la Machine Asynchrone à Double alimentation par des Techniques de l'Intelligence Artificielle". Thèse de Doctorat de l'université de Batna, 2010

[**Ela04**] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Lille et l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.

[**Jon11**] G. Jones et L.Bouamane, "Historical Trajectories And Corporate Competences In Wind Energy", Harvard Business School, 2011.

[**Lec09**] P. Leconte, M.Rapin, E.Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'ingénieur, Traité Génie Mécanique, 2009.

[**Lop08**] Miguel Lopez. "Contribution A L'optimisation D'un Systeme De Conversion Eolien Pour Une Unite De Production Isolee . Electric power", Thèse de doctorat de Université Paris Sud - Paris XI, 2008. French.

[**Mek14**] M. Mekki "Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable" Thèse de Doctorat de l'université de Annaba, 2014.

[**Mer13**] E. Merabet, "Amélioration des performances de régulations d'une machine asynchrone double étoile par les technique de l'Intelligence Artificielle", Thèse de Doctorat, Batna ,2013.

[**Mor14**] M. Morshed Chowdhury, "Modelling And Control Of Direct Drive Variable Speed Wind Turbine With Interior Permanent Magnet Synchronous Generator", Thèse de Doctorat de Université de Tasmanie, 2014

[**Nic94**] C. Nichita, E. Ceanga, A. Piel, J. J. Belhache, L. Protin, "Real Time Servosystem for a Wind Turbine Simulator", IEEE 3rd International. Proceeding of IEEE International Conference on Industrial Technology, Workhop on Advanced Motion Control, USA, pp. 1039-1048, 1994.

[**Pra14**] M. D. Prada Gil" Design, operation and control of novel electrical concepts for off shore wind power plants", Thèse de doctorat de Université Politecnica de Catalunya, Barcelone, Espagne, 2014.

[**Rib12**] C. E. D. Riboldi"Advanced Control Laws for Variable-Speed Wind Turbines and Supporting Enabling Technologies" Thèse de Doctorat de Université Politecnico di Milano, Italie 2012.

[Zhi13] J. Zhiqiang, "Control Studies of DFIG based Wind Power Systems. ", Thèse de doctorat de Tennessee, Knoxville, 2013.

[HAD] D. Hadiouche « Contribution à l'Etude de la Machine Asynchrone Double Etoile : Modélisation, Alimentation et Structure ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1.200.

[KIY20] Brahim KIYYOUR, « Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile », these de doctorat , Spécialité Electrotecgnique , Université de Biskra 2020 page 10.

[YAH11] A. Yahdou, "Commande et observation par modes glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique", Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chelf, 2011.

[Tah08]T.Laamayad, Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode Glissant Apport de la Logique floue", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2008.

[Fou16] F. BERRABAH, COMMANDE SANS CAPTEUR DE LA MACHINE ASYNCHRONE", Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2016.

[BRA20] B. KIYYOUR, "Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider– Biskra, 2020.

[MOH17] M. HEHELEF, "Commande directe du couple d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique par les techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes,2017.

[SAM11] S. CHEKKAL. Evaluation des Performances de l'Aérogénérateur à base de la Machine Asynchrone Double Etoile Connecté au Réseau Electrique. Mémoire de Magister, Université AMIRA- BEJAIA, 2011.

[BEN19] BENAKCHA Meryem, « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE'. », These de doctorat, Spécialité Génie Electrique, Université de M'sila 2019.

[LAK14] LAKHDARI Meftah, « SIMULATION ET COMMANDE DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE POUR AEROGENERATION », These de magister, Spécialité de Commande électrique, Univercité de Setif 2014, page67.

[LAG19] LAGGOUN Louanasse, « Contribution au Contrôle de la Machine Synchrone Double Etoile »,these de doctorat , spécialité de Electrotechnique , Université de Batna 2019

[Ami12] H. Amimeur Contribution Au Contrôle de la Machine Asynchrone Double Etoile , Thèse de Doctorat en science ,Batna 2012.

[RAH20] RAHALI Hilal, « Commandes non linéaires hybrides et robustes de la machine asynchrone à double étoile « MASDE » », these de doctorat, Spécialité Génie Electrique, Université de M'sila 2020, page04.

[BER16] F. BERRABAH, "COMMANDE SANS CAPTEUR DE LA MACHINE ASYNCHRONE", Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2016.

[Ghe08] K. Ghedamsi, "Contribution à la Modélisation et la Commande d'un Convertisseur Direct de fréquence Application à la conduite de la machine asynchrone ", Thèse de Doctorat de l'ENP, 2008.

[TAK 86] I.Takahashi, T.Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Trans.Ind.Applicat.,vol. IA-22, pp. 820–827, Sept./Oct. 1986.

[DEP 88] Depenbroak 88. "Direct Self-Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 3, No. 4. Oct. 1988.

[DER 02] A. Derbane. « Contrôle Direct du Couple de la Machine Asynchrone à Aimants Permanents Basé Sur la Logique Floue ou les Réseaux de Neurones». Thèse Magister, L'EMP, 2002

[Kaz 91] M.P. Kazmierkowski, A. B. Kasprowicz, "Improved direct torque and flux vector control of PWM inverter-fed induction motor drives," IEEE Trans. Indus. Electron., vol. 42, n°4, pp. 344-349, Aug. 1991.

[Lek 13] S.Lekhchine,T.Bahi, Y.Soufi , "Direct Torque Control Of Dual Star Induction Motor

" International Journal Of Renewable Energy Research , 2013

[Wu 11] B. Wu ,Y.Lang, Navid Zargari, Samir Kouro, "Power Conversion And Control Of Wind Energy Systems ", IEEE Press Series Grower Engineering, 2011.

[Vas98] P. Vas, "Sensorless Vector And Direct Torque Control ", Oxford University, 1998.

## ANNEXE A

### A.1 Synthèse des régulations PI

L'objectif de l'utilisation de régulateurs consiste à garantir une réponse dynamique efficace et une plus grande résistance face aux perturbations internes ou externes. Le schéma fonctionnel de régulation du courant, applicable aux axes d et q, est illustré dans la figure (A.1).

### A.2 Calcul des paramètres du régulateur PI

La fonction de transfert en boucle fermée est écrite comme suit :

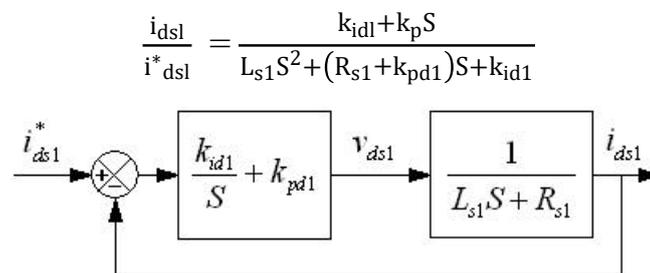


Fig. A.1. Schéma réduit de régulation des courants.

En imposant une paire de pôles complexes conjugués  $S_{1,2} = \rho_{d1} \pm j\rho_{d1}$ , l'équation caractéristique désirée en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$P(S) = S^2 + 2\rho_{d1}S + 2\rho_{d1}^2$$

En identifiant le régulateur PI, nous pouvons obtenir les paramètres suivants :

$$k_{pd1} = 2\rho_{d1}L_{s1} - R_{s1}$$

$$k_{id1} = 2\rho_{d1}^2 L_{s1}$$

Avec la même procédure et les mêmes étapes pour calculer les paramètres du régulateur de courant  $i_{qs1}$ ,  $i_{ds2}$  et  $i_{qs2}$ .

### A.3 Régulateur de vitesse

Dans la figure suivante, le schéma du régulateur de vitesse est présenté.

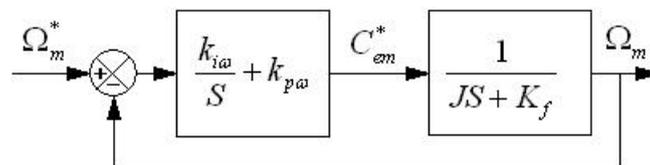


Fig. A.2. Le plan simplifié de régulation de vitesse.

La méthode employée pour l'estimation des paramètres du régulateur de vitesse est identique à celle employée pour l'estimation des paramètres des régulateurs de courant, afin d'obtenir :

$$k_{pw} = 2\rho_w J - k_f$$

$$k_{iw} = 2\rho_w^2 J$$

**الملخص**

حرصاً على تحسين الأداء الديناميكي والثابت وزيادة متانة التحكم في نظام تحويل الطاقة الريحية المعتمد على الآلة في هذه الأطروحة، حيث يتم تقدير العزم (DTC) غير المتزامنة ذات النجمين، تم اقتراح تقنية التحكم المباشر في العزم وقد تم تقديم نتائج المحاكاة لتأكيد هذا الادعاء. والتدفق بناءً على الكميات الكهربائية القابلة للقياس فقط

**الكلمات الرئيسية**

مولد غير متزامن ذو نجمتين، نظام طاقة رياح بسرعة متغيرة، محولات ثلاثية الطور، التحكم المباشر بالعزم، مُنظّم التناسبي التكاملي التقليدي، تحسين المُنظّمات، خوارزميات جينية

**Résumé**

Dans le souci d'apporter une amélioration des performances dynamiques et statiques et de la robustesse du contrôle du Système de Conversion d'Énergie Éolienne à base de la machine asynchrone double étoile, une technique de commandes à savoir la commande directe de couple (CDC), a été proposée dans ce mémoire, dans lesquelles le couple et le flux sont estimés à partir des seules grandeurs électriques mesurables. Les résultats de simulation ont été donnés pour confirmer cette assertion.

**Mots clés**

Générateur asynchrone à double étoile, Système éolien à vitesse variable, Convertisseurs triphasés, Contrôle direct du couple, Régulateur PI traditionnel, Amélioration des régulateurs, Algorithmes génétiques.

**Abstract**

In order to improve the dynamic and static performance as well as the robustness of the control of the Wind Energy Conversion System based on the double-star induction machine, a control technique known as Direct Torque Control (DTC) has been proposed in this thesis. In this method, torque and flux are estimated based solely on measurable electrical quantities. Simulation results have been provided to confirm this assertion.

**Keywords**

Double-star asynchronous generator, Variable-speed wind system, Three-phase converters, Direct torque control, Traditional PI controller, Regulator improvement, Genetic algorithms.