



## Mémoire de Master

Présenté au

**Département** : Génie Électrique

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Electrotechnique

**Spécialité** : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

**CHIBANE Mohamed Nabil et OULDHOCINE Mustapha**

## Thème

**Etude comparative d'une commande dédiée aux systèmes éoliens**

Soutenu Publiquement le : **30/Juin/2024**

Devant la commission composée de :

Mr:	ISSAM Griche	M.C. A	Univ. Bouira	Président
	MAAFA Amar	Prof.	Univ. Bouira	Rapporteur
	MOUASSA Souhil	M.C. A	Univ. Bouira	Examineur
	Mellah Hacene	M.C. A	Univ. Bouira	Examineur

## Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents, pour leur soutien inconditionnel et leurs innombrables sacrifices. Leur amour, leurs encouragements inébranlables et leur confiance en nous ont été les piliers de notre réussite. Vous nous avez inculqué la valeur des études et nous avez toujours soutenus moralement, même dans les moments les plus difficiles. Ce mémoire est autant le fruit de vos efforts que des nôtres. Merci de tout cœur.

À nos familles, pour leur patience et leur compréhension.

À nos enseignants et mentors, dont les conseils et la sagesse nous ont guidés tout au long de ce parcours académique.

À nos amis et aux gens précieux, pour leur soutien, leur camaraderie et les moments partagés qui ont rendu ce travail possible.

---

### *Remerciements*

Nous adressons nos sincères respects et remerciements à notre promoteur, Mr A. MAAFA, pour son encadrement, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et sa disponibilité ont été essentielles pour mener à bien cette recherche, nous remercions également notre co-rapporteur Mr H. MELLAH, pour son aide précieuse, ses orientations pertinentes et ses encouragements constants

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer notre travail :

- Dr. I. GRICHE
- Dr. S. MOUASSA

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants et mentors, pour leur dévouement et leur contribution à notre formation académique.

Nos remerciements vont aussi à nos familles, pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leur compréhension tout au long de notre parcours académique. Votre amour et votre encouragement ont été des piliers indispensables.

Nous tenons aussi à exprimer notre gratitude à nos amis et collègues, votre présence ont rendu ce parcours plus agréable et motivant.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre aide et votre soutien ont été inestimables.

## SOMMAIRE

Introduction Générale .....	xii
-----------------------------	-----

### **Chapitre 01 Etat de l'art sur la commande avancée**

1.1. Introduction .....	1
1.2. Aperçu sur les différentes sources d'énergies renouvelables.....	2
1.3. Histoire de l'éolienne .....	2
1.4. Différents types d'éoliennes.....	3
1.4.1.1. Avantage et inconvénient.....	3
1.4.2. L'éolienne verticale Principe et fonctionnement .....	3
1.4.2.1 L'éolienne Darrieus.....	3
1.4.2.2. L'éolienne Savonius.....	4
1.5. Production en Algérie .....	4
1.6. Production mondiale .....	5
1.7. Définition de la commande avancée .....	5
1.7.1. Commande par Mode Glissant (SMC).....	6
1.7.2. Commande Floue .....	6
1.7.3. Commande par Retour d'État .....	6
1.7.4. Commande Adaptative.....	7
1.8. Domaine d'Application pour les Éoliennes .....	7
1.9. Conclusion .....	8

### **Chapitre 02 Modélisation de la chaine de conversion**

2.1. Introduction .....	10
2.2. Modélisation de la turbine.....	10
2.3. Multiplicateur.....	12
2.3.1. La vitesse.....	13
2.3.2. Le couple.....	13

2.4. Equation dynamique de l'arbre .....	14
2.5. Modélisation de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné .....	15
2.5.1. Description de la MAS .....	15
2.5.2. Hypothèse de travail.....	16
2.5.3. Modèle de la MAS a rotor bobiné dans le repère (abc) .....	16
2.5.4. Modèle dynamique de la MAS à rotor bobiné dans le repère de Park.....	18
2.5.4.1. Définition et Principe .....	18
2.5.5. Représentation d'état de la MAS a rotor bobine.....	19
2.6. Expression du couple de la MAS à rotor bobiné.....	20
2.6. Modélisation de la machine asynchrone en cascade .....	22
2.6.1. Machine asynchrone en cascade .....	22
2.6.1.1. Concept de la Cascade .....	22
2.6.1.2. Couplage des Machines .....	22
2.6.1.3. Élimination des Bagues et Balais.....	23
2.6.2. Modèle de la cascade .....	24
2.6.3. Expression du couple électromagnétique de la cascade.....	28
2.7. Résultat de simulation .....	29
2.7. Conclusion .....	31

### **Chapitre 03 Commande fractionnaire d'une MASEC dédiée à l'éolien**

2.7. Introduction.....	33
3.2. Description du système étudié .....	33
3.3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1 .....	35
3.4.2. Relation entre la puissance du premier stator et le courant du deuxième stator .....	39
3.5. Contrôle direct des puissances .....	40
3.6. Synthèse du régulateur PI.....	41
3.7. Correcteur PID classique [19].....	43
3.7.1. Structure du PID.....	44
3.8. Résultat de simulation .....	45

---

3.8.1. Résultat du correcteur PI.....	45
3.8.2. Résultat du correcteur PID fractionnaire.....	47
3.8.3. Comparaison entre PI et $PI\lambda D\mu$ .....	48
3.9. Conclusion .....	50
 Conclusion Générale .....	 52

---

## Liste des figures

<b>Figure 1-1.</b> Evolution mondiale de la consommation d'énergie [4] .....	2
<b>Figure 1-2.</b> Eolienne de 100 kW de grand vent, Eolienne d'Adrar .....	4
<b>Figure 2-1.</b> Schéma de la turbine éolienne .....	10
<b>Figure 2-2.</b> Coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine ( $\lambda$ ) .....	12
<b>Figure 2-3.</b> Exemple mécanique du multiplicateur .....	13
<b>Figure 2-4.</b> Schéma bloc du modèle de la turbine .....	15
<b>Figure 2-5.</b> Représentation schématique des enroulements de la MAS à rotor bobiné.....	16
<b>Figure 2-6.</b> Machine asynchrone en cascade .....	23
<b>Figure 2-7.</b> Allure du couple de la MASEC.....	30
<b>Figure 2-8.</b> Allure de la vitesse de la MASEC.....	30
<b>Figure 3-1.</b> Schéma du système étudié.....	33
<b>Figure 3-2.</b> Schéma bloc du système à réguler.....	39
<b>Figure 3-3.</b> Schéma bloc du contrôle direct.....	41
<b>Figure 3-4.</b> Représentation schématique de la boucle de régulation de la puissance du stator 1.....	41
<b>Figure 3-5.</b> Système de commande à retour unitaire.....	43
<b>Figure 3-6.</b> Structure générale d'un PID.....	44
<b>Figure 3-7.</b> Allure de la puissance de référence et mesuré .....	45
<b>Figure 3-8.</b> Allure de la puissance active et réactive $P_{s2}$ et $Q_{s2}$ .....	45
<b>Figure 3-9.</b> Allure des flux.....	46
<b>Figure 3-10.</b> Allure de la vitesse.....	46
<b>Figure 3-11.</b> Allure de la puissance de référence et mesuré.....	47
<b>Figure 3-12.</b> Allure de la puissance active et réactive $P_{s2}$ et $Q_{s2}$ .....	47
<b>Figure 3-13.</b> Allure des flux .....	47
<b>Figure 3-14.</b> Allure des puissances sous le <b>PI</b> et <b>PI<sup>2</sup>D<sup>n</sup></b> .....	48

---

## Liste des tableaux

**Tableau 1-1.** Production électrique d'origine éolienne dans le monde (en TWh – térawatt-heure) .....5

**Tableau 2-1.** Grandeurs des deux machines .....25



## Listes des Acronymes et Symboles

### Acronymes

MADA	Machine Asynchrone Doublement Alimentée
MAS	Machine Asynchrone
MASEC	Machine Asynchrone en Cascade
MCC	Machine `a Courant Continu
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Ferme
PI	Proportionnel Intégrateur
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
AC	Alternating Current
DC	Direct Curent

## Symboles

$A$	Matrice des résistances de la cascade ( $\Omega$ )
$B$	Matrice des inductances propres cycliques de la cascade (H)
$C_r$	Couple résistant (N.m)
$C_e$	Couple électromagnétique de la cascade (N.m)
$C_{e1,2}$	Couples électromagnétiques des deux machines (N.m)
$C_p$	Rendement aérodynamique
$f_{1,2}$	Coefficient de frottement des deux machines (N.m.s/rd)
$f$	Coefficient de frottement total (N.m.s/rd)
$G$	Gain du multiplicateur
$i_{ds1}, i_{ds2}$	Courants des stators 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (A)
$i_{qs1}, i_{qs2}$	Courants des stators 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (A)
$i_{dr1}, i_{dr2}$	Courants des rotors 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (A)
$i_{qr1}, i_{qr2}$	Courants des rotors 01 et 02 selon le l'axe q dans le référentiel de Park (A)
$[i_s], [i_r]$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A)
$K_p$	Gain proportionnel du régulateur
$K_i$	Gain intégral du régulateur
$\alpha$	Angle électrique de décalage entre les deux stators
$\gamma$	Coefficient qui prend comme valeur 1 ou -1
$\phi_{ds1, ds2}$	Flux des stators 01 et 02 selon le l'axe d dans le référentiel de Park (Wb)
$\Omega$	Vitesse mécanique de rotation du rotor (rd/s)
$\Omega_s$	Vitesse du synchronisme (rd/s)
$\Omega_t$	Vitesse angulaire de la turbine (rd/s)
$\omega_{s1,2}$	Pulsation des grandeurs électriques des stators 01 et 02 (rd/s)
$\omega_s$	Pulsation des grandeurs électriques statoriques (rd/s)

---

# **Introduction générale**

---

## Introduction Générale

La consommation d'énergie électrique est en constante augmentation, principalement en raison de l'industrialisation à grande échelle. Les prévisions de demande énergétique dans les années à venir ne feront que confirmer, voire amplifier cette tendance, notamment compte tenu des changements démographiques et des évolutions de certaines zones géographiques, notamment en Asie.

Face à l'épuisement massive des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux provoqués par les émissions de gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces derniers, d'autres sources d'énergie alternatives ont été et doivent continuer à être développées. L'énergie renouvelable est une source d'énergie alternative pour les générations actuelles et futures.

Pour répondre aux besoins énergétiques de la société actuelle, des solutions adaptées doivent être trouvées et diversifiées. A heure actuel, il existe deux principales pistes d'action possibles. Le premier est de réduire la consommation des récepteurs d'énergie et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leur efficacité. La deuxième approche consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie verte inépuisables, facile à les exploiter d'une manière sûre et efficace.

La capacité de production d'énergies renouvelables a augmenté de 50% dans le monde en 2023, d'après un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) paru le 11 janvier 2024. Bien que cette croissance de 510 gigawatts soit un record, elle reste insuffisante pour atteindre l'objectif fixé par la COP28[1].

Dans cette situation globale, notre mémoire s'intéresse à l'étude comparatif d'une commande intelligente autrement dit avancée dédiée à l'énergie éolienne, basé sur la cascade de deux machines asynchrones couplées mécaniquement (MADA). Notre travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous aborderons tout d'abord un aperçu de l'état de l'art des commandes avancées. Quelques données illustrent l'importance et la progression historique de ce dernier. Par la suite, nous aborderons les diverses catégories d'éoliennes couramment employées et utilisée. Ensuite quelque type de commande utilisé dans les éoliennes.

Dans le deuxième chapitre, nous parleront de la modélisation de la chaine de conversion cascade de deux machines asynchrone MASEC. Nous débuterons par l'élaboration du modèle de la turbine,

---

suivie d'un bref rappel du modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné. La configuration en cascade équivaut à un couplage de deux machines, partant de ce principe, nous utiliserons les modèles de ces deux machines pour développer un modèle généralisé de la cascade [2].

Pour ce qui est du troisième chapitre nous évoquerons la gestion de puissance d'une cascade de deux machines asynchrones. Tout d'abord, nous allons élaborer une stratégie de commande qui permettra un contrôle indépendant des puissances active et réactive de MASEC. Nous allons faire ce contrôle de puissance avec des PI par la suite nous appliquerons la commande d'ordre fractionnaire au même système. Enfin nous ferons une comparaison entre les correcteur PI et  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ . [20][21].

Nous achèverons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

---

# **Chapitre 1**

## **État de l'art sur les commandes avancées**

## Chapitre 01 Etat de l'art sur la commande avancée

### 1.1. Introduction

Les énergies renouvelables jouent un rôle de plus en plus crucial dans la transition vers un avenir énergétique durable. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie éolienne se distingue comme l'une des plus prometteuses et des plus développées. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en électricité, offrant ainsi une solution propre et renouvelable pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE). En 2020 seulement, les nouvelles installations éoliennes ont représenté près de 15% des capacités de production d'électricité ajoutées dans le monde, selon le Global Wind Energy Council (GWEC)[3].

Cependant, l'efficacité et la fiabilité des parcs éoliens dépendent fortement de la qualité de leur système de contrôle. C'est là que la commande avancée entre en jeu. La commande avancée, avec ses diverses techniques, offre des moyens sophistiqués de contrôler et d'optimiser les performances des éoliennes et des parcs éoliens dans des conditions variables et dynamiques.

L'importance de la commande avancée dans le contexte de l'énergie éolienne réside dans sa capacité à améliorer la production d'énergie, à réduire les coûts opérationnels, à accroître la durabilité et à garantir la sécurité des installations. En permettant un contrôle précis et adaptable, la commande avancée maximise l'exploitation des ressources éoliennes tout en minimisant les effets néfastes sur l'environnement.

On peut en citer quelques techniques de commande avancée tel que la commande prédictive (Model Predictive Control - MPC), commande floue (Fuzzy Control), commande par retour d'état (State Feedback Control), commande tolérante aux défauts...etc.

En combinant ces techniques et en les adaptant aux spécificités des parcs éoliens, la commande avancée joue un rôle crucial dans l'exploitation efficace et durable de l'énergie éolienne, contribuant ainsi à la transition vers un avenir énergétique plus propre et plus durable.

## 1.2. Aperçu sur les différentes sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des ressources naturelles inépuisables ou régénérées à un rythme comparable à leur utilisation par l'homme. Celles-ci proviennent principalement des cinq sources d'énergie suivantes : l'eau, le vent, le soleil, la biomasse et la terre. Comme nous pouvons le constater via le graphique ci-dessous montrant l'évolution mondiale de la consommation d'énergie.

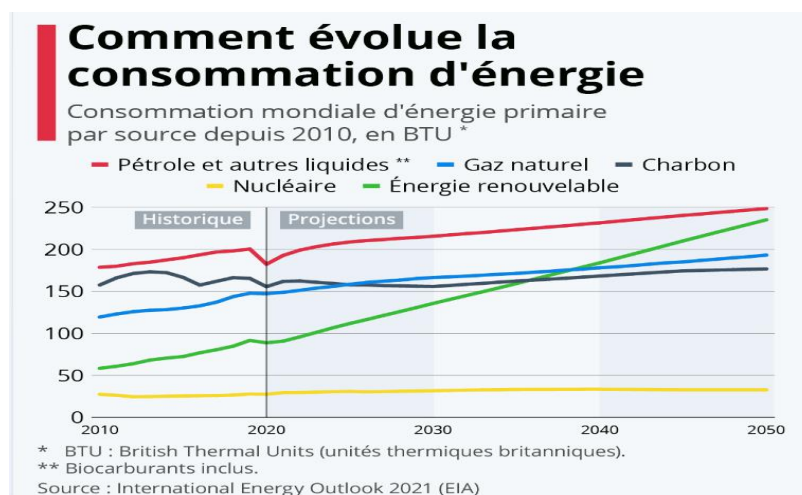


Figure 1-1. Evolution mondiale de la consommation d'énergie [4]

## 1.3. Histoire de l'éolienne

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale remonte à l'Antiquité, notamment dans la Perse ancienne. Plus récemment, depuis le Moyen Âge, certains pays ont largement utilisé cette forme d'énergie à travers les moulins à vent, tels que les moulins hollandais, ou les éoliennes américaines, que ce soit pour moudre le grain ou pomper l'eau [5]. La génération d'énergie électrique à partir du vent a commencé à la fin du XIXe siècle. Des pionniers tels que Paul La Cour au Danemark ont associé une dynamo à une éolienne dès 1891. Dans les années 1950, Johannes Juul, élève de Paul La Cour, a également contribué à l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes. Produire du courant alternatif [6].

L'essor véritable de l'éolien moderne a coïncidé avec le premier choc pétrolier de 1973, lorsque certains pays comme le Danemark, les Pays-Bas et les États-Unis ont pris conscience de l'importance de diversifier leurs sources d'approvisionnement électrique.

Aujourd'hui, les études se concentrent sur l'amélioration des éoliennes ainsi que sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes utilisaient



une génératrice asynchrone reliée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses, fonctionnait à vitesse fixe et étaient directement connectées au réseau, sans interface électronique. Les systèmes les plus récents se dirigent vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent, avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau.

## **1.4. Différents types d'éoliennes**

En matière de développement des énergies renouvelables, plusieurs types d'éoliennes sont utilisés, notamment les éoliennes verticales, offshore et horizontales. Chaque type d'éolienne a ses propres principes de fonctionnement et capacités de production électrique.

### **1.4.1. Éolienne horizontale Principe et fonctionnement**

L'éolienne horizontale est la plus couramment observée et symbolise l'énergie éolienne dans son image classique. Elle capte le vent à l'aide de pales assemblées en forme d'hélice, tournant autour d'un mât positionné horizontalement par rapport au sol, d'où son nom.

#### **1.4.1.1. Avantage et inconvénient**

Dans ce type d'éolienne, la rotation des pales actionne un générateur placé en haut de la structure. Ces éoliennes bénéficient d'un rendement élevé, particulièrement lorsqu'elles sont équipées d'un système d'orientation des pales selon la direction du vent. Elles sont appréciées pour leur robustesse et nécessitent peu d'entretien. Cependant, elles peuvent être bruyantes et leur installation peut être complexe en fonction de la hauteur du mât.

### **1.4.2. L'éolienne verticale Principe et fonctionnement**

À l'inverse, l'éolienne verticale tourne autour d'un axe vertical, captant efficacement même les vents faibles pour produire de l'électricité. Deux types d'éoliennes verticales se distinguent actuellement sur le marché :

#### **1.4.2.1 L'éolienne Darrieus**

L'éolienne Darrieus est caractérisée par un rotor en forme de H, cylindrique ou hélicoïdal, qui tourne autour d'un axe fixe. Ce type d'éolienne verticale présente plusieurs avantages, notamment sa capacité à être installée dans des zones fortement venteuses et son faible niveau de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. Cependant, elle nécessite des vents relativement forts pour démarrer et commencer à produire de l'énergie.

---

### 1.4.2.2. L'éolienne Savonius

Ce type d'éolienne se distingue par sa simplicité d'installation et son faible encombrement. Son principe repose sur deux demi-cylindres qui tournent en s'entraînant mutuellement, même avec des vents très légers. En plus de son design esthétique qui facilite son intégration, l'éolienne Savonius est particulièrement efficace avec des vents faibles, contrairement à l'éolienne Darrieus [7].

## 1.5. Production en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. (Figure 1.2)



**Figure 1-2.** Eolienne de 100 kW de grand vent, Eolienne d'Adrar

Aussi, selon une étude de la Société financière internationale (SFI) du groupe de la BM menée en collaboration avec le Conseil mondial de l'énergie éolienne (Global Wind Energy) « l'Algérie a un potentiel éolien terrestre de 7700 gigawatts (GW) », ce qui représente les plus importantes ressources d'énergie éolienne terrestre du continent africain dont le potentiel total est évalué à 59 000 GW. Sur le terrain, cependant, le continent ne représente actuellement qu'environ 1% de la capacité mondiale installée [8].

## 1.6. Production mondiale

L'énergie éolienne est développée partout dans le monde et connaît une croissance accélérée au cours des trois dernières décennies + 28 % par an en moyenne depuis 10 ans, ce qui lui donne une réelle chance d'atteindre l'objectif de tripler la capacité mondiale d'ici 2030 que les gouvernements ont fixé lors de la COP28. Chine et Etats-Unis sont les deux principaux producteurs d'électricité éolienne, tandis qu'en Europe, Allemagne et Royaume-Uni dominent le marché.

**Tableau 1-1.** Production électrique d'origine éolienne dans le monde (en TWh – térawatt-heure)

Pays	2021	2022	Evolution 2021- 2022
Chine	655,8	762,7	+16,3%
Etats-Unis	382,0	439,2	+15%
Allemagne	114,6	125,3	+9,3%
Brésil	72,3	81,6	+12,9%
Inde	68,1	70,0	+2,9%
Royaume-Uni	64,7	80,2	+24%
Espagne	62,1	62,7	+1%

## 1.7. Définition de la commande avancée

La commande avancée propose des techniques avancées de contrôle destinées à optimiser la performance, la robustesse et la stabilité des systèmes complexes. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes non linéaires, incertains et perturbé.

Ces techniques de commande avancées permettent de prendre en compte les caractéristiques spécifiques des systèmes complexes, telles que leur non-linéarité, leur incertitude et les perturbations auxquelles ils peuvent être soumis. Elles visent à améliorer la précision, la réactivité et la stabilité des systèmes, ainsi qu'à réduire les effets des perturbations externes.

La commande avancée utilise des algorithmes similaires et des modèles mathématiques complexes pour analyser et contrôler les systèmes. Elle peut impliquer l'utilisation de techniques telles que la

commande prédictive, la commande adaptative, la commande floue, la commande par mode glissant, la commande optimale.

### 1.7.1. Commande par Mode Glissant (SMC)

La commande par mode glissant est une technique de contrôle robuste qui utilise une surface de glissement pour contraindre la dynamique du système. Les avancées récentes incluent des lois de commande adaptatives pour réduire le chattering et améliorer la robustesse face aux incertitudes et perturbations externes. Les applications incluent les drones, les systèmes robotiques et les convertisseurs de puissance.

- **Avantages** : Robustesse face aux incertitudes.
- **Inconvénients** : Phénomène de chattering.
- **Applications** : Drones, robots, convertisseurs de puissance.

### 1.7.2. Commande Floue

La logique floue permet de traiter des systèmes complexes en utilisant des règles basées sur le raisonnement humain. Les récents développements intègrent des observateurs d'état flous pour estimer les variables non mesurables et améliorer la précision du contrôle. Cette méthode est efficace dans les systèmes non linéaires et incertains, avec des applications dans les véhicules autonomes et les systèmes industriels

- **Avantages** : Flexibilité et robustesse.
- **Applications** : Véhicules autonomes, systèmes industriels.

### 1.7.3. Commande par Retour d'État

Cette technique utilise des états mesurés ou estimés du système pour calculer les actions de contrôle. Les méthodes modernes combinent le retour d'état avec des techniques adaptatives et floues pour améliorer la robustesse et la performance dans les environnements dynamiques. Elle est couramment utilisée dans les systèmes robotiques et les moteurs électriques.

- **Avantages** : Précision et réactivité.
- **Applications** : Systèmes robotiques, moteurs électriques.

### 1.7.4. Commande Adaptative

La commande adaptative ajuste automatiquement ses paramètres en réponse aux changements dans la dynamique du système ou de l'environnement. Les avancées récentes incluent l'intégration avec des algorithmes de machine Learning pour une adaptation plus rapide et précise. Elle est largement utilisée dans les applications aéronautiques et les systèmes de propulsion.

- **Avantages :** Adaptabilité et performance sous conditions dynamiques.
- **Applications :** Aéronautique, systèmes de propulsion.

### 1.8. Domaine d'Application pour les Éoliennes

Les éoliennes, étant soumises à des variations rapides et imprévisibles des conditions environnementales (comme la vitesse et la direction du vent), nécessitent des systèmes de contrôle robustes et adaptatifs pour maximiser la production d'énergie et assurer la sécurité et la durabilité de l'installation. Les techniques de commande avancée permettent de :

- Maximiser la capture d'énergie éolienne.
- Réduire les charges mécaniques et prolonger la durée de vie des composants.
- Améliorer la stabilité et la sécurité opérationnelle sous des conditions de vent variables et turbulentes.
- Optimiser la réponse dynamique de l'éolienne aux variations environnementales.

En intégrant ces techniques de commande avancée, les éoliennes peuvent fonctionner de manière plus efficace et fiable, contribuant ainsi à une production d'énergie renouvelable plus stable et durable.

## 1.9. Conclusion

Les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, sont en plein essor à travers le monde grâce à des avancées technologiques significatives. En Algérie, où les conditions climatiques sont favorables, l'énergie éolienne représente une opportunité prometteuse de développement énergétique durable. Pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des éoliennes, les techniques de commande avancée telles que la commande par mode glissant (SMC) ou la commande floue, et bien d'autres sont largement utilisées. Ces innovations permettent aux éoliennes d'optimiser leur performance opérationnelle, jouant ainsi un rôle crucial dans la transition mondiale vers des sources d'énergie plus propres et durables.

# **Chapitre 2**

## **Modélisation de la chaine de conversion**

## Chapitre 02 Modélisation de la chaîne de conversion

### 2.1. Introduction

Pour étudier la commande d'un système, il est essentiel de développer un modèle mathématique adéquat qui représente fidèlement l'évolution de ses grandeurs caractéristiques. Ce chapitre se concentre sur la modélisation d'un aérogénérateur, un dispositif qui produit de l'énergie électrique en récupérant l'énergie cinétique du vent.

Nous commencerons par la modélisation de la turbine éolienne, suivie d'un rappel sur le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ensuite, nous utiliserons ces modèles pour créer une cascade généralisée, en couplant deux machines. L'avantage principal de cette cascade réside dans l'absence de contacts électriques bague-balais, rendant la structure simple, robuste et facile à construire. Le système comprend une turbine éolienne avec des pales, entraînant une cascade de deux machines asynchrones à double alimentation (MADA) via un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ .

Par ailleurs, ce chapitre abordera également la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation pour obtenir un modèle basé sur les équations du circuit, suffisant pour la synthèse de la commande dans le contexte de l'aérogénérateur. La formulation algébrique simple permet des simulations rapides tout en maintenant une précision acceptable.

### 2.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$  (figure 2.1).

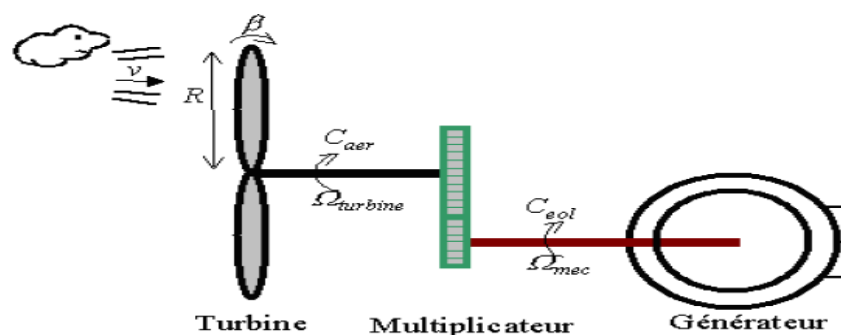


Figure 2-1. Schéma de la turbine éolienne



La puissance du vent ou puissance éolienne est définie comme suite [9]:

$$P_v = \frac{\rho \times s \times v^3}{2} \quad (2.1)$$

Où :

- $\rho$  Est la densité de l'air (1.22kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15°C).
- $s$  Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- $v$  Est la vitesse du vent.

La puissance captée par la turbine dépend du rendement aérodynamique  $C_p$  s'écrit comme suite :

$$P_{aer} = C_p \times P_{vent} \quad (2.2)$$

Le coefficient de performance ( $C_p$ ) dépend des caractéristiques de la turbine. Pour les éoliennes modernes, leurs valeurs sont comprises entre 0,45 et 0,5 [10]. Alors la puissance aérodynamique qui apparaît au niveau du rotor de la turbine s'écrit de la manière suivante :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) \times \rho S v_{vent}^3 \quad (2.3)$$

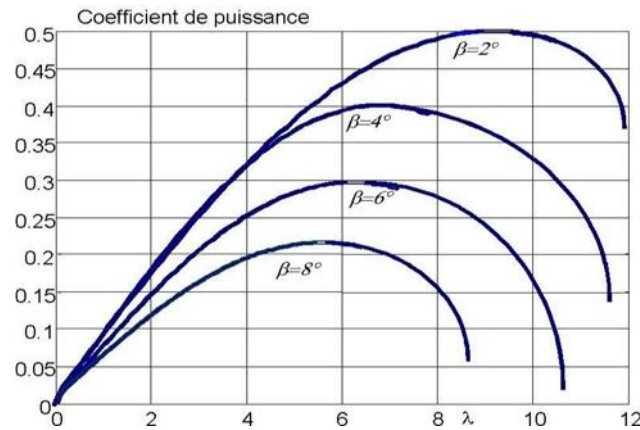
Le rapport de vitesse  $\lambda$  est défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \times R}{v} \quad (2.4)$$

Avec :

$\Omega_t$  : Vitesse angulaire de la turbine,  $R$  Rayon des pales.

Dans les cas plus généralisés La variation du coefficient de performance ( $C_p$ ) est représentée en fonction du ratio de vitesse ( $\lambda$ ) et de l'angle des pales ( $\beta$ ). La figure 2.2 représente cette variation



**Figure 2-2.** Coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction du ratio de la vitesse de la turbine ( $\lambda$ )

Chaque turbine a un comportement spécifique, ce qui implique que la modélisation du coefficient de performance ( $C_p$ ) varie d'une turbine à une autre. Pour une éolienne de 1,5 MW, le coefficient de puissance est approximé par l'équation suivante :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14 - 0.44\beta}\right) - 0.0018(\lambda - 3)\beta \quad (2.5)$$

le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho}{2} S v^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (2.6)$$

### 2.3. Multiplicateur

Un multiplicateur, également appelé boîte de vitesses ou réducteur de vitesse, est un dispositif mécanique utilisé pour adapter la vitesse de rotation d'un composant à la vitesse requise par un autre composant. Dans le contexte des éoliennes, le multiplicateur ajuste la vitesse lente de rotation de la turbine éolienne à une vitesse plus élevée adaptée à la génératrice électrique, dans le cas générale le multiplicateur est modélisé mathématiquement par des équations qui montrent comment le multiplicateur de vitesse transforme la vitesse et le couple entre la turbine et la génératrice, assurant ainsi une adaptation optimale des vitesses de rotation.



**Figure 2-3.** Exemple mécanique du multiplicateur

### 2.3.1. La vitesse

La vitesse mécanique de la turbine et de la génératrice sont liées par le gain du multiplicateur comme suit :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.7)$$

- $\Omega_t$  est la vitesse angulaire de la génératrice
- $\Omega_{mec}$  est la vitesse angulaire de la turbine
- $G$  est le rapport de multiplication (ratio du multiplicateur).

### 2.3.2. Le couple

De même pour l'équation du couple :

$$C_{arbo} = \frac{C_{aero}}{G} \quad (2.8)$$

- $C_{arbo}$  est le couple de la turbine
- $C_{aero}$  est le couple de la génératrice

**Inconvénient :**

Le multiplicateur présente des inconvénients, tel que le taux de panne élevé, des pertes énergétiques supplémentaires, un bruit acoustique parfois gênant et un encombrement important, nécessitant une maintenance régulière pour assurer leur bon fonctionnement.

**2.4. Equation dynamique de l'arbre**

La masse de la turbine éolienne est convertie en un moment d'inertie  $J_{turbine}$  sur l'arbre de la turbine, incluant la masse des pales et celle du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé prend en compte l'inertie totale  $J_{total}$ , qui est composée de l'inertie de la turbine ramenée sur le rotor de la génératrice, ainsi que de l'inertie de la génératrice elle-même.

$$J_{total} = J_g + \frac{J_{turbine}}{G_2} \quad (2.9)$$

- $J_{total}$  est le moment d'inertie total du système,
- $J_g$  est le moment d'inertie de l'arbre de la génératrice,
- $J_{turbine}$  est le moment d'inertie de la turbine,
- $G_2$  est le rapport de multiplication du multiplicateur de vitesse.

L'inertie du rotor de la génératrice est négligeable par rapport à celle de la turbine ramenée à cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor [11], la relation entre la  $V_{mer}$  et le  $C_{mer}$  est donné par :

$$C_{mec} = J_{total} \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (2.10)$$

- $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Le couple mécanique  $C_{mec}$  prend en compte le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ .

L'expression du couple mécanique total est :

$$C_{mec} = C_{arbre} - C_{em} - C_{vis} \quad (2.11)$$

Le couple du frottement visqueux est défini ainsi :

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \quad (2.12)$$

- $f$  Coefficient des frottement visqueux.

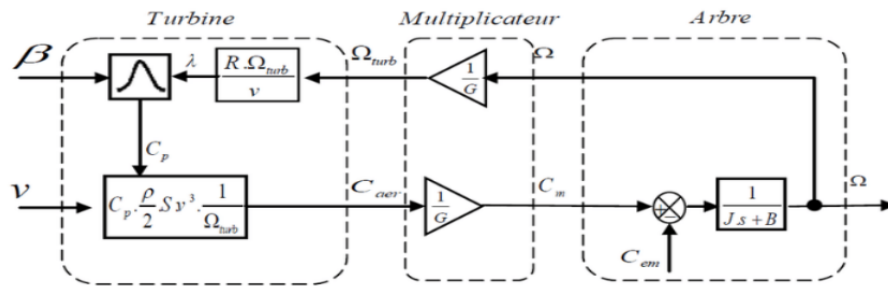


Figure 2-4. Schéma bloc du modèle de la turbine

## 2.5. Modélisation de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné

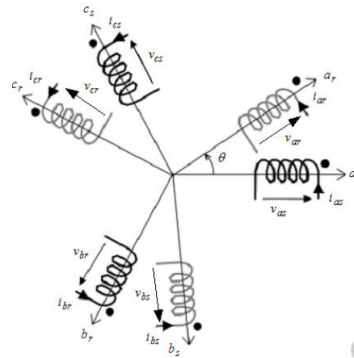
Il est essentiel de passer par la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné. En effet, la cascade est un couplage de deux machines asynchrones. De ce fait, de nombreux travaux ont mis en évidence le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [12] [13].

Ce modèle est crucial car il décrit les interactions électromécaniques et les dynamiques internes de la machine. Il prend en compte les équations de flux, de tension et de courant dans le stator et le rotor, ainsi que les équations de couple et de mouvement. Ces équations permettent de simuler le comportement de la machine sous différentes conditions de fonctionnement.

### 2.5.1. Description de la MAS

La machine asynchrone à rotor bobiné se compose de deux parties principales : le stator et le rotor. Le stator, qui représente la partie fixe de la machine (primaire), est constitué d'un circuit magnétique avec plusieurs encoches. À l'intérieur de ces encoches sont placés trois bobinages décalés de 120 degrés, à travers lesquels circulent trois courants triphasés équilibrés. Le rotor, quant à lui, constitue

la partie mobile de la machine (Secondaire). Il est formé d'un enroulement triphasé disposé de la même manière que les enroulements du stator [2].



**Figure 2-5.** Représentation schématique des enroulements de la MAS à rotor bobiné

### 2.5.2. Hypothèse de travail

Les modèles mathématiques abordés dans ce chapitre ont été établis en se basant sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est considéré comme ayant une épaisseur uniforme constante.
- L'effet d'encochage est négligé.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les résistances des enroulements sont considérées comme constantes quelle que soit la température, et l'effet de peau (effet pelliculaire) est négligé [2].

### 2.5.3. Modèle de la MAS a rotor bobiné dans le repère (abc)

Equations électriques du stator

$$[V_s] = [R_s] \times [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \quad (2.13)$$

- Equations électriques du rotor

$$[V_r] = [R_r] \times [i_r] + \frac{d}{dt} [\Psi_r] \quad (2.14)$$

- Equations magnétiques

Les hypothèses énoncées précédemment donnent lieu à une matrice d'inductance qui établit des relations linéaires entre les flux totalisés et les courants.

- Pour le stator :

$$[\Psi_s] = [L_{ss}] \times [i_s] + [M_{sr}] \times [i_r] \quad (2.15)$$

- Pour le rotor :

$$[\Psi_r] = [L_{rr}] \times [i_r] + [M_{rs}] \times [i_s] \quad (2.16)$$

- $[L_{ss}]$ : Matrice d'inductances statoriques.
- $[L_{rr}]$ : Matrice d'inductances rotoriques.
- $[M_{rs}]$ : Matrice d'inductances mutuelles stator-rotor.

Où

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix};$$

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix};$$

Les équations 2.15 et 2.16 peuvent être formulées en bloc de matrice comme suit :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Ou encore :

$$[\psi] = [L(\theta)][i] \quad (2.18)$$

$[L(\theta)]$ : la matrice inductance qui comporte 36 coefficients dont la moitié dépend du temps par l'intermédiaire de  $\theta$  (C'est la position du rotor par rapport au stator).

En substituant les matrices des flux [2.15] et [2.16] dans [2.13] et [2.14] respectivement,

On aura :

$$[V_s] = [R_s] \times [i_s] + [L_{ss}] \times \frac{d}{dt} [i_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \times [i_r]) \quad (2.19)$$

$$[V_r] = [R_r] \times [i_r] + [L_{rr}] \times \frac{d}{dt} [i_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^T \times [i_s]) \quad (2.20)$$

## 2.5.4. Modèle dynamique de la MAS à rotor bobiné dans le repère de Park

### 2.5.4.1. Définition et Principe

La transformation de Park est une méthode mathématique qui convertit les variables électriques triphasées (a, b, c) en variables diphasées ( $\alpha, \beta$ ) et ensuite en un repère tournant ( $d, q$ ). Cette transformation se compose de deux étapes :

- Transformation Triphasée-Diphasée : Convertit les grandeurs triphasées en grandeurs diphasées dans le repère fixe ( $\alpha, \beta$ ).
- Rotation : Aligne les variables diphasées avec le champ tournant du moteur, passant ainsi au repère mobile ( $d, q$ ).

### Application au Modèle Dynamique

Pour une machine asynchrone à rotor bobiné, cette transformation permet d'analyser les courants et les tensions de manière simplifiée et intuitive. Le stator est équipé d'un enroulement triphasé (a, b, c) couplé en étoile, avec le neutre isolé, éliminant ainsi les courants homopolaires. Dans le référentiel lié au champ tournant, les équations deviennent plus faciles à manipuler [2].

Equation des tensions :



$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \times i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \times \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \times i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \times \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \times i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \times i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{dr1} \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec :

$$\omega_{r1} = p_1 \times \Omega \quad \text{Et} \quad \omega_{g1} = \omega_{s1} - p_1 \times \Omega$$

**Equation des flux :**

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_{m1} i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_{m1} i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} i_{dr1} + L_{m1} i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} i_{qr1} + L_{m1} i_{qs1} \end{cases} \quad (2.22)$$

### 2.5.5. Représentation d'état de la MAS a rotor bobine

Un système multivariable peut être représenté par des équations d'état. Pour définir le vecteur d'état, plusieurs options existent. Parmi celles-ci, nous choisirons les composantes des courants statoriques et rotoriques.

En reliant les flux aux courants, nous obtenons les équations différentielles sous la forme souhaitée :

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{dr1} \\ i_{qr1} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

En développant les flux en fonction des courants, les équations différentielles peuvent être écrite comme suite :

$$[U] = [Z] \times [i] + [L] \times \frac{d[i]}{dt} \quad (2.24)$$

Avec :

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -L_s \cdot \omega_s & 0 & -L_{m1} \cdot \omega_s \\ L_s \cdot \omega_s & R_{s1} & L_{m1} \cdot \omega_s & 0 \\ 0 & -L_{m1} \cdot \omega_{g1} & R_{r1} & L_r \cdot \omega_{sg1} \\ L_{m1} \cdot \omega_{g1} & 0 & L_{r1} \cdot \omega_{g1} & R_{r1} \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} \\ L_{m1} & 0 & L_{r1} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_{r1} \end{bmatrix};$$

Où

$[Z]$ : Matrice d'impédance

$[L]$ : Matrice d'inductance

En reformulant l'équation 2.24 en termes du vecteur d'état, elle devient :

$$\frac{d[i]}{dt} = -[L]^{-1} \cdot [Z] \cdot [i] + [L]^{-1} \cdot [U] \quad (2.25)$$

Elle prend la forme suivante :

$$\frac{d[i]}{dt} = [A] \cdot [i] + [B] \cdot [U] \quad (2.26)$$

Equivalente à :

$$\dot{X} = [A] \cdot [X] + [B] \cdot [U] \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} [A] = -[L]^{-1} \cdot [Z] & \text{Matrice d'évolution d'état du système} \\ [B] = [L]^{-1} & \text{Matrice de commande du système} \end{cases}$$

## 2.6. Expression du couple de la MAS à rotor bobiné

En général, la puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques (en supposant que chaque enroulement est alimenté par une source distincte) se formule ainsi [14] :

$$P(t) = (v_{as1} \cdot i_{as1} + v_{bs1} \cdot i_{bs1} + v_{cs1} \cdot i_{cs1}) + (v_{ar1} \cdot i_{ar1} + v_{br1} \cdot i_{br1} + v_{cr1} \cdot i_{cr1}) \quad (2.28)$$

Après avoir appliqué la transformation de Park, on aura :

$$P(t) = (v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1}) + (v_{dr1} \cdot i_{dr1} + v_{qr1} \cdot i_{qr1}) \quad (2.29)$$

En utilisant l'expression des tensions fournies par l'équation 2.21, on peut écrire :

$$P(t) = \left[ R_{S1} (i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2) \right] + \left[ R_{r1} (i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2) \right] + \left[ i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right] + \left[ i_{dr1} \frac{d}{dt} \varphi_{dr1} + i_{qr1} \frac{d}{dt} \varphi_{qr1} \right] + \left[ (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) \cdot \omega_{S1} \right] + \left[ (\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - \varphi_{qr1} \cdot i_{dr1}) \cdot \omega_{g1} \right] \quad (2.30)$$

- $R_{S1} (i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2), R_{r1} (i_{dr1}^2 + i_{qr1}^2)$  : ( $P_j$ ) correspondent respectivement à la puissance dissipée en pertes par effet Joule dans les enroulements du stator et du rotor.
- $[i_{ds1} d/dt \varphi_{ds1} + i_{qs1} d/dt \varphi_{qs1}], [i_{dr1} d/dt \varphi_{dr1} + i_{qr1} d/dt \varphi_{qr1}]$  : Le terme ( $P_{mag}$ ) représentent les variations de l'énergie magnétique stockée dans les enroulements du stator et du rotor. En régime permanent, ces variations deviennent nulles.
- $[(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{S1}], [(\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1}) \cdot \omega_{g1}]$  : ( $P_{em}$ ) représentent la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la machine ou puissance électromagnétique.

On peut écrire, l'équation 2.22 comme suite :

$$i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1} = i_{dr1} \cdot \varphi_{qr1} - i_{qr1} \cdot \varphi_{dr1} \quad (2.31)$$

La puissance électromagnétique de la machine s'écrit :

$$P_{em} = \left[ (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) \cdot \omega_{S1} \right] + \left[ (\varphi_{dr1} \cdot i_{qr1} - \varphi_{qr1} \cdot i_{dr1}) \cdot \omega_{g1} \right] \quad (2.32)$$

En tenant compte de l'égalité 2.31, on aura :

$$P_{em} = (i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{r1} \quad (2.33)$$

Le couple électromagnétique est défini par :

$$C_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = p_1 \cdot \frac{P_{em}}{\omega_{r1}}$$

L'expression du couple électromagnétique :

$$C_e = p_1 (i_{qs1} \cdot \varphi_{ds1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \quad (2.34)$$

En intégrant l'égalité 2.31 avec les équations du flux 2.22, on peut réécrire l'équation du couple sous plusieurs formes :

$$C_e = p_1 \cdot L_{m1} (i_{dr1} \cdot \varphi_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qr1}) \quad (2.35)$$

Il est important de souligner que la genèse du couple électromagnétique dans la machine synchrone à aimants permanents (MAS) découle de la relation  $\omega_{s1} = \omega_{g1} + \omega_{r1}$ , communément désignée sous le nom D'autopilotage

La caractérisation du couple électromagnétique peut constituer le point initial pour développer une stratégie de la commande

## 2.6. Modélisation de la machine asynchrone en cascade

### 2.6.1. Machine asynchrone en cascade

Les machines asynchrones en cascade (MASEC) représentent une configuration avancée dans laquelle deux machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont couplées, tant électriquement que mécaniquement, pour améliorer leur performance et fiabilité. Voici une explication plus détaillée :

#### 2.6.1.1. Concept de la Cascade

La cascade, dans ce contexte, fait référence à l'interconnexion de deux machines asynchrones pour qu'elles fonctionnent de manière synchronisée. Ce concept est utilisé pour améliorer les performances globales du système, notamment en termes de rendement énergétique et de flexibilité opérationnelle [15].

#### 2.6.1.2. Couplage des Machines

➤ **Électrique :**

Le couplage électrique implique que les deux machines partagent des courants et des tensions via leurs circuits électriques respectifs. Ce transfert d'énergie optimise l'efficacité énergétique du système.

➤ **Mécanique :**

Le couplage mécanique se réalise en reliant physiquement les rotors des deux machines. Cette connexion permet de synchroniser les vitesses de rotation des rotors, assurant une transmission fluide et coordonnée de l'énergie mécanique entre les deux machines.

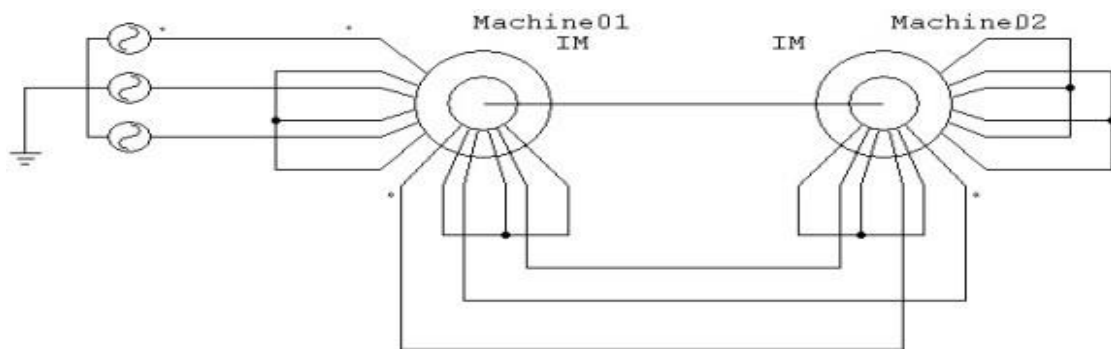
### 2.6.1.3. Élimination des Bagues et Balais

Les MADA traditionnelles utilisent des bagues et des balais pour permettre le transfert de courant entre les parties stationnaires et rotatives de la machine. Cependant, ces composants sont sujets à l'usure, réduisant ainsi la fiabilité et augmentant les besoins de maintenance[16].

En couplant deux MADA en cascade :

- Les contacts glissants (bagues et balais) peuvent être éliminés.
- Cela accroît la robustesse du système et réduit les besoins de maintenance, car il n'y a plus de pièces sujettes à l'usure mécanique due aux contacts glissants.

La cascade de machines asynchrones en configuration MASEC offre des avantages significatifs en termes de fiabilité, de maintenance réduite et de performances améliorées. Cette approche innovante permet de surmonter les limitations des MADA traditionnelles et ouvre de nouvelles perspectives dans divers secteurs industriels et énergétiques. La figure 2.5 illustre ce couplage.



**Figure 2-6.** Machine asynchrone en cascade

### 2.6.2. Modèle de la cascade

La méthode d'analyse repose sur l'emploi de la transformation de Park. Les équations des tensions et des flux pour les deux machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont exprimées avec :

#### La première machine

- Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \times i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \times \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \times i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \times \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \times i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \cdot \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \times i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{dr1} \end{cases} \quad (2.36)$$

- Les équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_{m1} i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_{m1} i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} i_{dr1} + L_{m1} i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} i_{qr1} + L_{m1} i_{qs1} \end{cases} \quad (2.37)$$

#### La deuxième machine :

- Equations des tensions

$$\begin{cases} v_{dr2} = R_{r2} \times i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - (\omega_{s1} \times \varphi_{r1}) \times \varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r0} \times i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{dr2} \\ v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \gamma\omega_{r2}) \times \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \gamma\omega_{r2}) \times \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (2.38)$$

- Les équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_{m2}i_{dr2} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_{m2}i_{qr2} \\ \varphi_{dr2} = L_{r2}i_{dr2} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = L_{r2}i_{qr2} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (2.39)$$

Les grandeurs des deux MADAs, issues des équations réf 2.1 et 2.38 sont regroupées dans le tableau ci-dessous pour  $\gamma = 1$  :

**Tableau 2-1.** Grandeurs des deux machines

	Couplage inverse $\gamma = 1$
$\omega_{s1}$	$2\pi f$
$\omega_{g1}$	$\omega_{s1} - p_1\Omega$
$\omega_{g2}$	$\omega_{s1} - p_1\Omega$
$\omega_{s2}$	$\omega_{s1} - \Omega(p_1 + p_2)$
$\Omega$	$\frac{60f}{p_1 + p_2}$

Avec :

- $\omega_{s1}$  Pulsation statorique de la MADA 1
- $\omega_{g1}$  Pulsation rotorique de la MADA 1
- $\omega_{g2}$  Pulsation statorique de la MADA 2
- $\omega_{s2}$  Pulsation rotorique de la MADA 2
- $\Omega$  Vitesse mécanique du synchronisme de l'arbre commun
- $p_1$  Nombre de pair de pole de la MADA 1
- $p_2$  Nombre de pair de pole de la MADA 2

La modélisation du couplage électrique des deux rotors est conditionnée par le type de couplage utilisé, ce qui influencera les équations des tensions et des courants seront :

$$\begin{cases} V_{dr1} = \gamma V_{dr2} = V_{dr} & i_{dr1} = -\gamma V_{dr2} = i_{dr} \\ V_{qr1} = \gamma V_{qr2} = V_{qr} & i_{qr1} = -\gamma V_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \quad (2.40)$$

On pose :

$$L_r = L_{r1} + L_{r2}, R_r = R_{r1} + R_{r2}$$

En intégrant les équations des flux 2.37 et 2.39 dans les équations des tensions 2.36 et 2.38, en fonction de la valeur de  $\gamma$ , et en incorporant les équations 2.40, le système initial de 8 équations se simplifie à 6 équations. On aura alors :

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} \times i_{ds1} + L_{s1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \cdot L_{s1} \cdot i_{qs1} + L_{m1} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{s1} L_{m1} i_{qr} \\ v_{qs1} = R_{s1} \times i_{qs1} + L_{s1} \frac{di_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \cdot L_{s1} \cdot i_{ds1} + \omega_{s1} \cdot L_{m1} \cdot i_{dr} + L_{m1} \frac{di_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r \times i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_{g1} \cdot L_r \cdot i_{qr} + L_{m1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_{g1} \cdot L_{m1} \cdot i_{qs1} - \gamma L_{m2} \frac{di_{ds2}}{dt} + \gamma \omega_{g2} \cdot L_{m2} \cdot i_{qs2} \\ 0 = R_r \times i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_{g1} \cdot L_r \cdot i_{dr} + L_{m1} \omega_{g1} i_{ds1} + L_{m1} \frac{di_{qs1}}{dt} - \gamma \omega_{g1} \cdot L_{m2} \cdot i_{ds2} - \gamma L_{m2} \frac{di_{qs2}}{dt} \\ v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} + L_{s2} \frac{di_{ds2}}{dt} - \omega_{s2} \cdot L_{s2} \cdot i_{qs2} + \gamma L_{m2} \frac{di_{dr}}{dt} - \gamma \omega_{s2} L_{m2} i_{qr} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} + L_{s2} \frac{di_{qs2}}{dt} + \omega_{s2} \cdot L_{s2} \cdot i_{ds2} + \gamma \cdot \omega_{s2} \cdot L_{m2} \cdot i_{dr} + \gamma L_{m2} \frac{di_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.41)$$

Il peut être résumé de la sorte :

$$[U] = [Z] \times [i] + [L] \cdot \frac{d[i]}{dt} \quad (2.42)$$

Où :

[U], [i] Vecteur des tensions et courants respectivement dans le repère de Park

Avec



$$[Z] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_{s1}L_m & 0 & -\omega_{s1}L_{m1} & 0 & 0 \\ \omega_{s1}L_{s1} & R_{s1} & \omega_{s1}L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_{g1}L_{m1} & R_r & -\omega_{g1}L_r & 0 & \gamma\omega_{g1}L_{m2} \\ \omega_{g1}L_{m1} & 0 & \omega_{g1}L_r & R_r & -\gamma\omega_{g1}L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma L_{m2}\omega_{s2} & R_{s2} & -L_{s2}\omega_{s2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m2}\omega_{s2} & 0 & L_{s2}\omega_{s2} & R_{s2} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Et :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m1} & 0 & L_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

La décomposition de la matrice  $Z$ , s'écrit ainsi :

$$Z = A + \omega_{s1}B + \omega_{r1}C + \omega_{r2}D$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & -L_{s1} & 0 & -L_{m1} & 0 & 0 \\ L_{s1} & 0 & L_{m1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_{m1} & 0 & -L_r & 0 & \gamma L_{m2} \\ L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma L_{m2} & 0 & -L_{s2} \\ 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{m1} & 0 & L_r & 0 & -\gamma L_{m2} \\ -L_{m1} & 0 & -L_r & 0 & \gamma L_{m2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma L_{m2} & 0 & L_{s2} \\ 0 & 0 & \gamma L_{m2} & 0 & -L_{s2} & 0 \end{bmatrix} \text{ et } D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{m2} & 0 & \gamma L_{s2} \\ 0 & 0 & L_{m2} & 0 & -\gamma L_{s2} & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.6.3. Expression du couple électromagnétique de la cascade

La puissance instantanée absorbée par la cascade s'écrit de la sorte :

$$P(t) = (v_{as1} \cdot i_{as1} + v_{bs1} \cdot i_{bs1} + v_{cs1} \cdot i_{cs1}) + (v_{as2} \cdot i_{as2} + v_{bs2} \cdot i_{bs2} + v_{cs2} \cdot i_{cs2}) \quad (2.45)$$

On applique la transformation de Park, on obtient :

$$P(t) = (v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1}) + (v_{ds2} \cdot i_{ds2} + v_{qs2} \cdot i_{qs2}) \quad (2.46)$$

En intégrant les expressions des tensions données par 2.36 et 2.38, on aura :

$$P(t) = \left[ R_{s1} (i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2) \right] + \left[ R_{s2} (i_{ds2}^2 + i_{qs2}^2) \right] + \left[ i_{ds1} \frac{d}{dt} \varphi_{ds1} + i_{qs1} \frac{d}{dt} \varphi_{qs1} \right] + \left[ i_{ds2} \frac{d}{dt} \varphi_{ds2} + i_{qs2} \frac{d}{dt} \varphi_{qs2} \right] + \left[ (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) \cdot \omega_{s1} \right] + \left[ (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \cdot \omega_{s2} \right] \quad (2.47)$$

Où

- $[R_{s1}(i_{ds1}^2 + i_{qs1}^2)], [R_{s2}(i_{ds2}^2 + i_{qs2}^2)]$  : ( $p_j$ ) représentent les puissances dissipées en pertes par effet Joule.
- $[i_{ds1} d/dt \varphi_{ds1} + i_{qs1} d/dt \varphi_{qs1}], [i_{ds2} d/dt \varphi_{ds2} + i_{qs2} d/dt \varphi_{qs2}]$  : ( $P_{mag}$ ) Représentent respectivement les variations de l'énergie magnétique emmagasinée. Elles s'annulent en régime établi.
- $[(\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - i_{ds1} \cdot \varphi_{qs1}) \cdot \omega_{s1}], [(\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - i_{ds2} \cdot \varphi_{qs2}) \cdot \omega_{s2}]$  : ( $P_{em}$ ) Représentent la puissance électrique transformée en puissance mécanique à l'intérieur de la cascade.

La puissance électromagnétique de la cascade s'écrit

$$P_{em} = (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) \cdot \omega_{s1} + (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \cdot \omega_{s2} \quad (2.48)$$

Puisque le couple électromagnétique total est égal à la somme des couples des deux machines alors :

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} = \frac{P_{em1}}{\Omega_{s1}} + \frac{P_{em2}}{\Omega_{s2}} \quad (2.49)$$

Avec :

$$P_{em1} = (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) \cdot \omega_{s1} \quad (2.50)$$

Et

$$P_{em2} = (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \cdot \omega_{s2} \quad (2.51)$$

Le couple électromagnétique

$$C_e = p_1 \cdot \frac{P_{em1}}{\omega_{s1}} + p_2 \cdot \frac{P_{em2}}{\omega_{s2}} \quad (2.52)$$

Donc on aura l'expression du couple électromagnétique en fonction des courants et des flux :

$$C_e = p_1 (\varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} - \varphi_{qs1} \cdot i_{ds1}) + p_2 (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \quad (2.53)$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{ds1}$ ,  $\varphi_{qs1}$ ,  $\varphi_{ds2}$ ,  $\varphi_{qs2}$ ) données par 2.37 et 2.53, on aura :

$$C_e = p_1 L_{m1} (i_{qs1} \cdot i_{dr1} - i_{qr1} \cdot i_{ds1}) + p_2 L_{m2} (i_{qs2} \cdot i_{dr2} - i_{qr2} \cdot i_{ds2}) \quad (2.54)$$

En supposant que nous avons deux machines identiques, ce qui signifie que  $p_1=p_2=p$  et  $L_{m1}=L_{m2}=L_m$ , en substituant les courants ( $i_{dr1}$ ,  $i_{qr1}$ ,  $i_{dr2}$ ,  $i_{qr2}$ ) fournis par l'équation 2.40 dans l'équation du couple 2.54, nous obtenons :

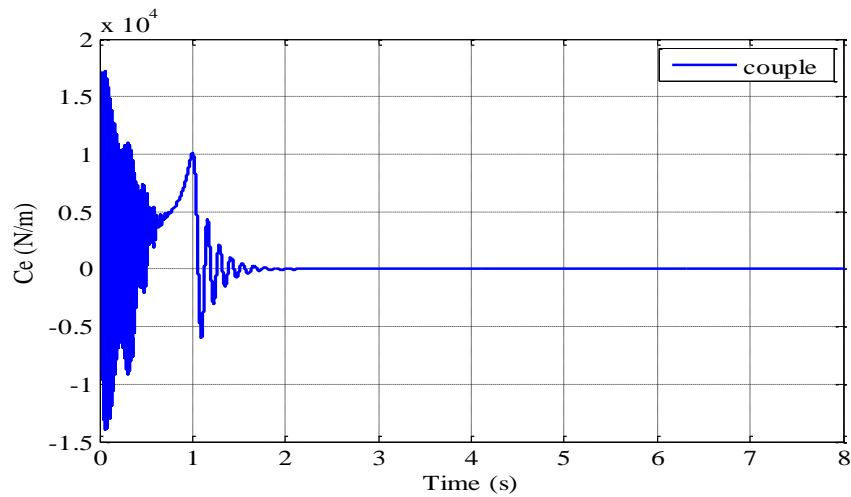
**Pour la cascade :**

$$C_e = p L_m [i_{dr} (i_{qs1} - i_{qs2}) - i_{qr1} (i_{ds1} - i_{ds2})] \quad (2.55)$$

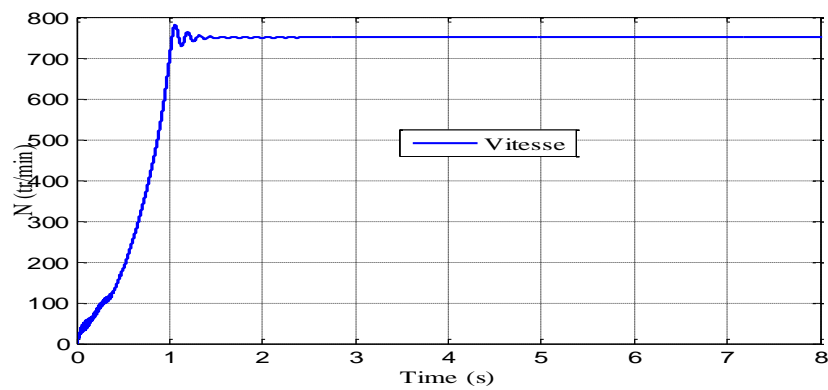
## 2.7. Résultat de simulation

En utilisant MATLAB, nous allons simuler une machine asynchrone à double alimentation (MADA) en configuration de cascade. Le modèle repose sur les équations dérivées de la transformation de Park, relative au champ tournant. Les résultats affichés dans les figures suivantes correspondent à une cascade de puissance de 1,5 MW.

Les figures illustrent les résultats obtenus pour le modèle MASEC, qui est alimenté directement par une source de tension triphasée idéale au niveau du stator, avec une fréquence de réseau de 50 Hz.



**Figure 2-7.** Allure du couple de la MASEC



**Figure 2-8.** Allure de la vitesse de la MASEC

Nous avons observé qu'en régime permanent, la vitesse augmente et se stabilise autour de 750 tr/min. Cela est dû à l'introduction du couple résistant. Après une période de  $t = 2$  s, la vitesse atteint une valeur stable.

## 2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le modèle de la machine asynchrone doublement alimentée (MADA) en utilisant le repère de Park. Sur cette base, nous avons élaboré un modèle en cascade pour deux machines asynchrones, en prenant en compte certaines hypothèses simplificatrices nécessaires.

L'objectif principal de cette modélisation était de développer un modèle précis et fiable, adapté à la commande de la machine. Cette approche permet d'optimiser la performance et la stabilité de la MADA, facilitant ainsi son intégration dans diverses applications industrielles.

**Chapitre 3**  
**Commande fractionnaire d'une**  
**MASEC dédiée à l'éolien**

## Chapitre 03 Commande fractionnaire d'une MASEC dédiée à l'éolien

### 2.7. Introduction

Le générateur éolien étudié dans ce chapitre est basé sur une cascade de deux machines asynchrones double alimentées (MADA) avec un rapport de transformation  $\gamma = 1$ . Le stator de la première machine est directement raccordé au réseau électrique, tandis que le stator de la seconde machine est connecté au réseau via un convertisseur de fréquence. D'abord, nous élaborons le modèle de commande permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive de la MASEC. Ensuite, nous développons les équations régissant le couplage de la MASEC au réseau. Enfin, nous intégrons une éolienne dans un réseau utilisant la MASEC.

### 3.2. Description du système étudié

Le premier stator de MASEC est connecté directement au réseau, tandis que le deuxième stator y'est raccordé par l'intermédiaire d'un convertisseur de fréquence. L'objectif est de contrôler les puissances active et réactive transitant par le stator 1. Lorsque la puissance aérodynamique de la turbine dépasse la capacité admissible du stator 1, un second chemin est créé via le stator 2 pour éviter la surcharge du stator 1, permettant ainsi de fournir au réseau la puissance maximale possible [17].

Afin de contrôler la production d'électricité de l'éolienne, nous mettrons en œuvre une commande permettant de réguler de manière indépendante les puissances active et réactive du stator 1. Pour ce faire, nous établirons les équations reliant les tensions du stator 2, générées par le convertisseur de fréquence, aux puissances active et réactive du stator 1. Le système à analyser est illustré à la figure 3.1[2].

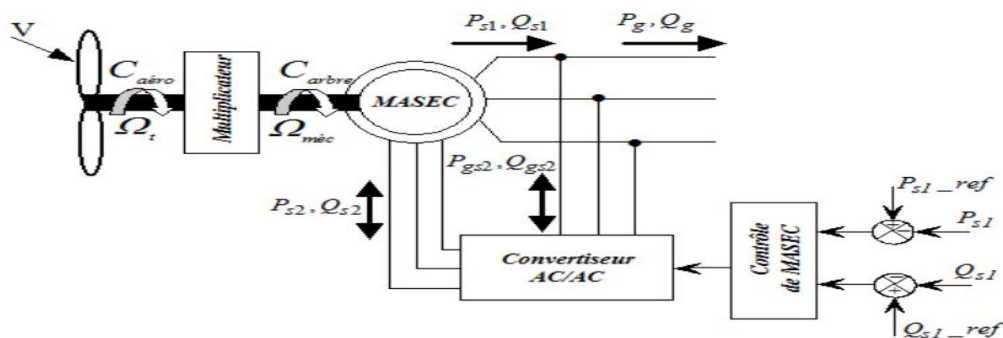


Figure 3-1. Schéma du système étudié

Les équations des tensions de la cascade sont obtenues en substituant la valeur de  $\gamma = 1$  dans les systèmes d'équations (2.38) et (2.40) :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ds1} = R_{s1} \times i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1} \times \varphi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} \times i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1} \times \varphi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1} \times i_{dr1} + \frac{d\varphi_{dr1}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1} \times i_{qr1} + \frac{d\varphi_{qr1}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{dr1} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dr2} = R_{r2} \times i_{dr2} + \frac{d\varphi_{dr2}}{dt} - (\omega_{s1} \times \varphi_{r1}) \times \varphi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2} \times i_{qr2} + \frac{d\varphi_{qr2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1}) \times \varphi_{dr2} \\ v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}) \times \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + (\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}) \times \varphi_{ds2} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Dans les systèmes équations des flux (2.37) et (2.39), on remplace la valeur de  $\gamma = 1$  et on exprime les courants  $i_{dr1}, i_{qr1}, i_{dr2}, i_{qr2}$  en fonction des courants  $i_{dr}$  et  $i_{qr}$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + L_{m1} i_{dr1} \\ \varphi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + L_{m1} i_{qr1} \\ \varphi_{dr1} = L_{r1} i_{dr1} + L_{m1} i_{ds1} \\ \varphi_{qr1} = L_{r1} i_{qr1} + L_{m1} i_{qs1} \end{array} \right. \quad (3.3)$$



$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} - L_{m2}i_{dr2} \\ \varphi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} - L_{m2}i_{qr2} \\ \varphi_{dr2} = -L_{r2}i_{dr2} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr2} = -L_{r2}i_{qr2} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (3.4)$$

En introduisant les équations du couplage électrique des deux rotors, on aura :

$$\begin{cases} V_{dr1} = V_{dr2} = V_{dr} & i_{dr1} = -V_{dr2} = i_{dr} \\ V_{qr1} = V_{qr2} = V_{qr} & i_{qr1} = -V_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \quad (3.5)$$

Les puissances actives et réactives du stator 01 et du stator 2 sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{ds1} \cdot i_{ds1} + v_{qs1} \cdot i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1} \cdot i_{ds1} + v_{ds1} \cdot i_{qs1} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} P_{s2} = v_{ds2} \cdot i_{ds2} + v_{qs2} \cdot i_{qs2} \\ Q_{s2} = v_{qs2} \cdot i_{ds2} + v_{ds2} \cdot i_{qs2} \end{cases} \quad (3.7)$$

Les puissances active et réactive du réseau s'expriment :

$$\begin{cases} P_g = P_{s1} + P_{s2} \\ Q_g = Q_{s1} + Q_{s2} \end{cases} \quad (3.8)$$

### 3.3. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances du stator 1

Pour réaliser le découplage des puissances de la MASEC (machines asynchrones en cascade) et obtenir un contrôle indépendant de la puissance, nous suivons un ensemble d'étapes précises. L'une des premières étapes cruciales consiste à orienter le repère ( $dq$ ) de manière à aligner l'axe  $d$  sur le flux du premier stator  $\phi_{s1}$ . Cette orientation est stratégique car elle simplifie à la fois le modèle mathématique de la MASEC et le dispositif de commande associé.

En procédant ainsi, le flux du premier stator le long de l'axe q devient nul, ce qui facilite le découplage des composants de flux et de couple. Cette simplification permet d'obtenir des équations plus maniables et de mettre en œuvre des stratégies de commande plus efficaces [18].

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} \\ \varphi_{qs1} = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Nous pouvons simplifier les équations des flux comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{ds1} = \varphi_{s1} = L_{s1}i_{ds1} + L_{m1}i_{dr} \\ \varphi_{qs1} = 0 = L_{s1}i_{qs1} + L_{m1}i_{qr} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les courants du stator 1 en fonction des courants du rotor sont :

$$\begin{cases} i_{ds1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{dr} + \frac{1}{L_{s1}}\varphi_{s1} \\ i_{qs1} = -\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{qr} \end{cases} \quad (3.11)$$

L'équation du couple électromagnétique aura la forme suivante :

$$C_e = p_1 \cdot \varphi_{ds1} \cdot i_{qs1} + p_2 (\varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \quad (3.12)$$

En supposant que nous avons deux machines identiques, ce qui signifie que  $p_1=p_2=p$ , le couple devient :

$$C_e = p (\varphi_{s1} \cdot i_{qs1} + \varphi_{ds2} \cdot i_{qs2} - \varphi_{qs2} \cdot i_{ds2}) \quad (3.13)$$

En supposant que le réseau électrique est stable avec une tension simple  $V_s$ , cela entraîne un flux statorique  $\phi_{s1}$  constant. De plus, si nous négligeons la résistance des enroulements du stator 1 ( $R_{s1}=0$ ), hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées dans la production éolienne, les équations de tension du stator 1 se simplifient à :

$$\begin{cases} V_{ds1} = 0 \\ V_{qs1} = V_s = \omega_{s1} \cdot \varphi_{s1} \end{cases} \quad (3.14)$$

Étant donné que les enroulements des rotors sont couplés électriquement, l'égalité suivante s'appliquera comme suite :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_{r1}i_{dr} + L_{m1}i_{ds1} = -L_{r2}i_{dr} + L_{m2}i_{ds2} \\ \varphi_{qr} = L_{r1}i_{qr} + L_{m1}i_{qs1} = -L_{r2}i_{qr} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (3.15)$$

On pose :

$$C = \frac{L_{m2}}{L_{r1} + L_{r2} - \frac{L_{m1}^2}{L_{s1}}}$$

En substituant les courants de l'équation 3.11 dans l'égalité 3.15, on obtient :

$$\begin{cases} i_{dr} = C.i_{ds2} - C.\frac{L_{m1}.V_s}{\omega_{s1}.L_{s1}L_{m2}} \\ i_{qr} = C.i_{qs2} \end{cases} \quad (3.16)$$

D'après les équations 3.11 et 3.15, nous pouvons formuler les relations qui lient les courants des stators 1 et 2 comme suite :

$$\begin{cases} i_{ds1} = \frac{V_s}{\omega_s.L_{s1}} \left( 1 + \frac{C.L_{m1}^2}{L_{s1}L_{m2}} \right) - C.\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{ds2} \\ i_{qs1} = -C.\frac{L_{m1}}{L_{s1}}i_{qs2} \end{cases} \quad (3.17)$$

Avec

$$\varphi_{s1} = \frac{v_{qs1}}{\omega_{s1}}$$

On définit les glissements suivants :  $S_1 = \frac{\omega_{s1} - p_1\Omega}{\omega_{s1}}$  ;  $S_2 = \frac{S_1.\omega_{s1} - p_2\Omega}{S_1.\omega_{s1}}$

Le glissement total de la MASEC devient :

$$S = S_1.S_2 = \frac{\omega_{s1} - \omega_{r1} - \omega_{r2}}{\omega_{s1}} = \frac{\omega_{s1} - \Omega(p_1 + p_2)}{\omega_{s1}} \quad (3.18)$$

Sachant que :

$$\omega_{s2} = s.\omega_{s1}$$

### 3.4.1. Relation entre la tension du deuxième stator et son courant

On remplace l'équation 3.16 dans 3.4, le flux du deuxième stator devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds2} = (L_{s2} - L_{m2} \cdot C) i_{ds2} + \frac{L_{m1}}{L_{s1} \cdot \omega_{s1}} C \cdot V_s \\ \varphi_{qs2} = (L_{s2} - L_{m2} \cdot C) i_{qs2} \end{cases} \quad (3.19)$$

Sachant que :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_{s1} \times s \times \varphi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + s \times \omega_{s1} \times \varphi_{ds2} \end{cases} \quad (3.20)$$

On remplace les flux 3.19, dans les expressions des tensions du deuxième stator 3.20, on aura

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{ds2}}{dt} - \omega_{s1} \times s \times (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} + (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) \frac{di_{qs2}}{dt} - \omega_{s1} \times s \times (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{ds2} + C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \end{cases} \quad (3.21)$$

En régime permanent, les termes incluant les dérivés des courants du stator 2 disparaissent. Par conséquent, nous pouvons formuler les équations comme suite :

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2} \times i_{ds2} - \omega_{s1} \times s \times (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} \times i_{qs2} - \omega_{s1} \times s \times (L_{s2} - C \cdot L_{m2}) i_{ds2} + C \cdot s \frac{L_{m1} \cdot V_s}{L_{s1}} \end{cases} \quad (3.22)$$

Les composantes diphasées des tensions du deuxième stator,  $v_{ds2}$  et  $v_{qs2}$ , sont utilisées pour définir les courants  $i_{ds2}$  et  $i_{qs2}$  souhaités dans la machine. Les termes de couplage entre les deux axes, comme,  $s \cdot \omega_{s1} (L_{s2} - C \cdot L_{m2})$ , ont une influence négligeable. Une conception appropriée des régulateurs dans la boucle de commande permettra de compenser ces effets efficacement. Cependant, le terme  $C \cdot s \left( \frac{L_{m1} V_s}{L_{s1}} \right)$  représente une force électromotrice liée à la vitesse de rotation, et son impact est significatif car il introduit une erreur de traînage. Par conséquent, le système de contrôle doit prendre en compte cette erreur pour assurer une performance optimale [2].

### 3.4.2. Relation entre la puissance du premier stator et le courant du deuxième stator

Les puissances active et réactive du premier stator, deviendront après simplification 3.14 :

$$\begin{cases} P_{s1} = v_{ds1} \cdot i_{ds1} = v_s \cdot i_{qs1} \\ Q_{s1} = v_{qs1} \cdot i_{ds1} = v_s \cdot i_{ds1} \end{cases} \quad (3.23)$$

En substituant l'équation 3.17 dans 3.23 et en approximant  $\varphi_{s1}$  par  $V_s/\omega_{s1}$ , les expressions des puissances active et réactive respectivement  $P_{s1}$  et  $Q_{s1}$ , deviennent :

$$\begin{cases} P_{s1} = -C \cdot s V_s \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} \cdot i_{qs2} \\ Q_{s1} = \frac{V_s^2}{\omega_{s1} \cdot L_{s1}} \left( 1 + \frac{C \cdot L_{m1}^2}{L_{s1} \cdot L_{m2}} \right) - C \cdot V_s \cdot \frac{L_{m1}}{L_{s1}} \cdot i_{ds2} \end{cases} \quad (3.24)$$

Le schéma bloc du système électrique à réguler, dérivé des équations 3.21 et 3.24, est illustré à la figure 3.2

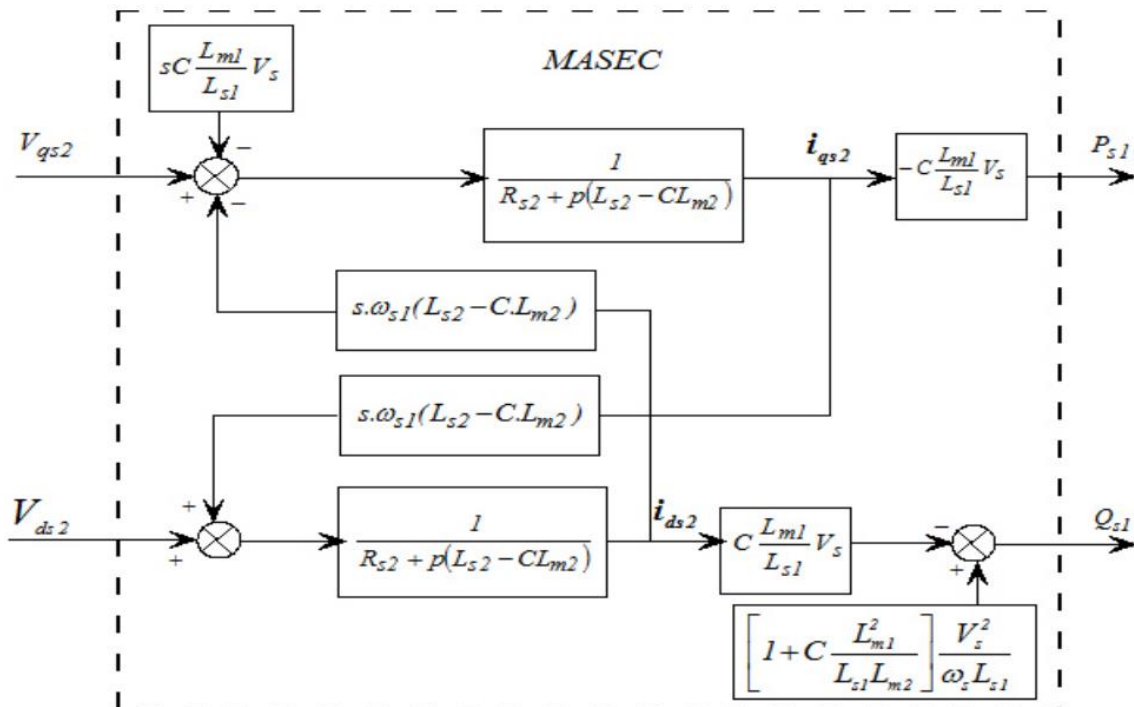


Figure 3-2. Schéma bloc du système à réguler

### 3.5. Contrôle direct des puissances

On observe que les puissances active et réactive du premier stator ainsi que les tensions du deuxième stator sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. En raison de la faible valeur du glissement  $S$ , il est possible de mettre en œuvre une commande vectorielle directe sans difficulté. En effet, les influences des couplages restent faibles, ce qui permet de contrôler les axes  $d$  et  $q$  séparément à l'aide de leurs propres régulateurs [19].

#### Explications et Détails :

##### 1. Commande Vectorielle Directe :

- **Faible Glissement :** Le faible glissement  $S$  signifie que la différence de vitesse entre le rotor et le champ magnétique statorique est minime, ce qui simplifie la commande.
- **Axes  $d$  et  $q$  :** La faible influence des couplages permet de commander indépendamment les composantes des courants sur les axes  $d$  et  $q$

##### 2. Régulateurs :

- **Axe  $q$  :** La grandeur de référence pour l'axe  $q$  du stator 1 est la puissance active.
- **Axe  $d$  :** La grandeur de référence pour l'axe  $d$  du stator 1 est la puissance réactive. La consigne de la puissance réactive est maintenue à zéro pour assurer un facteur de puissance unitaire, optimisant ainsi le rendement énergétique [2].

##### 3. Réseau Stable :

- La machine étant connectée à un réseau stable, la tension  $V_s$  est constante. Cela simplifie encore plus la régulation, car chaque axe peut être géré par un régulateur unique.

##### 4. Schéma Bloc :

- Le schéma bloc détaillant cette configuration est illustré à la figure 3.3. Ce schéma montre comment les régulateurs sont configurés pour gérer indépendamment les axes  $d$  et  $q$



La fonction de transfert on boucle ouverte (**FTBO**) est :

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p} \frac{C.L_{m1}.V_s}{L_{s1}.(L_{s2} - C.L_{m2})}}{\frac{P}{K_p} \frac{R_{s2}}{L_{s2} - C.L_{m2}}} \quad (3.25)$$

Nous optons pour la méthode de compensation des pôles dans la conception du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Cela se traduit par l'égalité 3.26:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{s2}}{L_{s2} - C.L_{m2}} \quad (3.26)$$

Cependant, il est important de noter que la compensation des pôles est seulement bénéfique lorsque les paramètres de la machine sont connus avec précision, car les gains des correcteurs dépendent de ces paramètres. En l'absence de cette précision, la performance de la compensation peut être compromise.

Si la compensation est réalisée, elle conduit à la fonction de transfert en boucle fermée (**FTBF**) suivante :

$$FTBF = \frac{1}{1 + P \frac{L_{s1}(L_{s2} - C.L_{m2})}{K_p.C.L_{m1}.V_s}} \quad (3.27)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée sous la forme :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r.P} \quad (3.28)$$

D'où

$$\tau_r = L_{s1} \frac{L_{s2} - C.L_{m2}}{K_p.C.L_{m1}.V_s}$$

Et

$\tau_r$  : constante de temps

On peut exprimer désormais les gains des correcteurs  $K_p$  et  $K_i$  respectivement en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse  $\tau_r$  comme suite :



$$K_p = L_{s1} \frac{L_{s2} - C \cdot L_{m2}}{\tau_r \cdot C \cdot L_{m1} \cdot V_s} \quad (3.29)$$

Et

$$K_i = K_p \frac{R_{s2}}{L_{s2} - C \cdot L_{m2}} = \frac{R_{s2} \cdot L_{s1}}{\tau_r \cdot C \cdot L_{m1} \cdot V_s} \quad (3.30)$$

### 3.7. Correcteur PID classique [19]

Le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), également connu sous le nom de régulateur PID, est un système de contrôle qui vise à améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire d'un système ou d'un procédé en boucle fermée. Il s'agit du régulateur le plus employé dans le secteur industriel, où ses capacités de correction sont appliquées à de nombreuses grandeurs physiques.

Le correcteur PID traditionnel est utilisé dans des systèmes de commande traditionnels à retour unitaire, comme indiqué par la figure 3.5 :

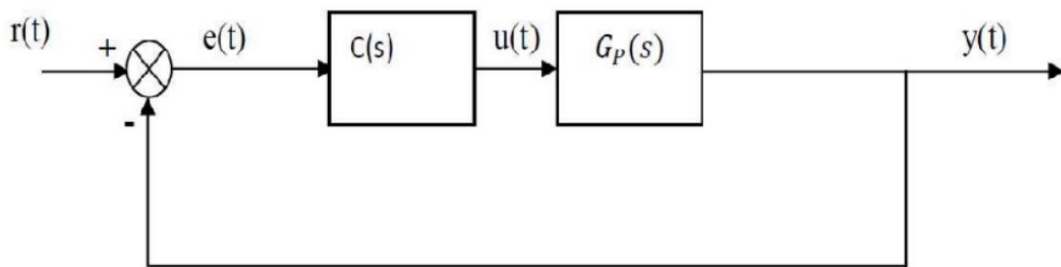


Figure 3-5. Système de commande à retour unitaire

Où :

- **u(t)** : signal de commande.
- **e(t)** : écart résultant de la différence entre la consigne r(t) et y(t) .
- **y(t)** : grandeur à commander.
- **C (s)** : fonction de transfert du correcteur.
- **Gp(s)** : fonction de transfert de système.

Le comportement du correcteur proportionnel intégral dérivé (PID) classique est décrit par l'équation suivante 3.31 :

$$U(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.31)$$

- $u(t)$  est la sortie du correcteur
- $e(t)$  est l'erreur
- $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sont les gains proportionnels, intégral et dérivé
- $\lambda$  et  $\mu$  sont les ordres fractionnaires de l'intégration et de la dérivation, respectivement.

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (3.31) avec les conditions initiales nulles la fonction de transfert de ce correcteur peut être exprimé par 3.32 :

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (3.32)$$

### 3.7.1. Structure du PID

Trois termes composent le contrôleur PID : le contrôle proportionnel, intégral et dérivé. La combinaison de ces trois contrôleurs offre une approche de contrôle pour superviser les processus, les variables de processus telles que la pression, la vitesse, la température, le débit, etc. sont gérées par le contrôleur PID [20].

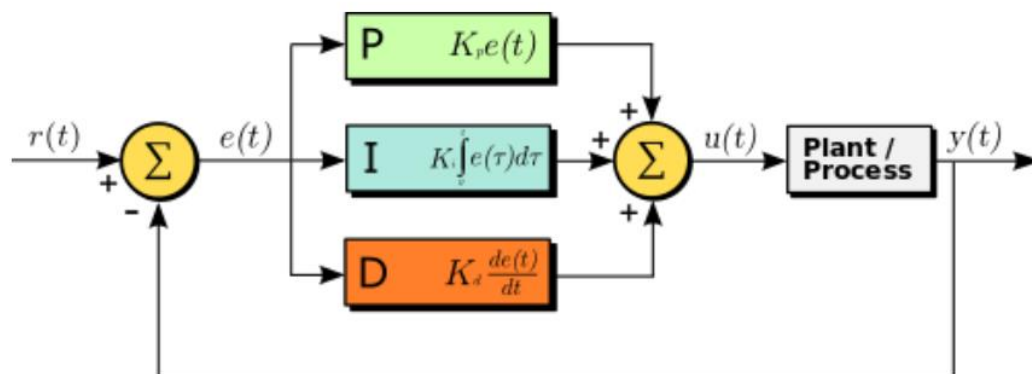
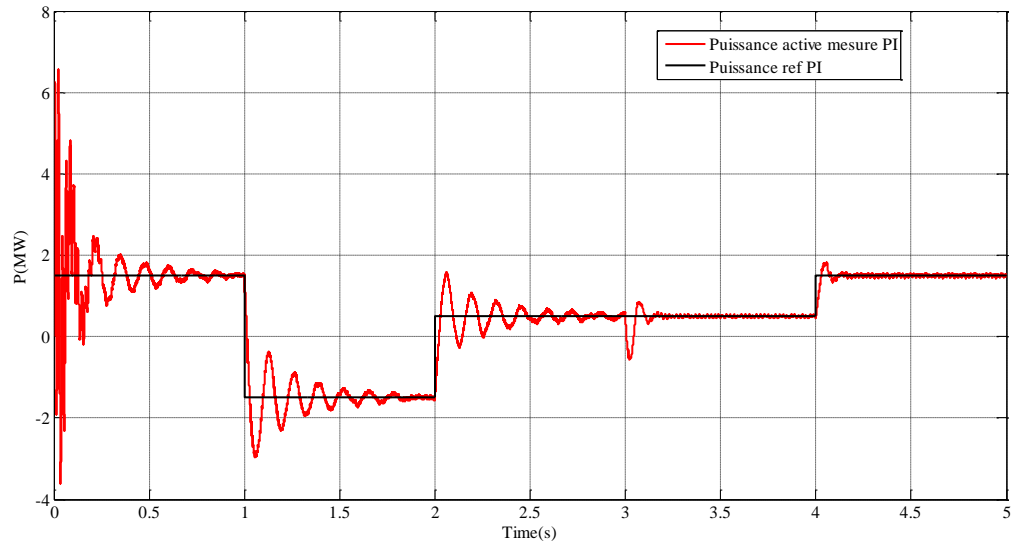


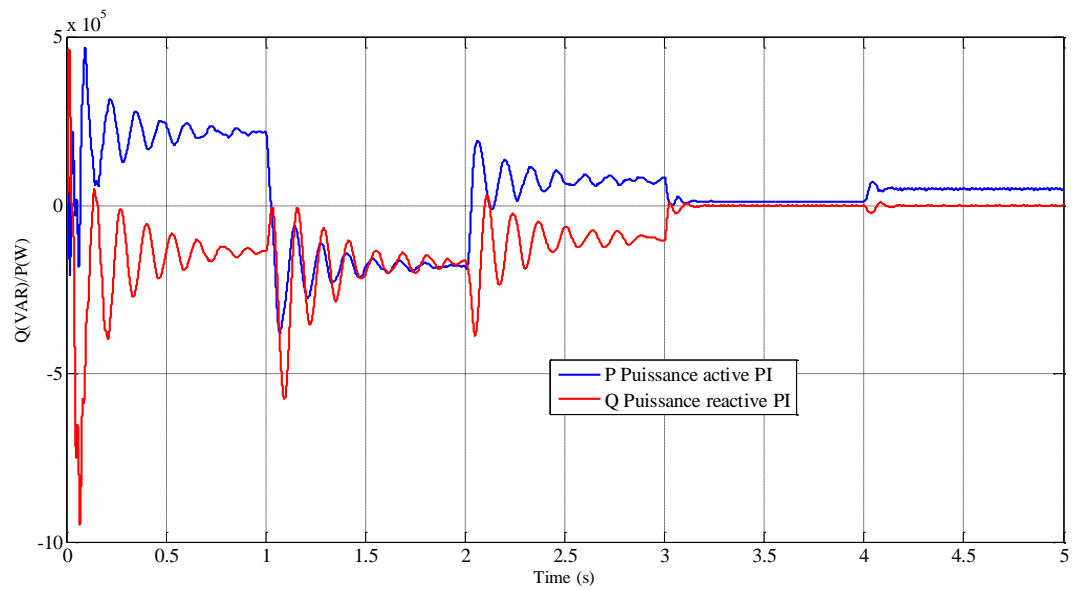
Figure 3-6. Structure générale d'un PID

### 3.8. Résultat de simulation

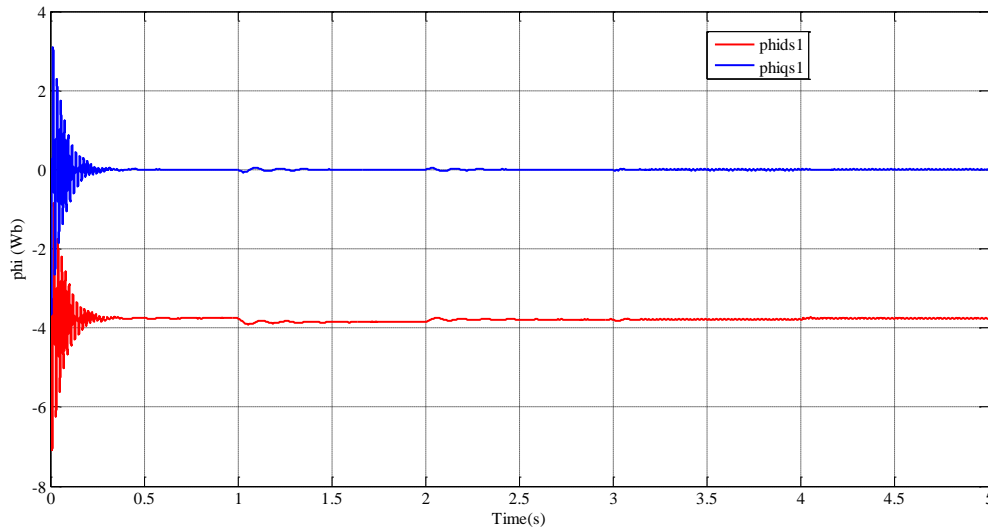
#### 3.8.1. Résultat du correcteur PI



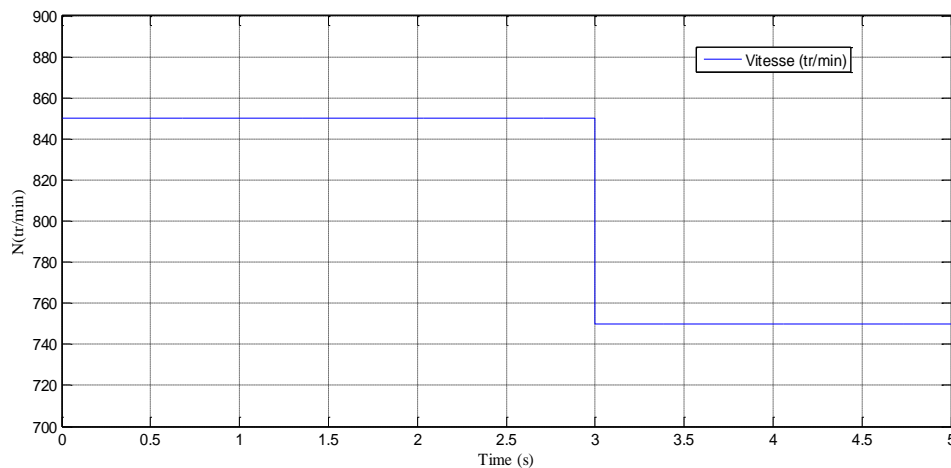
**Figure 3-7.** Allure de la puissance de référence et mesuré



**Figure 3-8.** Allure de la puissance active et réactive  $P_{s2}$  et  $Q_{s2}$



**Figure 3-9.** Allure des flux



**Figure 3-10.** Allure de la vitesse

Nous observons que la puissance lorsqu'elle est régulée par un correcteur PI, l'allure présente des oscillations importantes en réponse aux variations de la puissance de référence. En particulier à  $t=3$ s cela est dû à la variation de la résistance.

Le flux  $q_{s1}$  est nul, ce qui prouve que la commande vectorielle est bien fonctionnelle, le flux  $d_{s1}$  est positive.

La figure (3.10) représente la vitesse appliquée à la machine.

### 3.8.2. Résultat du correcteur PID fractionnaire

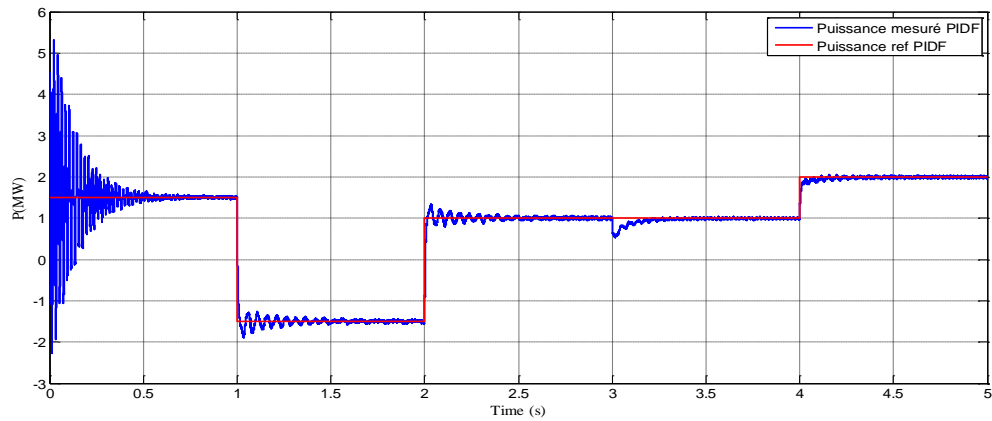


Figure 3-11. Allure de la puissance de référence et mesuré

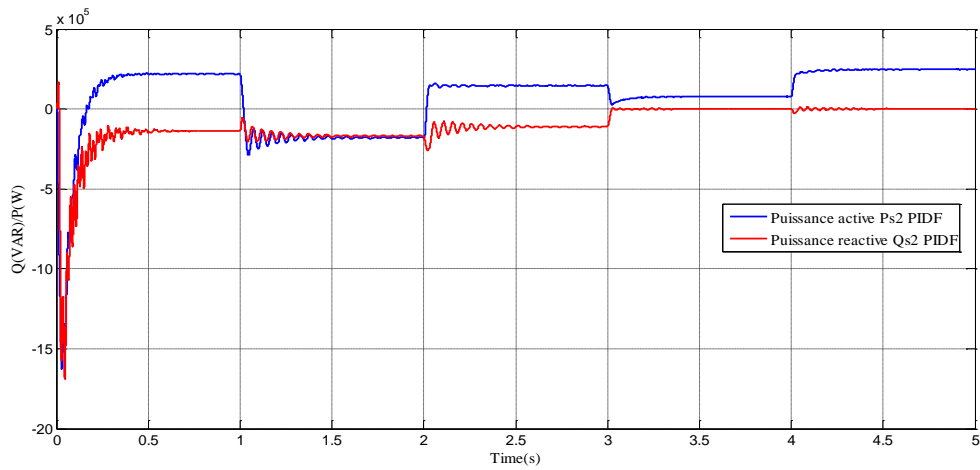


Figure 3-12. Allure de la puissance active et réactive Ps2 et Qs2

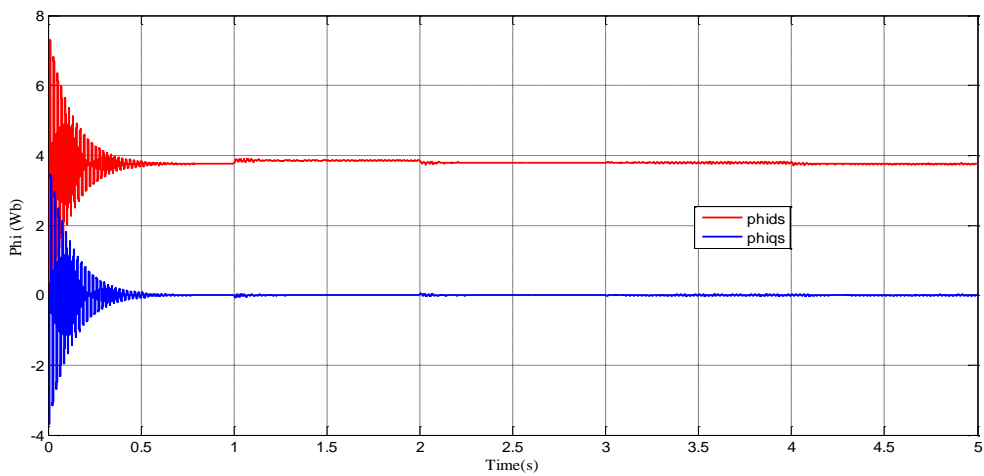


Figure 3-13. Allure des flux

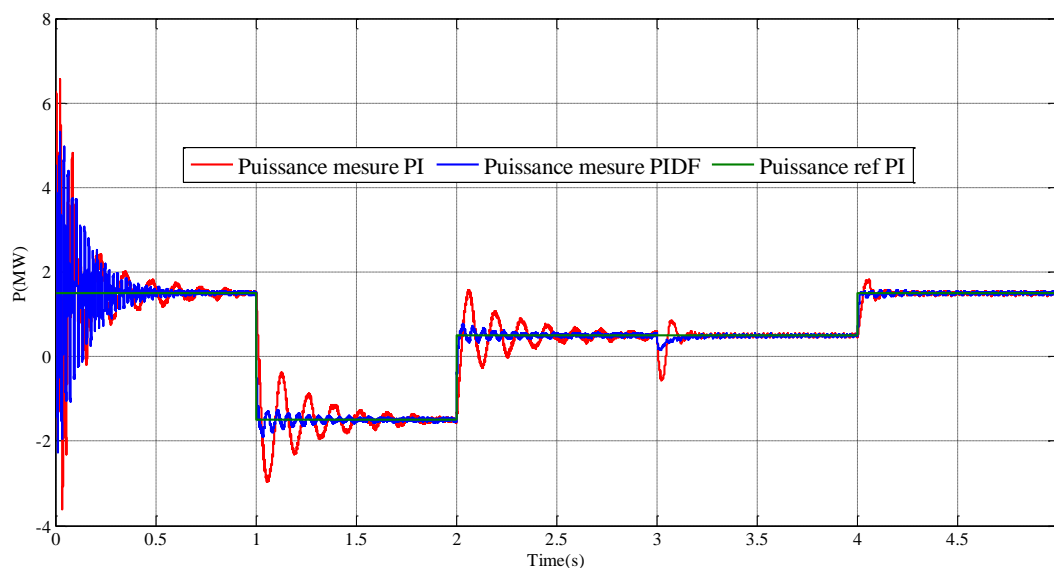
Nous avons donné plusieurs valeurs de la puissance de référence (rouge) afin de visualiser l'effet du correcteur sur la variation de la puissance de référence. Cela nous a permis d'évaluer la performance et la robustesse du correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ , notamment lorsque nous avons doublé la résistance par rapport à sa valeur initiale à  $t = 3s$ .

En analysant les résultats, nous avons pu observer comment le correcteur réagit aux changements de la puissance de référence, ainsi que sa capacité à maintenir la stabilité et à minimiser les erreurs de suivi. Ces données nous ont également permis de :

- Valider l'efficacité du correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  dans diverses conditions opérationnelles.
- **Réactivité du correcteur** : Comment le correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  réagit aux changements brusques.

Le flux  $qs1$  est nul, ce qui prouve que la commande vectorielle est bien fonctionnelle, le flux  $ds1$  est positive.

### 3.8.3. Comparaison entre PI et $PI^{\lambda}D^{\mu}$



**Figure 3-14.** Allure des puissances sous le **PI** et  **$PI^{\lambda}D^{\mu}$**

Nous avons comparé les performances du correcteur PI et du correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  (fractionnaire) en réponse aux variations de la puissance de référence et la résistance. D'après la figure 3.14 voici les principales observations :

### Correcteur PI

- **Oscillations importantes** : Le correcteur PI génère des oscillations significatives de la puissance, notamment à  $t=3s$ , en réponse aux changements de la résistance
- **Réponse dynamique** : La réponse du PI est marquée par des amplitudes élevées.
- **Stabilité** : La stabilité du système est souvent compromise.
- **Dépassements** : Les dépassements par rapport à la puissance de référence sont fréquents, entraînant des performances moins précises et fiables.

### Correcteur $PI^{\lambda}D^{\mu}$

- **Réduction des oscillations** : Le correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  montre une meilleure performance en termes d'amortissement des oscillations par rapport au PI traditionnel.
- **Meilleure réponse dynamique** : Le  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  offre une réponse plus douce et moins sujette aux sursauts, avec une transition plus stable vers la nouvelle puissance de référence.
- **Amélioration de la stabilité** : Le système reste plus stable avec le correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ , même lorsque la résistance est doublée à  $t = 3s$ .
- **Réduction des dépassements** : Le  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  minimise les dépassements, conduisant à une performance plus précise et fiable.

Nous remarquons également à travers les deux figure **3.8** et **3.12** que l'amplitude initiale est élevée avec des oscillations persistantes sous le correcteur PI à savoir  $P_{s2}$  et  $Q_{s2}$ , comparé aux amplitudes plus faible et oscillations réduites du correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ .

En résumé, le correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  surpasse le correcteur PI en offrant une meilleure stabilité, une réponse dynamique plus douce, et en réduisant les oscillations et les dépassements. Cela en fait une solution plus efficace et robuste pour la régulation de la puissance de référence, surtout en présence de variations significatives des paramètres du système.

### 3.9. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons développé une commande qui permet de contrôler de manière autonome les puissances active et réactive du stator 1 en établissant les équations qui relient les tensions du stator 2, générées par un convertisseur de fréquence, aux puissances active et réactive du stator 1.

En effectuant la commande directe, nous avons constaté que la méthode directe de réglage des puissances est facile à mettre en place.

Nous avons également présenté les équations et les structures principales de la commande ainsi que le fonctionnement des correcteurs PI et  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ . L'amélioration des performances et de la robustesse est l'une des principales raisons d'adopter la commande fractionnaire. Cependant, la détermination des paramètres optimaux du correcteur  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  reste un sujet d'actualité, avec pour objectif de développer des techniques plus efficaces et optimales pour cette tâche





**Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

La montée en puissance des énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne en Algérie, bénéficie de progrès technologiques significatifs. Les conditions climatiques favorables offrent une opportunité prometteuse pour le développement durable de l'énergie éolienne. L'intégration de modèles avancés comme la machine asynchrone doublement alimentée (MADA) dans des configurations en cascade et l'application de techniques de commande intelligente. Ces avancées jouent un rôle crucial dans la transition mondiale vers des sources d'énergie plus propres et durables.

L'approche en cascade des deux machines asynchrones montre sa pertinence en permettant une régulation précise des puissances actives et réactives, essentielle pour maximiser le rendement énergétique. La relation en cascade de deux machines, semblable à celle d'une machine à  $p$  paires de pôles, permet de tirer parti des avantages synergiques des deux systèmes pour une performance optimale.

La modélisation et la simulation de ces systèmes ont démontré la faisabilité et la robustesse des approches adoptées. Les résultats ont confirmé la comparabilité avec les systèmes traditionnels et la capacité à maintenir des performances élevées malgré des conditions variables. L'application de la commande directe pour ajuster les puissances active et réactive du stator 1, tout en contrôlant les tensions du stator 2 via un convertisseur de fréquence, illustre l'efficacité des méthodes de régulation autonomes.

Enfin, l'introduction des correcteurs PI et  $PI^\lambda D^\mu$  dans ces systèmes offre une amélioration notable en termes de performances et de robustesse. L'approche fractionnaire du  $PI^\lambda D^\mu$  répond à la demande croissante de précision et d'adaptabilité dans la commande des systèmes dynamiques comme les éoliennes. L'optimisation continue des paramètres de ces correcteurs reste une priorité pour maximiser leur efficacité dans divers environnements opérationnels.

En somme, l'évolution vers des systèmes éoliens plus sophistiqués et efficaces grâce à ces avancées technologiques et de commande est essentielle pour répondre aux défis énergétiques mondiaux tout en respectant les exigences croissantes en matière de durabilité environnementale.

*Annexe A- .....*

Bien que nécessaires à la compréhension du travail de recherche, certains documents peuvent alourdir le texte. Il est donc préférable de les présenter en annexe et de les séparer les uns des autres par des pages de titre appropriées.

*Références Bibliographiques*

- [1] Guilhem Bernes, "La capacité mondiale de production d'énergies renouvelables a augmenté de 50% en 2023", L'Usine Nouvelle, 11 janvier 2024, consulté le 13/03/2024, disponible à l'adresse : [https://www.usinenouvelle.com/article/la-capacite-mondiale-de-production-d-energies-renouvelables-a-augmente-de-50-en-2023.N2206300]
- [2] A. MAAFA, "Intégration d'une cascade de deux machines asynchrones dans un système éolien", Thèse de Doctorat, Université A. Mira de Bejaïa, 2017
- [3] Global Wind Energy Council (GWEC), "Le vent dynamise le marché des énergies renouvelables en une année record", 23 novembre 2021, consulté le 13/03/2024, disponible à l'adresse : [https://alj.com/fr/perspective/wind-energizes-renewables-market-in-record-year/]
- [4] Tristan Gaudiaut, "Un monde toujours plus énergivore", Statista, 14 octobre 2021, consulté le 13/03/2024, disponible à l'adresse : [https://fr.statista.com/infographie/25964/evolution-de-la-consommation-mondiale-energie-par-source/]
- [5] E.SZECHENYI et P.LECONTE et M.RAPIN ' Techniques de l'Ingénieur, Eoliennes' Date de publication : 10/01/2001.
- [6] MEKKAOUI, 'Contribution à la Modélisation et a la Commande d'une Mini- Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée' thèse de doctorat. Université de Batna - Algérie, (2004).
- [7] TotalEnergies, "Quels sont les différents types d'éoliennes ?", consulté le 21/03/2024, disponible à l'adresse : [https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/quels-sont-les-differents-types-d-eoliennes#:~:text=En%20d%C3%A9veloppement%2C%20cette%20%C3%A9nergie%20renouvelable,horizontale%20ou%20encore%20%C3%A9olienne%20domestique].
- [8] Zhor Hadjam, "Assistance technique à la transition énergétique en Algérie : la Banque mondiale cible l'éolien et l'autoproduction électrique", El Watan, 27 janvier 2024, disponible à l'adresse [https://elwatan-dz.com/assistance-technique-a-la-transition-energetique-en-algerie-la-banque-mondiale-cible-leolien-et-lautoproduction-electrique]
-

- [9] C. Saget, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne", REE, 1998.
- [10] S. El Aimani, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension". *Thèse de Doctorat*. Université Sciences et Technologies de Lille. France, (2004).
- [11] E. De Vries, "Wind turbines technology trends", Vol. 6, No. 4, James & James (Science Publishers), Renewable Energy World, July-August 2003
- [12] L. Baghli, "Contribution a la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et les Algorithmes Génétiques. Thèse de Doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy-I. France, (1999).
- [13] R. Abdessemed, M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques". Presses de L'Université de Batna. Algerie, (1997)
- [14] Boussouf, "Commande de la machine asynchrone Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone", Cours M1/S2 EM, University de Mila, 2022.
- [15] S. A. M. ARDJOUN « Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Mémoire de magister, Université D. Liabes de Sidi-BelAbbès, (2010).
- [16] R. Abdessemed & M. Kadjoudj, « Modélisation des machines électriques », Batna 1997.
- [17] Maafa, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, R. Abdessemed, "Mod'elisation et Contr'ole en Puissance d'une Cascade de deux Machines Asynchrones Doublement Aliment'ees (CDFIG)". International Conference on Electrical Engineering (CEE2010), october, 2013. Batna. Algerie.
- [18] AID Fatiha, AMRANE Hadda, "Etude d'un système hybride pour la génération de l'énergie électrique", Mémoire Master, Université A.mouhand oulhadj, 2023.
- [19] B. Cherif, "simulation de la commande vectorielle", Mémoire de Magistère, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.

- [20] B.M. Vinagre, V. Feliú, "Modeling and control of dynamic system using fractional calculus: Application to electrochemical processes and flexible structures", proceedings of 41st IEEE conference on decision and control, Las Vegas, December 9, pp. 214-239, 2002.
- [21] P. PROVOUST, (contrôle et régulation), livre : Automatique
- [22] Bensafia Y., Ladaci S., Khettab K. 'Commande Multi-modèles du Moteur a Courant Continu ', International Conference on Electronics and Oil, ICEO'2011, Ouragla, Algeria, March 2011
- [23] Abdelhakim Idir, Madjid Kidouche, Yassine Bensafia, Khatir Khettab, Sid Ahmed Tadjer, 'Speed Control of DC Motor Using PID and FOPID Controllers Based on Differential Evolution and PSO', International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.11, No.4, 2018.
- [24] I. Podlubny, "Fractional Order Systems and  $PI\lambda D\mu$  Controllers", IEEE Transactions On Automatic Control, vol. 44, No. 1, pp. 208-214, 1999.

## ملخص:

لغرض من هذه الأطروحة هو دراسة نظام هجين للرياح يعتمد على آلتين غير متزامنتين مزدوجتي التغذية في تكوين متتالي الآلة غير المتزامنة المتتالية هي بديل قوي للآلات الكهربائية التقليدية. هذا التكوين يعادل الاقتران الميكانيكي (MASEC). والكهربائي لآلتين غير متزامنتين عبر دواراتهما. يُحسّن استخدام الآلة المتزامنة المتسلسلة من كفاءة تحويل طاقة الرياح إلى كهرباء. وتؤكد نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها جدوى وكفاءة هذا النظام

**كلمات مفتاحية** المتزامنة المتتالية تحويل طاقة الرياح إلى كهرباء والكهربائي لآلتين غير متزامنتين، للآلات الكهربائية التقليدية

## Résumé :

L'objet de ce mémoire est d'examiner un système hybride éolien basé sur deux machines asynchrones à double alimentation en configuration cascade (MASEC). La machine asynchrone en cascade constitue une alternative robuste par rapport aux machines électriques conventionnelles. Cette configuration est équivalente à un couplage mécanique et électrique de deux machines asynchrones via leurs rotors. L'utilisation de la MASEC permet d'optimiser l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne en électricité. Les résultats de simulation obtenus confirment la viabilité et l'efficacité d'un tel système.

**Mots Clés** MASEC, l'énergie éolienne en électricité, alternative robuste, configuration cascade.

## Abstract:

The purpose of this thesis is to examine a wind hybrid system based on two double-fed asynchronous machines in cascade configuration (MASEC). The cascaded asynchronous machine is a robust alternative to conventional electrical machines. This configuration is equivalent to the mechanical and electrical coupling of two asynchronous machines via their rotors. The use of MASEC optimizes the efficiency of converting wind energy into electricity. The simulation results obtained confirm the viability and efficiency of such a system.

**Key Words:** cascade configuration, conventional electrical machines, the mechanical and electrical