

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de Sciences et de Technologie

Département d'Electrotechnique et automatique



MEMOIRE

Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : DJELLOULI Sakina et BENINI Fouzia

Sujet

**Commande Synergétique des puissances active et réactive
de la génératrice asynchrone à double alimentation intégré
dans un système éolien**

Soutenue publiquement en .../06/2025 devant le jury composé de :

Pr. CHIKOUCHE MOHAMMED Tarek

Univ. Saida

Président

Dr. BELGACEM Kheira

Univ. Saida

Rapporteur

Dr. DRIF Malika

Univ. Saida

Examineur

REMERCIEMENTS

Remerciement

A l'issue de ce travail, nous adressons nos remerciements premièrement à Dieu tout puissant qui nous a aidé à dépasser les difficultés que nous avons rencontré tout au long de notre travail.

Un remerciement particulier à Dr. BELGACEM Kheira encadreur de ce travail, et pour la qualité de son encadrement et sa constante disponibilité malgré ses nombreuses charges, pour les nombreux conseils et discussions qui ont orienté mes recherches au cours de cette mémoire. et dispensé leur connaissance riche d'expérience et pour leurs conseils pertinents qu'ont contribué à notre formation scientifique.

Nous remercions de plus grande des manières nos parents pour leurs soutiens démesurés durant nos études et prions le puissant de nous les garder le plus possible ainsi que nos frères et sœurs et toutes nos connaissances envers nos familles.

Nous remercions également Pr. CHIKOUCHE MOHAMMED Tarek et M^{me} DRIF Malika pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Enfin un grand remerciement aux nos camarades sans citer leurs noms qui nous apporté leur aide et leur soutien.

DJELLOULI Sakina et BENNINI Fouzia

DEDICACES

DÉDICACE

NOUS DÉDIONS CE TRAVAIL :

À NOS PARENTS, LES PERSONNES QUI ONT BEAUCOUP SACRIFIÉ POUR
NOUS SANS ILS NOUS
N'AURIONS EU LA VOLONTÉ D'ATTEINDRE CE NIVEAU ;
À NOS SŒURS;
À TOUTE NOS FAMILLES ;
À NOS NEVEUX ET NIÈCES;
À TOUS NOS AMIS;
À TOUS NOS COLLÈGUES;
À TOUS CEUX QUE NOUS CONNU DURENT TOUTES NOS ÉTUDES;
À TOUS CEUX POUR QUI NOUS COMPTONS ET QUI COMPTENT POUR
NOUS;

BENNINI FOUZIA

DJELLOULI SAKINA

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I

Etat d'art sur la conversion éolienne

I.1. Introduction.....	03
I.2. Définition de l'énergie renouvelable.....	03
I.3. L'éolienne	03
I.4. Bref historique sur l'énergie éolienne.....	05
I.5. Constitution d'une éolienne.....	06
I.6. Les différents types d'éolienne.....	08
I.6.1. Eolienne à axe vertical	08
I.6.2. Eolienne à axe horizontal.....	09
I.7. Classement d'éoliennes suivant la vitesse de rotation.....	10
I.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....	10
I.7.2. Les éolienne à vitesse variable.....	11
I.8. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes.....	11
I.8.1. Machine synchrone.....	11
I.8.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	12
I.8.3. Machine asynchrone à double stator (double étoile).....	13
I.9. Energie éolienne en Algérie.....	14
I.9.1. Gisement éolien en Algérie.....	14
I.9.2. Carte des vents en Algérie.....	14
I.10. Les avantages et les inconvénients.....	15
I.10.1 Les avantages.....	15
I.10.2 Les inconvénients.....	16
I.11. Conclusion.....	16

Chapitre II

Modélisation du système de conversion éolienne

II.1. Introduction.....	17
II.2. Principe physique du vent.....	17
II.3. Modélisation de la turbine.....	17
II.3.1 Modèle énergétique de la turbine.....	18
II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	19
II.3.3 Modèle de la partie mécanique.....	19
II.4. Notion sur la machine asynchrone à double alimentation.....	21
II.4.1. Description générale de la machine asynchrone à double alimentation.....	21
II.4.2. Mode de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	22
II.4.3. Structure générale d'un système éolien à base d'une MADA.....	24
II.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	24
II.5.1. Hypothèses simplificatrices.....	25
II.5.2. Équations électriques.....	26
II.5.3. Les relations flux-courants (relations électromagnétiques).....	27
II.5.4. La transformation de Park.....	28
II.5.5. Choix du référentiel.....	29
II.6. Modèle diphasé de la GADA.....	30
II.7. Modélisation de l'onduleur.....	32
II.7.1. Principe de commande MLI.....	33
II.8. Conclusion.....	34

Chapitre III

Commande Vectorielle de la GADA

III.1. Introduction.....	35
III.2. La commande vectorielle.....	35
III.3. Principe de la commande vectorielle.....	35
III.4. Synthèse de la commande à flux orienté de la GADA.....	36

III.5.	Orientation par flux statorique.....	37
III.6.	Modèle simplifié de la GADA avec orientation du flux statorique.....	40
III.6.1.	Estimation du flux statorique.....	41
III.6.2.	Mise en évidence des termes de couplage.....	42
III.7.	Réglage des puissances statorique du GADA.....	43
III.7.1.	Méthode direct.....	43
III.7.1.1.	Commande direct.....	43
III.7.1.2	Schéma bloc de la régulation.....	44
III.7.1.3.	Synthèse des correcteurs	45
III.7.1.4.	Schéma bloc de la régulation des puissances statorique de GADA	47
III.7.2.	Méthode indirecte.....	49
III.7.2.1.	Commande indirecte.....	49
III.7.2.2.	Réglage indirect sans boucle de régulation	49
III.7.2.3.	Schéma bloc de la régulation.....	50
III.7.2.4.	Synthèse des correcteurs.....	52
III.7.2.5.	Schéma bloc du contrôle indirect de la GADA.....	55
III.8.	Résultats de simulation et interprétation.....	57
III.17.	Conclusion.....	58

Chapitre IV

Commande Synergétique de la GADA

IV.1.	Introduction.....	59
IV.2.	Principe généraux de la synergétique.....	59
IV.3.	Présent la théorie de commande synergétique.....	59
IV.3.1.	Principe de la commande synergétique.....	60
IV.3.2.	Synthèse de régulateur synergétique.....	60
IV.4.	Application de la commande synergétique à la GADA.....	63
IV.5.	Résultats de simulation	66
IV.6.	Conclusion.....	67
	Conclusion générale	68
	BIBLIOGRAPHIE	

Glossaire

1. En Français

Acronyme	Signification
MADA	M achine A synchrone D ouble A limentation ;
GADA	G énératrice A synchrone à D ouble A limentation;
MAS	M achine A synchrone ;
MS	M achine S ynchrone ;
MCC	M achine à C ourant C ontinu;
MLI	M odulation de L argeur d’ I mpulsion;
PI	P roportionnel et I ntégral;

2. En Anglais

Acronyme	Signification
DFIG	D ouble F ed I nduction G enerator ;
MLI	M odulation de L argeur d’ I mpulsion;
DC	D irect C urrent (courant continue);
AC	A lternating C urrent (courant alternatif);
SC	S ynergetic C ontrol

Liste des Symboles

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce mémoire sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

1. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

R_s	(Ω)	Résistance statorique par phase ;
R_r	(Ω)	Résistance rotorique par phase ;
L_s	(H)	Inductance cyclique statorique;
L_r	(H)	Inductance cyclique rotorique;
M	(H)	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor);
T_r		Constante de temps rotorique ($T_r = \frac{R_r}{L_r}$) ;
σ	-	Coefficient de dispersion ou (de Blondel) $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$;
p		Nombre de paires de pôles;
J	($Kg.m^2$)	Moment d'inertie;
f	($N.m.s/rad$)	Coefficient de frottement visqueux;
T_{em}	($N.m$)	Couple électromagnétique;
P_n	(W)	Puissance active nominale ;
P_s, P_r	(W)	Puissances actives au niveau de stator et de rotor, respectivement;
Q_s, Q_r	(VA_r)	Puissances réactives au niveau de stator et de rotor, respectivement ;

2. Repères

$\vec{S}^a, \vec{S}^b, \vec{S}^c$		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statoriques ;
$\vec{R}^a, \vec{R}^b, \vec{R}^c$		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques ;
(d, q)		Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme) ;
θ	(rad)	Position angulaire de l'axe rotorique $\vec{R}_\alpha$ par rapport au l'axe statorique $\vec{S}_\alpha$;
θ_s	(rad)	Position angulaire l'axe statorique $\vec{S}_\alpha$ par rapport à l'axe (d) ;
θ_r	(rad)	Position angulaire de l'axe rotorique $\vec{R}_\alpha$ par rapport à l'axe (d) ;

3. Grandeurs électriques liées au stator

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	(V)	Tensions statoriques triphasées;
$V_{s,abc}$	(V)	Vecteur des tensions statoriques triphasées;
v_{sd}, v_{sq}	(V)	Tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q) ;
$V_{s,dq}$	(V)	Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (d, q) ;
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	(A)	Courants statoriques triphasés;
$I_{s,abc}$	(A)	Vecteur des courants statoriques triphasés;
i_{sd}, i_{sq}	(A)	Courants statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) ;
$I_{s,dq}$	(A)	Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) ;

4. Grandeurs électriques au rotor

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	(V)	Tensions rotoriques triphasées;
$V_{r,abc}$	(V)	Vecteur des tensions rotoriques triphasées;
v_{rd}, v_{rq}	(V)	Tensions rotoriques diphasées dans le repère (d, q) ;
$V_{r,dq}$	(V)	Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère (d, q) ;
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	(A)	Courants rotoriques triphasés;
$I_{r,abc}$	(A)	Vecteur des courants rotoriques triphasés;
i_{rd}, i_{rq}	(A)	Courants rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) ;
$I_{r,dq}$	(A)	Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q) ;

5. Grandeurs magnétique au stator

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	(Wb)	Flux magnétiques triphasés au stator;
$\Phi_{s,abc}$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques triphasés au stator;
ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	(Wb)	Flux magnétiques statoriques dans le repère tournant (d, q) ;
$\Phi_{s,dq}$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques statoriques dans le repère tournant (d, q) ;

6. Grandeurs magnétiques au rotor

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	(Wb)	Flux magnétiques triphasés au rotor;
$\Phi_{r,abc}$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques triphasés au rotor;

ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	(Wb)	Flux magnétiques rotoriques dans le repère tournant (d, q);
$\Phi_{r,dq}$	(Wb)	Vecteur de flux magnétiques rotoriques dans le repère tournant (d, q);

7. Grandeurs magnétiques de la machine

f_s	(Hz)	Fréquence des grandeurs électrique statoriques;
f_r	(Hz)	Fréquence des grandeurs électrique rotoriques;
Ω	(rad / s)	Vitesse mécanique de rotation ;
ω_s	(rad / s)	Pulsation électrique des grandeurs statoriques ($\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$);
ω_r	(rad / s)	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques ($\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f_r$);
ω	(rad / s)	Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation ($\omega = p \cdot \Omega$);
g	(-)	Glissement de la vitesse de rotation : ($g = \omega_r / \omega_s = (\omega_s - \omega) / \omega_s$);

8. Grandeurs de la commande de la machine asynchrone à double alimentation

P_s^*	(W)	Consignes ou valeur de référence de la puissance active statoriques;
Q_s^*	(Var)	Consignes ou valeur de référence de la puissance réactive statoriques ;
v_{rd}^*, v_{rq}^*	(V)	Tensions rotoriques de référence dans le repère (d) et (q) ;
i_{rd}^*, i_{rq}^*	(A)	Courants rotoriques de référence dans le repère (d) et (q) ;
$f_{emd}; f_{emq}$	(-)	Termes de couplage entre les axes (d) et (q) ;
K_p, K_i	(-)	Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI;
K_{p,P_s}, K_{i,P_s}	(-)	Composante du correcteur PI de la puissance statorique active P_s ;
K_{p,Q_s}, K_{i,Q_s}	(-)	Composante du correcteur PI de la puissance statorique réactive Q_s ;
$K_{p,id}, K_{i,id}$	(-)	Composante du correcteur PI du courant i_{rd} ;
$K_{p,iq}, K_{i,iq}$	(-)	Composante du correcteur PI du courant i_{rq} ;
D		Dépassement ;
ξ		Amortissement ;

9. Symboles spécifiques à la turbine

V	(m/s)	Vitesse du vent ;
m	(Kg)	Masse de l'air ;
$E_{cinétique}$	(Joule)	Energie cinétique du vent ;

V_0	(m^3)	Volume du vent ;
P_v	(W)	Puissance du vent;
ρ	$(\frac{kg}{m^3})$	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C);
S	(m^2)	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi.R^2$;
P_{aer}	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine;
C_p	$(-)$	Coefficient de puissance;
$\Omega_{turbine}$	(rd / s)	Vitesse mécanique de la turbine;
R	(m)	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne);
T_{aer}	$(N \cdot m)$	Couple aérodynamique de la turbine;
G	$(-)$	Gain du multiplicateur de vitesse ;
Ω_{mec}	(rad / s)	Vitesse mécanique de la GADA;
J	$(kg \cdot m^2)$	Inertie totale sur le rotor de la génératrice;
$J_{turbine}$	$(kg \cdot m^2)$	Moment d'inertie totale de la turbine;
f	$(Nm \cdot s / rad)$	Coefficient de frottements visqueux;
T_g	$(N \cdot m)$	Couple mécanique entraînent de la génératrice;
λ	$(-)$	Rapport de vitesse;
β	(deg)	Angle d'orientation des pales ;
T_{em}	$(N \cdot m)$	Couple électromagnétique;
T_{vis}	$(N \cdot m)$	Couple des frottements visqueux;
f_e	$(Nm \cdot s / rd)$	Coefficient de frottements visqueux;
J_t	$(kg \cdot m^2)$	Inertie totale sur l'arbre ;
T_{mec}	$(N \cdot m)$	Couple mécanique sur l'arbre de la GADA;
$C_{P_{max}}$	$(-)$	Coefficient de puissance correspondant à l'extraction maximale de puissance;
$\lambda_{C_{P_{max}}}$	$(-)$	Ratio de vitesse optimale;
T_m	$(N \cdot m)$	Couple mécanique ;
$\omega_{n,1}$	$(-)$	Pulsation naturelle (système partie mécanique de l'éolienne ;

10. Symboles spécifiés à la commande synergétique

x	(-)	Vecteur d'état du système.
u	(-)	Vecteur de commande.
t	(Sec)	Le temps
ψ	(-)	Le macro-variable.
$\psi(x, t)$	(-)	Fonction des variables.
T	(-)	paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence des macro-variables vers le domaine indiqué.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie électrique est la plus aisée. Il est devenu de plus en plus indispensable pour l'humanité.

Toutefois, avant de pouvoir être utilisée, elle doit d'abord être produite, généralement dans des installations de production conventionnelles à grande puissance, soit par la combustion de combustibles fossiles ou par fission nucléaire en employant des ressources énergétiques telles que l'Uranium [LIT, 13].

Durant la dernière décennie, Les enjeux liés à l'augmentation des coûts des énergies primaires et à la fréquence croissante des dérèglements climatiques ont suscité une prise de conscience collective concernant la dégradation de l'écosystème terrestre et les menaces imminentes de pénuries à l'échelle mondiale. Des accidents nucléaires, tels que ceux de Tchernobyl (Ukraine, 1986) et de Fukushima (Japon, 2011), ont incité de nombreux gouvernements à opter pour les énergies renouvelables. Par conséquent, les questions relatives à la gestion optimale des ressources énergétiques se sont retrouvées au cœur des discussions scientifiques, entraînant l'émergence de nouvelles méthodes de production et de gestion efficace de l'énergie électrique [TAM, 19].

Dans ce contexte, l'énergie renouvelable provient de sources naturelles inépuisables et est perçue comme écologique en raison de l'absence d'émissions lors de sa production. Une exploitation judicieuse de ces ressources pourrait satisfaire les besoins électriques des nations, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'industrie et l'agriculture, tout en générant des emplois et en aidant à diminuer le chômage .

La progression de la production d'électricité issue des énergies renouvelables devrait se maintenir dans les années à venir, car les secteurs de l'énergie éolienne, solaire et de la biomasse affichent une dynamique favorable. La proportion de ces sources d'énergie dans la production mondiale continue d'augmenter. Cette évolution est cruciale pour faire face à la demande énergétique croissante, tout en limitant les émissions de gaz nocifs et en atténuant les impacts négatifs sur l'environnement [BEK-MES, 23].

L'énergie éolienne se distingue, parmi les sources d'énergie renouvelables, par sa croissance rapide à l'échelle mondiale. Elle est largement considérée comme l'une des options les plus prometteuses pour la production d'électricité propre à court et moyen terme, tout en jouant un rôle essentiel dans la protection de l'environnement [NAI-HAD, 12].

Actuellement, le système éolien à vitesse variable reposant sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus couramment employé dans les parcs éoliens

terrestres. Son atout majeur réside dans le fait que ses convertisseurs statiques triphasés sont conçus pour une fraction de la puissance nominale de la MADA, ce qui représente un avantage économique significatif par rapport à d'autres options de conversion électromécanique [LIT, 13].

La commande vectorielle utilisant des régulateurs classiques (proportionnel, intégral et dérivé) ne parvient pas toujours à gérer efficacement les régimes transitoires et, de manière générale, les variations des paramètres de la machine. Toutefois, d'autres types de commandes, tels que la commande synergétique ou l'intelligence artificielle, s'avèrent mieux adaptées à ces exigences et présentent une sensibilité et une robustesse supérieures. [CHO, 20]

La commande synergétique représente une approche innovante de gestion à haute performance, garantissant un découplage complet entre les sorties à contrôler, tout en imposant de manière optimale la sortie souhaitée au système.

Le but principal de ce mémoire est de réaliser la commande synergétique de la Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable afin de produire de l'énergie électrique. Pour ce faire, notre mémoire est structuré en quatre chapitres :

Dans **le premier chapitre**, nous présenterons un état de l'art sur les systèmes de conversion éolienne. Nous évoquons les différentes technologies éoliennes usuellement utilisées dans le domaine des énergies renouvelables, ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

Le deuxième chapitre consacrera à modéliser d'un système éolien : turbine et machine asynchrone à double alimentation (MADA) en utilisant le modèle du Park et nous présentons un modèle mathématique du convertisseur associée (onduleur).

Le troisième chapitre dédiera à la présentation de la commande vectorielle en puissance appliqué à la MADA, en utilisant la méthode d'orientation du flux statorique en vue de l'introduction d'une stratégie de commande en puissance active et réactive basé sur le régulateur (PI).

Le quatrième chapitre consacrera à commande synergétique des puissances active et réactive appliqué à la machine asynchrone à double alimentation.

Finalement, nous terminons ce travail par une conclusion qui résume les résultats obtenus.

CHAPITRE 01

ETAT DE L'ART

SUR LA

CONVERSION

ÉOLIENNE

I.1. Introduction

Les nouvelles énergies vertes dites "renouvelables" prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité à cause de l'accroissement de l'effet de serre et les réserves de l'énergie fossile.

L'énergie éolienne qui apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire.

Dans ce chapitre nous allons présenter une définition d'éolienne et leur constitution et leurs types et les différents types machines électriques utilisées pour un système éolien.

I.2. Définition de l'énergie renouvelable

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain [ROB, 08]. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles [CHA, 14].

Les principales énergies renouvelables sont :

- ♦ L'énergie biomasse.
- ♦ L'énergie hydraulique.
- ♦ L'énergie éolienne.
- ♦ La géothermie.
- ♦ L'énergie solaire.

I.3. L'éolienne

L'éolienne est un dispositif de conversion d'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie électrique. L'énergie cinétique du vent est tout d'abord transformée en énergie mécanique au niveau d'une turbine puis en énergie électrique au niveau d'une génératrice. Il est évident que ces transformations s'opèrent avec une certaine perte d'énergie.

Chapitre1 : Etat de l'art sur la conversion éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée et c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (peut aller jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. **[CHA, 14].**

Les matériaux utilisés dans la fabrication des différents éléments des systèmes éoliens sont en avancée technologique, assurant désormais un très bon rendement de conversion.

Actuellement, l'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée tel que l'énergie solaire photovoltaïque, proposant une alternative très viable aux énergies fossiles. Les installations des fermes éoliennes peuvent être réalisées sur terre (onshore) mais également de plus en plus en mer (offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus en plus relativement faibles par rapport aux nouveaux matériaux utilisés dans la fabrication des pales et machines. En effet, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. **[POI, 03].**



Figure I.1 : Ferme éolienne.

I.4. Bref historique sur l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moudre le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Poule La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont de fabrication Hollandaise). La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006, L'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne respecte l'environnement pendant le développement et l'exploitation. **[BEL, SAH, 22]**.

I.5. Constitution d'une éolienne

La figure suivante représente la constitution d'une éolienne à axe horizontal :

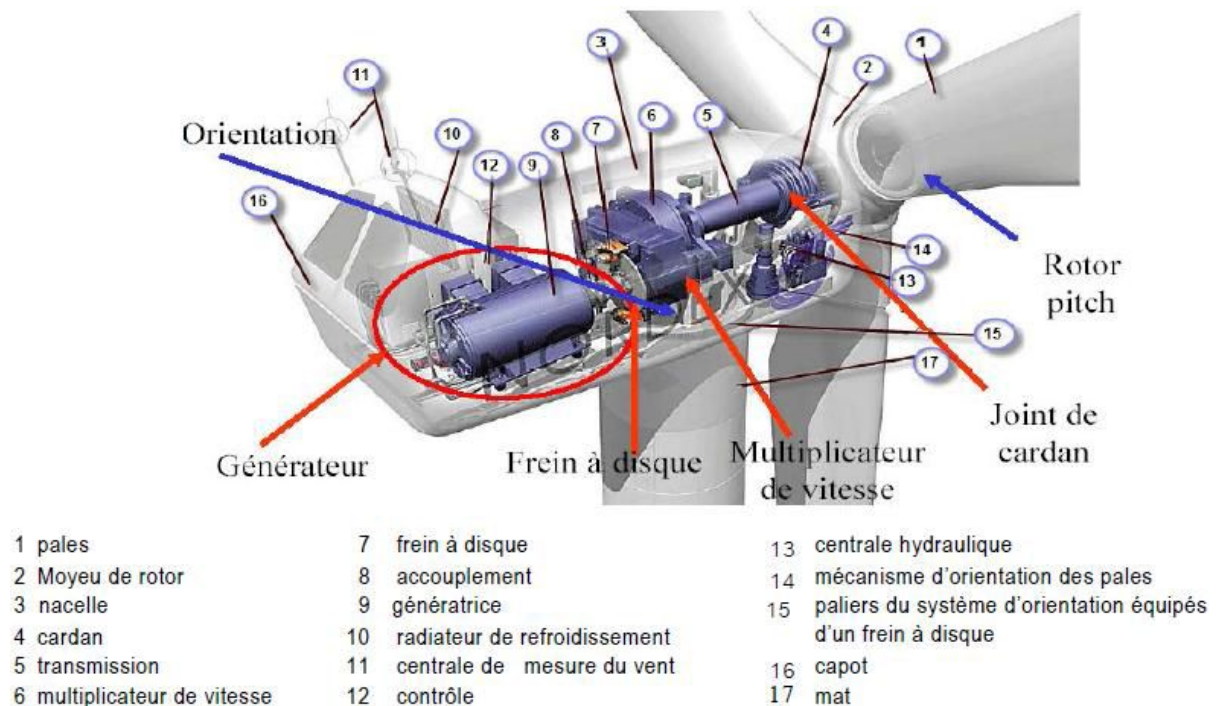


Figure I.2 : Composants d'une éolienne

Une éolienne à axe horizontal se compose d'un mât, d'une nacelle, d'un rotor, d'un générateur et systèmes de control électronique, d'une assise en béton et d'une armoire de couplage.

Le mât permet de placer le rotor à une hauteur suffisante. Ainsi ce dernier pourra être équipé par une plus grande longueur de pale et être entraîné par un vent plus régulier et plus fort qu'au niveau du sol. Le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (Modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.).

La nacelle est de la taille d'un conteneur. Montée au sommet du mât, elle abrite les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine. La nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction ou la mettre en position de repos. La transformation de l'énergie mécanique, fournit par les pâles, en énergie électrique à lieu dans la nacelle.

Le rotor est composé de plusieurs pales (en général trois) et du nez de l'éolienne, fixé à la nacelle.

Chapitre1 : Etat de l'art sur la conversion éolienne

Les éoliennes ont le plus souvent 3 pales, car il s'agit d'un compromis entre différents paramètres :

- ♦ le nombre pair de pales entraîne des effets mécaniques indésirables (forces dites de "précession" trop élevées),
- ♦ Mais le rendement décroît si le nombre de pales augmente (une pale étant perturbée par la précédente).

Ainsi, le choix de 3 pales offre à la fois des contraintes mécaniques réduites et un rendement élevé.

Les petites éoliennes ont toutefois des rotors qui ont parfois deux pales. Celles-ci sont en effet suffisamment petites pour supporter les contraintes de précession et elles peuvent alors profiter d'un meilleur rendement. De plus, elles sont plus simples à concevoir et à réaliser.

Le générateur électrique

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [CAM, 03].

Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées. Dans le paragraphe suivant, nous développerons plus en détail les caractéristiques et les performances de chacun de ces deux types de machines dans diverses configurations.

Le système de contrôle électronique

Une éolienne est généralement munie d'un système électronique destiné à contrôler son fonctionnement général et son mécanisme d'orientation. Il sert à gérer le démarrage, à régler le pas des pales, le freinage ainsi que l'orientation de la nacelle par rapport au vent.

Les convertisseurs d'électronique de puissance

La plupart des éoliennes, connectées au réseau ou en fonctionnement autonome sur un banc de capacités, utilisent uniquement des dispositifs mécaniques pour commander la puissance électrique débitée [TOU, 99]. Ces derniers sont :

- ♦ Les servomoteurs d'orientation de la nacelle qui permettent de placer cette dernière face au vent lors des phases de fonctionnement,
- ♦ Le mécanisme hydraulique qui permet d'orienter les pales afin d'adopter l'angle d'incidence adéquat pour capter une puissance du vent donnée

L'assise de béton, la fondation, permet de fixer de façon rigide l'ensemble de la structure de l'éolienne.

Et enfin **l'armoire de couplage** réalise l'adaptation du courant électrique produit par la nacelle en un courant injectable sur le réseau électrique local.

I.6. Les différents types d'éolienne

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient : **[LAT, 12]**

- ♦ Eoliennes à axe vertical.
- ♦ Eoliennes à axe horizontal.

I.6.1. Eoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de ce type d'aérogénérateur est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et le multiplicateur sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée du fait qu'elle se fait au sol. La majorité des éoliennes à axe vertical tourne à faible vitesse, ce qui est très pénalisant dans les applications de génération d'électricité avec connexion au réseau car la boîte de vitesse doit permettre une importante démultiplication. Le faible rendement et la quantité du vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol, constituent les principaux inconvénients de ce type d'éolienne. La figure (I.3) montre un exemple d'éoliennes à axe vertical. **[CHE, 03].**



Darrieus

Darrieus de type H

Savonius

Figure I.3. : Éolienne à axe vertical.

I.6.2. Eoliennes à axe horizontal

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage (démarrage). Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono-pale, bipales, tripales ou multiples. [CHE, 03].



Figure I.4. : éolienne à axe horizontal.

I.7. Classements d'éoliennes suivant la vitesse de rotation

1.7.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées conçues sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure I.5). La vitesse de cette machine est maintenue approximativement constante. Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour générer la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

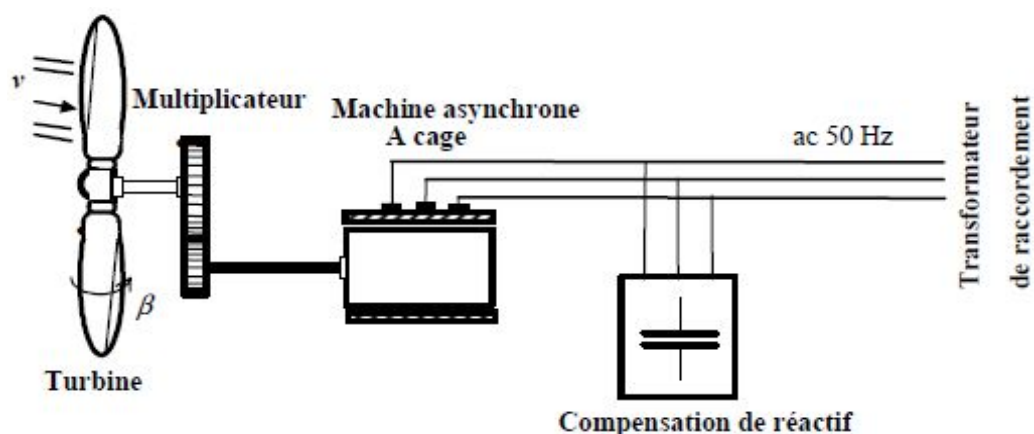


Figure I.5 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

1.7.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont souvent moins coûteuses car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage et synchrone à aimant permanent.

Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. Tel que le premier permet de contrôler la puissance générée en agissant sur la vitesse du générateur, tandis que le deuxième permet de maintenir la fréquence des courants délivrés fixe correspondant à celle du réseau. [EL A, 04]

I.8. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante. [POI, 03].

1.8.1. Machine Synchrone

Ce type de machine (MS) est très utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500KW à 2MW sont bien plus chers que les générateurs asynchrones de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. La figure suivante illustre un système basé sur la machine synchrone.

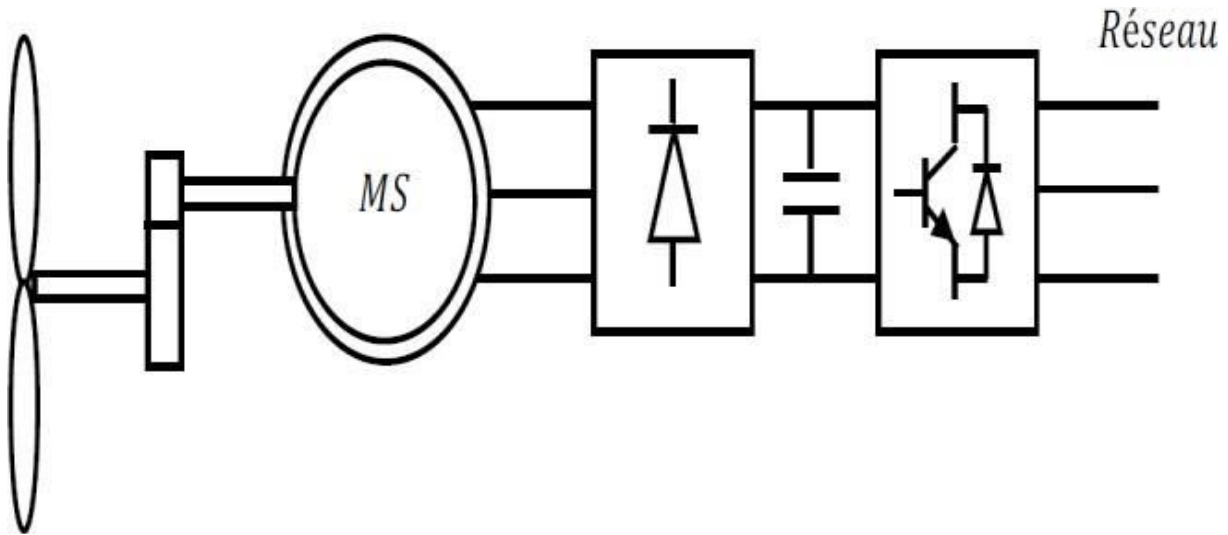


Figure I.6. : Système éolien basé sur la machine synchrone.

I.8.2. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence comme l'illustre la figure (I.6.). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines.

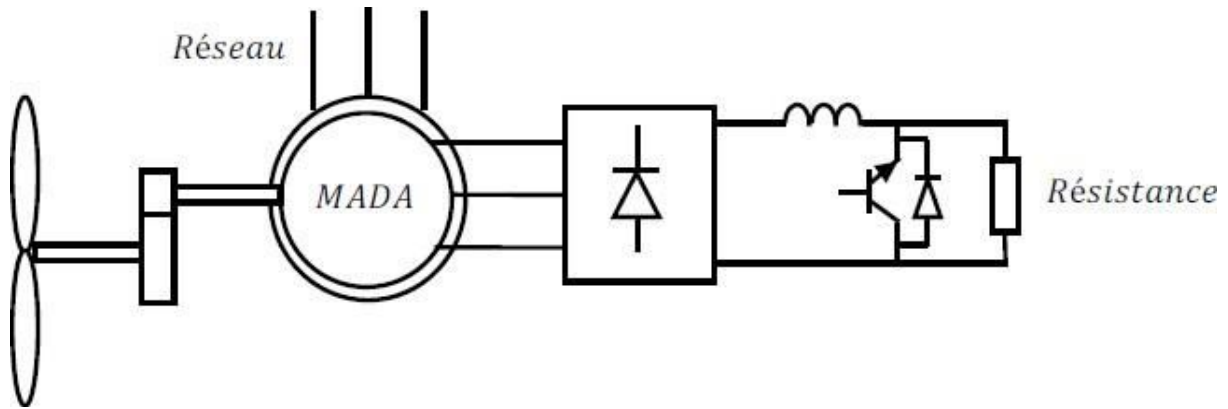


Figure I.7 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation.

I.8.3. Machine asynchrone double stator (double étoile)

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure I.8)

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [TOU, 00].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

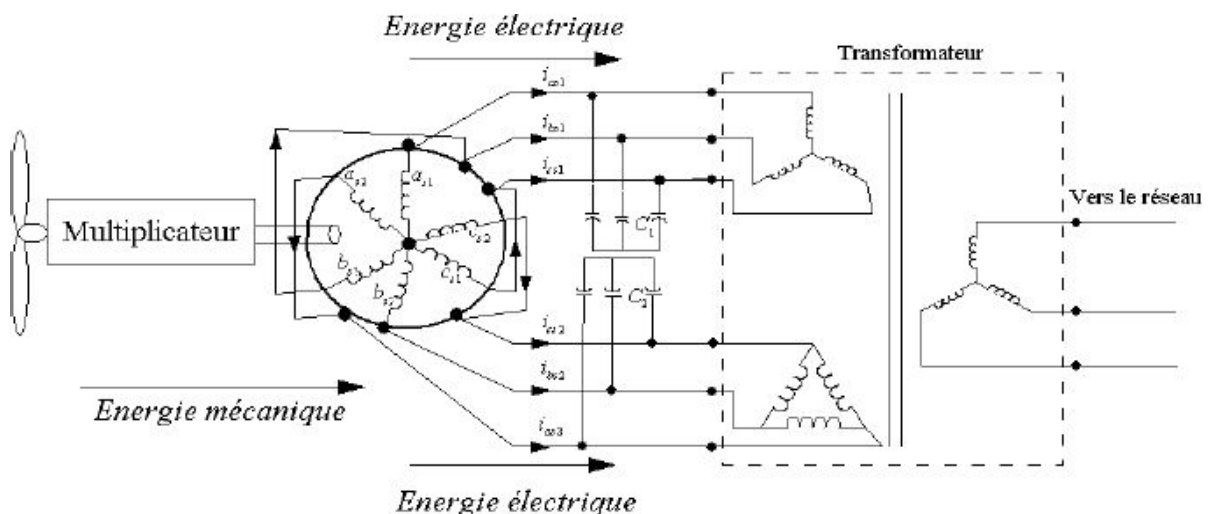


Figure I.8: Système éolien basé sur la machine asynchrone double étoile.

I.9. Energie éolienne en Algérie

I.9.1 Gisement éolien en Algérie

Selon quelques évaluations, plus de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37 % de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3 % de la production d'électricité en 2030. Actuellement, l'intérêt sur l'énergie éolienne en Algérie a connu une certaine croissance et de nombreuses études ont été réalisées sur le potentiel éolien depuis 1984 avec les travaux de Saïd et al. Suivis par les travaux de Bensaâd, 1985, Hammouche, 1990, Kasbadji Merzouk, 2000 et 2006, Youcef Ettoumi, 2002, et Chellali, 2011

I.9.2. Carte des vents en Algérie

L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par Kasbadji-Marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hammouch. En 2011, Chellali et al. Ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [BOU, 13].

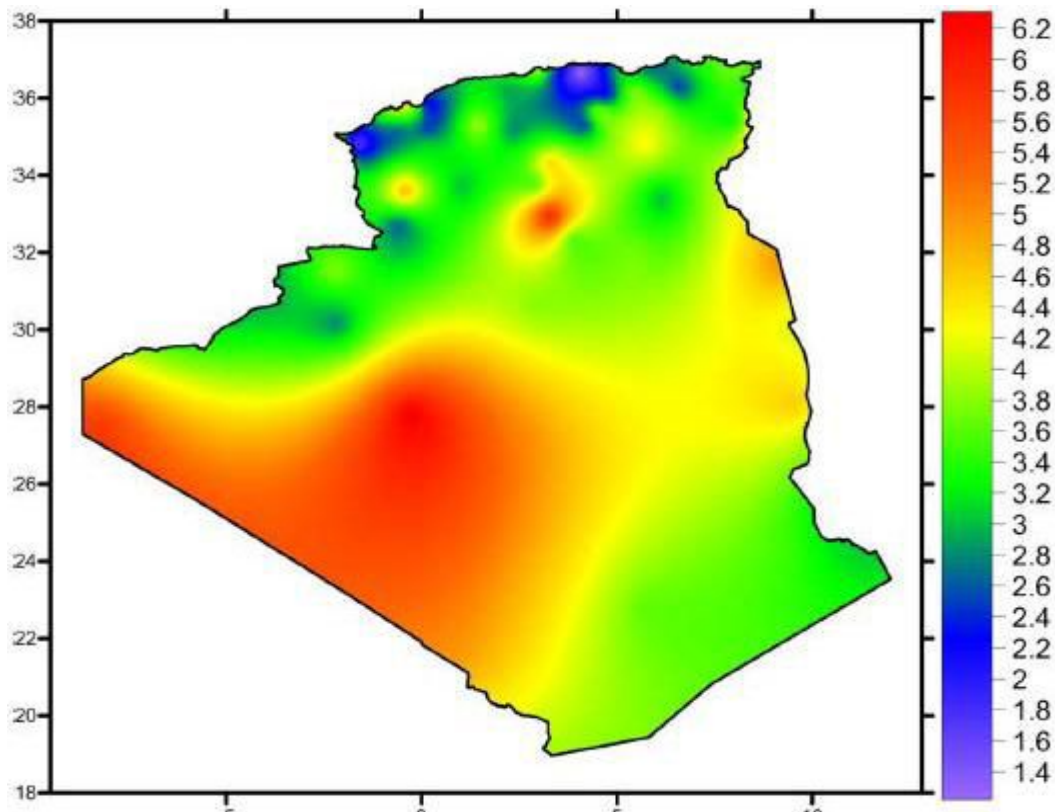


Figure I.9 : Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

Selon la cartographie représentée à la figure I.9, le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

I.10. Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne

I.10.1. Les avantages :

- Le vent est gratuit et inépuisable
- Elle ne génère aucun gaz à effet de serre ni de déchets toxiques
- La souplesse d'utilisation
- L'éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton).
- La simplicité de sa technologie
- Les éoliennes permettent l'électrification en site isolé.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

Chapitre1 : Etat de l'art sur la conversion éolienne

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes.

I.10.2. Les inconvénients

- Risques causés par vents forts ;
- La production d'énergie a lieu en fonction du vent.
- La nuisance sonore et visuelle.
- La création de turbulences de l'air six fois le diamètre du rotor derrière elle.
- La perturbation de la réception des ondes électromagnétiques.
- La production d'énergie a lieu en fonction du vent.
- La nuisance sonore et visuelle.
- La création de turbulences de l'air six fois le diamètre du rotor derrière elle.
- La perturbation de la réception des ondes électromagnétiques. **[BER, 13].**

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes présenté une définition de l'éolienne et ses composants constituant l'aérogénérateur et les types des machines électrique utilisées dans le système éolien.

Dans le second chapitre on va présenter une modélisation des turbines et de la génératrice à double alimentation (GADA).

CHAPITRE 02

MODÉLISATION

DU SYSTÈME DE

CONVERSION

ÉOLIENNE

II.1. Introduction

L'éolienne, qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, est modélisée en prenant en compte ses caractéristiques aérodynamiques, mécaniques et de contrôle. Par ailleurs, la génératrice asynchrone à double alimentation est décrite à travers un ensemble d'équations électriques et mécaniques, permettant d'analyser son fonctionnement en régime permanent et transitoire.

Ce chapitre met en lumière un modèle mathématique de la partie de conversion d'énergie mécanique et modélisation du GADA et du convertisseur qui associé (onduleur).

II.2. Principe physique du vent

Le vent est essentiellement généré par les déplacements des masses d'air chaud et froid. Sous l'effet du soleil, l'air près de la surface terrestre se réchauffe, devient moins dense et s'élève. Cet air chaud laisse un espace vide qui est rapidement occupé par des masses d'air plus froid, créant ainsi des vents locaux. Ce mécanisme se produit également à une échelle plus large entre les régions polaires, où l'air est froid, et les zones équatoriales, où l'air est chaud. En outre, ce phénomène est influencé par la rotation de la Terre, ce qui donne naissance aux vents dominants.

Le vent représente de l'air en mouvement. Comme tout objet en déplacement, il possible de lui attribuer une cinétique énergie qui est déterminée par sa masse (m) et sa vitesse

$$E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} m V^2 \quad [N \cdot m] \quad (2.1)$$

La masse de l'air s'exprime comme le produit du volume occupé (V_o) en mètre cube par la masse volumique (ρ) en kilogramme par mètre cube.

$$m = \rho \cdot V_o \quad (2.2)$$

Dans le cas du vent actionnant une éolienne, le volume occupé dépend de la zone balayée par le rotor. La puissance du vent sur l'éolienne correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor chaque seconde.

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

Le dispositif étudié dans ce travail se compose d'une turbine éolienne équipée de pales d'une longueur (R), Ces dernières transmettent l'énergie mécanique à un générateur électrique

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

via un multiplicateur de vitesse caractérisé par un rapport de transmission G . Ce système permet d'optimiser mécaniques associés au couple et à la vitesse de rotation (Figure II.1).

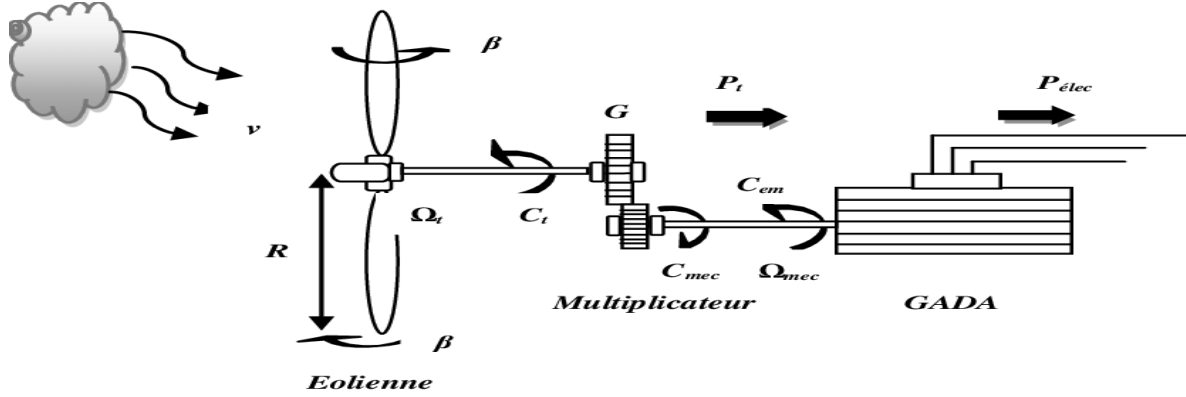


Figure II.1 : Schéma de la turbine éolienne.

II.3.1 Modèle énergétique de la turbine

La puissance éolienne, communément désignée comme puissance du vent S s'exprime par la relation physique suivante : [BAN, 22]

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.3)$$

Où :

V : La vitesse du vent.

ρ : La densité de l'air (approximativement 1.22 Kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

La puissance aérodynamique de la turbine éolienne est alors : [ELO, 21]

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.4)$$

Le coefficient de puissance est défini par le ratio de la puissance captée par la turbine sur la puissance du vent :

$$C_p = \frac{P_{aer}}{P_v} \quad (2.5)$$

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

L'évolution du C_p dépend de l'angle d'orientation des pales β et de la vitesse spécifique λ :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (2.6)$$

Où

$\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

L'expression du coefficient de puissance est donnée par : **[ELA, 04]**

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{10 - 0.3 \cdot \beta}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (2.7)$$

Le couple de la turbine est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine $\Omega_{turbine}$ alors : **[BAN, 22]**

$$T_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (2.8)$$

II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

La turbine est généralement connectée à l'arbre du générateur via un multiplicateur, dont le rapport de vitesse (G) est choisi pour ajuster la vitesse de l'arbre du générateur à une plage de vitesse souhaitée. En supposant que les pertes de transmission sont négligeables, **[BEK, 14]** le couple et la vitesse de la turbine sont ramenés du côté du générateur par les relations suivantes :

$$\begin{cases} T_g = \frac{T_{aer}}{G} \\ \Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \end{cases} \quad (2.9)$$

II.3.3 Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine se compose de trois pales orientables de longueur (R). Ces pales sont fixées à un arbre d'entraînement tournant à une vitesse (Ω), qui est relié à la gaine de multiplicateur de rapport (G). Ce multiplicateur transmet ensuite le mouvement à une génératrice électrique. Les trois pales sont supposées identiques en conception. De plus, on considère que la vitesse du vent est uniformément répartie sur toutes les pales, ce qui

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

implique que les forces de poussée agissant sur chaque pale sont égales. Par conséquent, l'ensemble des trois pales peut être modélisé comme un système mécanique unique, caractérisé par la somme de toutes les propriétés mécaniques, [MER, 13] comme illustré dans la (Figure II.2) :

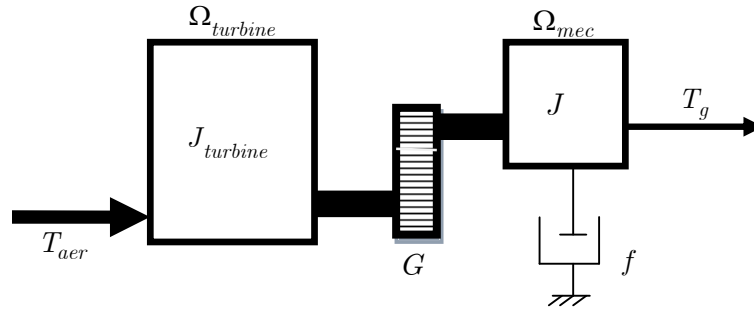


Figure II.2 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

$J_{turbine}$: Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;

J : Le moment d'inertie de la GADA ;

f : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA ;

T_g : Le couple mécanique sur l'arbre de la GADA ;

Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la GADA ;

La masse de la turbine éolienne est modélisée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie. ($J_{turbine}$) Inclut à la fois la masse des pales et celle du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé intègre l'inertie totale (J_t), composée de l'inertie de la turbine ramenée au rotor de la génératrice et de l'inertie propre de la génératrice. [KHE, 17]

$$J_t = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J \quad (2.9)$$

Il est important de noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible comparée à l'inertie de la turbine ramenée par cet axe. À titre d'exemple, pour une éolienne Vesta de 2 MW, une pale mesure 39 mètres de long et pèse 6,5 tonnes. L'équation fondamentale de la

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique en fonction du couple mécanique total (T_{em}) appliqué au rotor. [ELA, 04]

$$J_t \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} \quad (2.10)$$

Où : J_t est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique T_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux T_{vis} , et le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice T_g .

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad (2.11)$$

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

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

II.4 Notion sur machine asynchrone à double alimentation

II.4.1 Description générale de la machine asynchrone à double alimentation

La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation), également appelée en anglais (Doubly-Fed Induction Machine (DFIM)), est une machine asynchrone triphasée à courant alternatif. Elle se distingue par la présence de deux enroulements triphasés accessibles, permettant à la puissance d'être injectée ou extraite de la machine via ces enroulements [HAM, 12].

Ce type de machine présente un avantage majeur : elle nécessite une seule source d'alimentation alternative, capable d'alimenter les deux côtés de la machine (statorique et rotorique). Cette caractéristique est particulièrement bénéfique dans les applications d'entraînement et de génération à vitesse variable, où le glissement peut être ajusté grâce à l'utilisation de convertisseurs de puissance connectés au stator, au rotor, ou aux deux simultanément. Le choix de la configuration dépend principalement des critères technico-économiques liés à la conception de la machine.

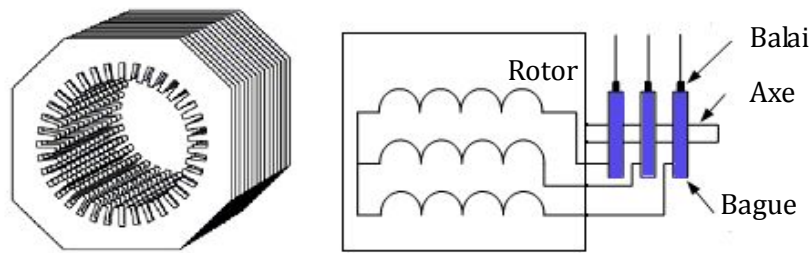


Figure II.3 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

II.4.2 Mode de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

En général, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme [ARI, 19].

Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [POI, 03]

- ♦ La puissance est fournie par le réseau au stator.
- ♦ La puissance de glissement est renvoyée au réseau dans le système adaptes (cascade hypo-synchrone).
- ♦ Pour les machines à cage, la puissance de glissement est dissipée en chaleur dans le rotor.
- ♦ Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme

Ce type de fonctionnement est démontré dans la figure II.4.c

Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

La figure (II.4.d) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator, tandis que la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. Cela correspond à un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. Il est à noter qu'une machine asynchrone à cage classique ne peut pas fonctionner selon ce mode [ZEG, 20].

En mode moteur hyper-synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau est transmise au rotor et convertie en puissance mécanique [POI, 03].

Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

La puissance est principalement fournie par le stator au réseau électrique. Cependant, une partie de cette puissance est réabsorbée par le rotor. Ce mode de fonctionnement est caractéristique des machines fonctionnant à une vitesse de rotation inférieure à la vitesse de synchronisme. Il est important de noter qu'une machine asynchrone à cage ne peut pas opérer dans ce mode de fonctionnement [AEI-HAM, 19].

Ci-dessous, la figure (II.4.a) illustre ce principe de fonctionnement

Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

La figure (II.4.b) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator tandis que la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée dans le réseau. Cela correspond à un fonctionnement en mode générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

Il est important de noter qu'une machine asynchrone à cage classique peut également fonctionner dans ce mode, mais dans ce cas, la puissance de glissement est dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor [ZEG, 20].

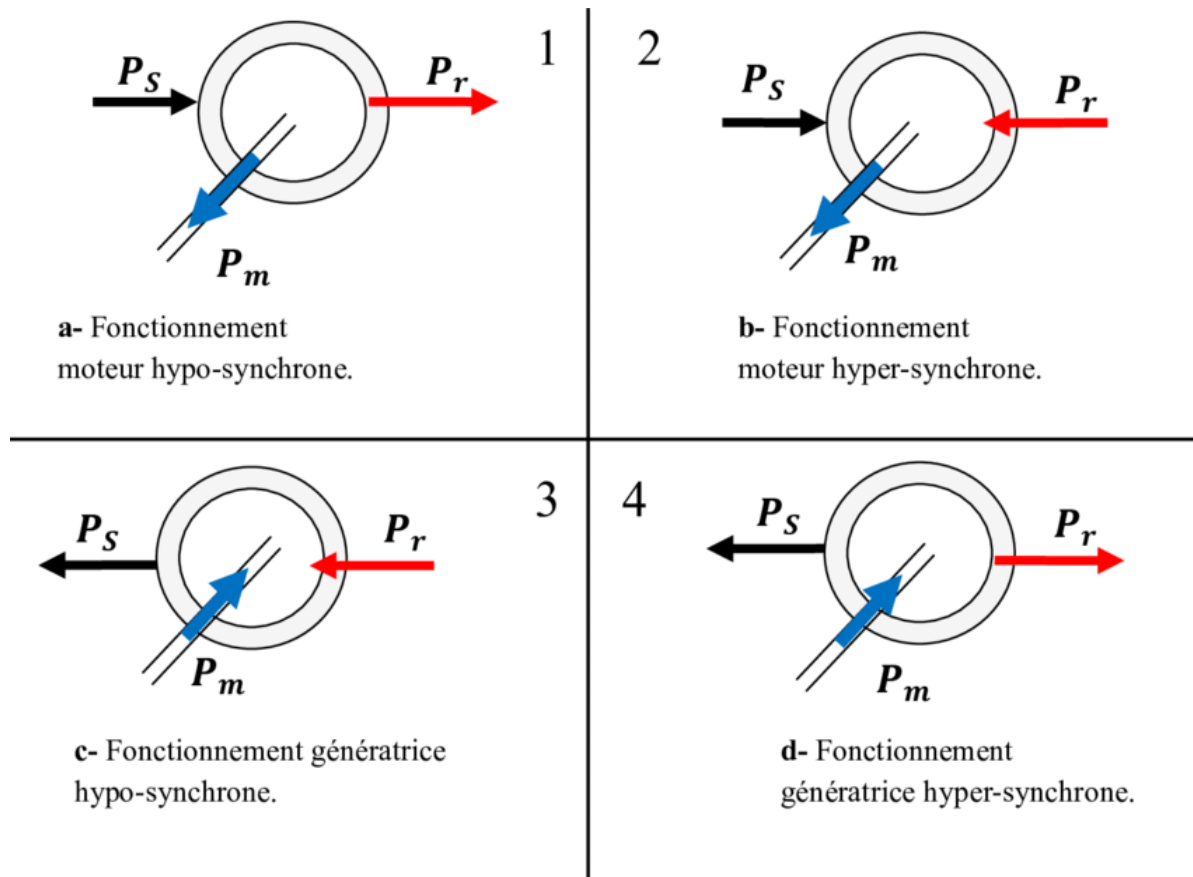


Figure II.4 : Modes de fonctionnement de MADA.

II.4.3 Structure générale d'un système éolien à base d'une MADA

Le système éolien à vitesse variable basé sur une MADA est illustré sur la figure (II.5). La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée directement au réseau électrique par le stator et également au travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par un rotor muni de systèmes bagues/balais.

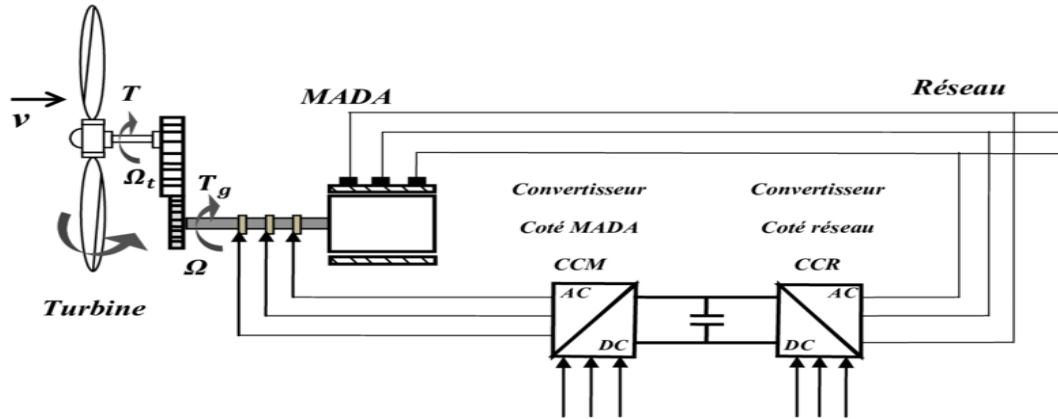


Figure II.5 : Eolienne à vitesse variable à base d'une MADA.

II.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est constituée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator comporte trois enroulements connectés en étoile ou en triangle, alimentés par un système de tensions triphasées. Cela entraîne la création d'un champ magnétique tournant dans l'entrefer de la machine (théorème de Ferraris). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est donnée par $(\Omega_s = \frac{\omega_s}{p})$ où ω_s représente la pulsation du réseau d'alimentation triphasé du stator, et (p) le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine possède également un enroulement triphasé avec le même nombre de paires de pôles que celui du stator [EKA, 03].

La machine asynchrone à double alimentation est représentée dans le système triphasé par la figure suivante.

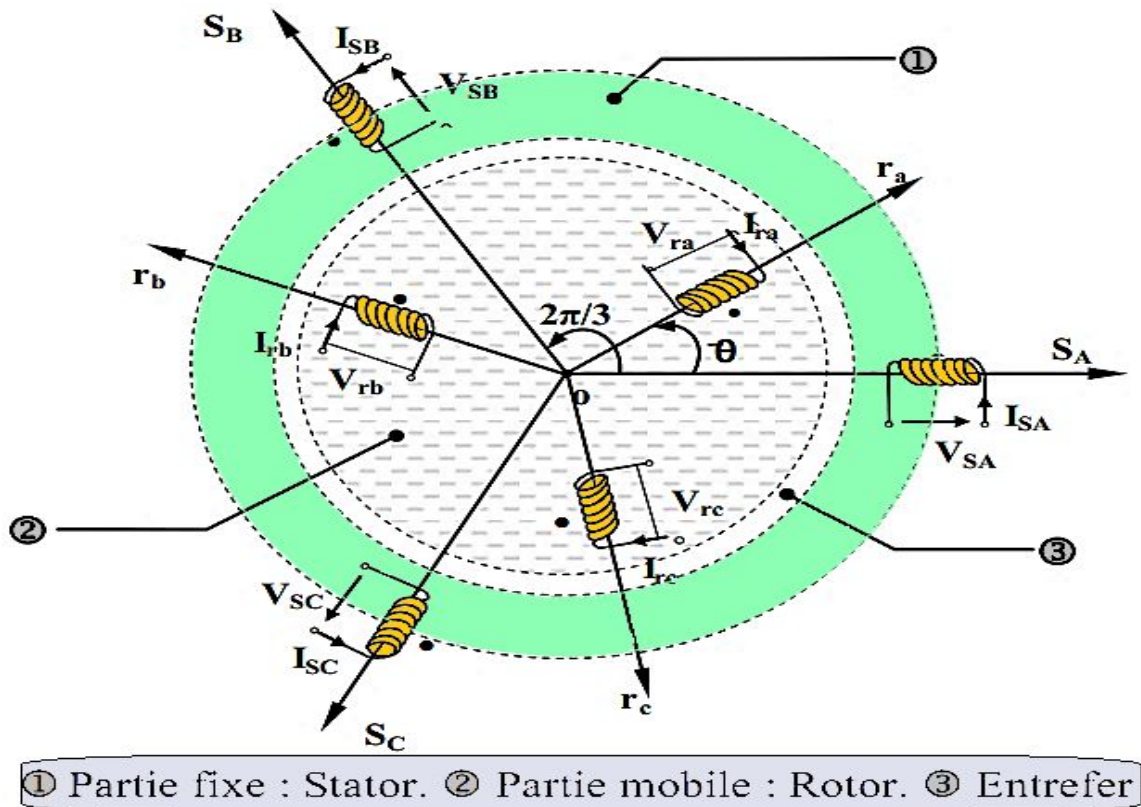


Figure II.6 : Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée.

II.5.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente une configuration complexe, notamment en raison de la répartition de ses enroulements et de sa géométrie spécifique. Cette complexité rend difficile une analyse précise tenant compte de sa configuration exacte. Par conséquent, pour établir un modèle simplifié, certaines hypothèses simplificatrices sont nécessaires lors de la mise en équations. Ces hypothèses sont les suivantes [MER-BOU, 21] :

- L'entrefer est considéré comme ayant une épaisseur uniforme, et l'effet d'encoche est négligé.
- La force magnétomotrice est supposée avoir une répartition spatiale sinusoïdale.
- La machine est considérée comme symétrique et équilibrée, tant au niveau du rotor que du stator.
- Les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligées.
- Les résistances des enroulements sont supposées constantes, indépendantes de la température.

II.5.2 Les équations électriques

La loi de Faraday, qui exprime la tension v aux bornes d'une bobine, est donnée la relation suivante :

$$v(t) = R i(t) + \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (2.13)$$

Appliquons cette relation aux enroulements triphasés du stator et du rotor, nous trouvons :

▪ **Pour le stator**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (2.14)$$

Où

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.15)$$

▪ **Pour le rotor**

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{cases} \quad (2.16)$$

Où

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.17)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}, \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

Et :

$[V_s] = [v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}]^T$: Vecteur des tensions instantanées des phases a, b et c statoriques ;

$[I_s] = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[\Phi_s] = [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[V_r] = [v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}]^T$: Vecteur des tensions instantanées des phases a, b et c rotoriques ;

$[I_r] = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$: Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

$[\Phi_r] = [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

R_s et R_r : Résistances d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement;

II.5.3 Les relations flux – courants (relations électromagnétiques)

Ces équations sont données par :

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M][I_r] \quad (2.15)$$

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M][I_s] \quad (2.16)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix},$$

$$[M] = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Avec :

l_{ss} et l_{rr} : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement ;

m_{ss} et m_{rr} : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases

rotoriques, respectivement ;

II.5.4 La transformation de Park

La transformation de Park permet de convertir les courant, tension et flux d'un système triphasé (a, b, c) en un système diphasé (d, q). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère comme le montre la figure

Remarque :

- Cette transformation permet la conservation de la puissance instantanée.

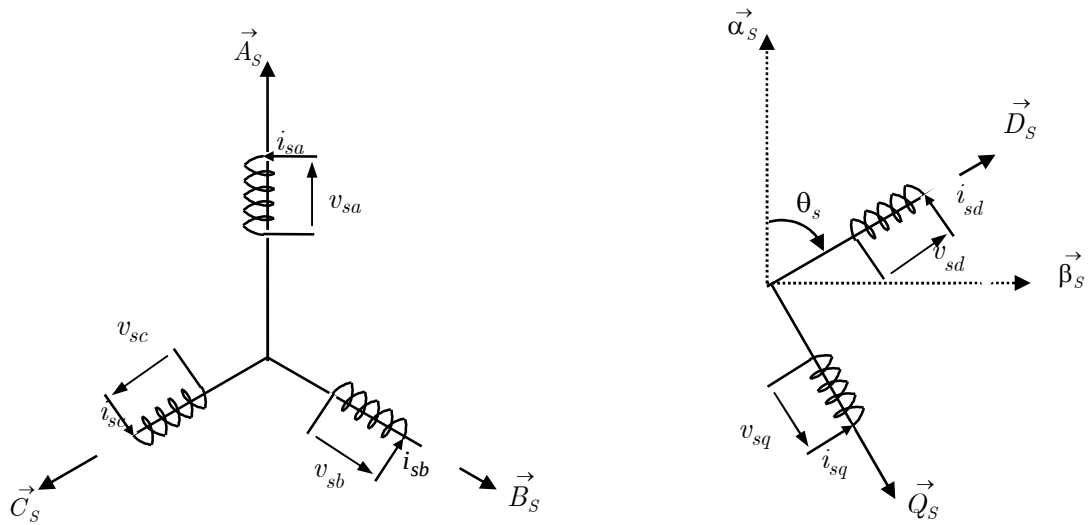


Figure II.7 : Repérage angulaire du système d'axes ($d - q$) associé au stator de la MADA.

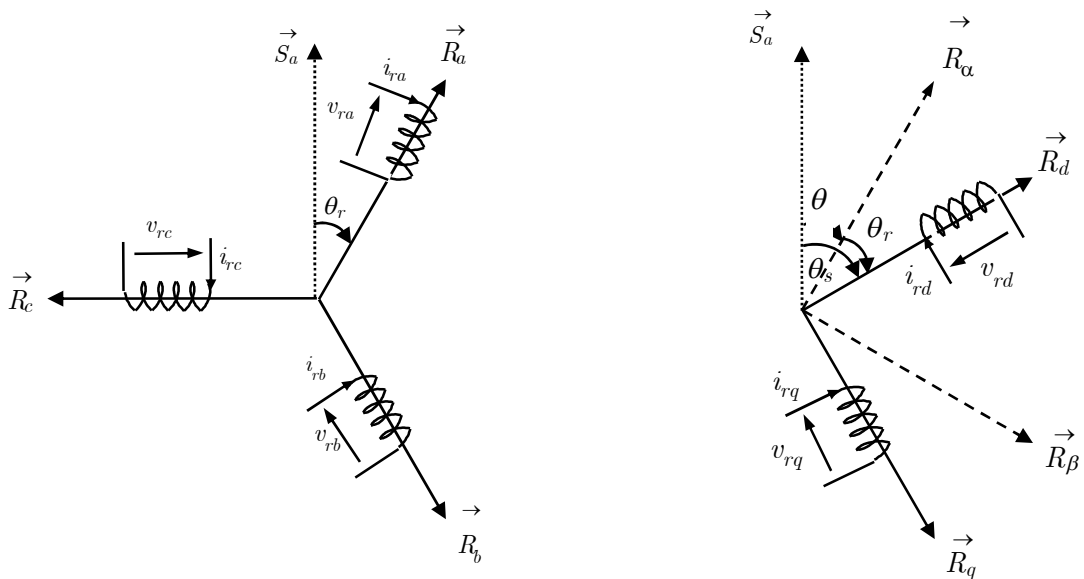


Figure II.8 : Repérage angulaire du système d'axes ($d - q$) associé au rotor de la MADA.

Chapitre 02 : Modélisation du système de conversion éolienne

Nous remarquons sur la figure (II.8) que θ_s et θ_r sont liés naturellement à θ par la relation rigide :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (2.17)$$

Et par les équations suivantes :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2.18)$$

La transformation matricielle définissant la transformation de Park est la suivante [MEZ, 06] :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (2.19)$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Et

$$[P(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

II.5.5 Choix du référentiel

En général l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique [TRI, 13]

Référentiel fixe au stator (référentiel stationnaire $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$) : Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.

Référentiel fixé au rotor (référentiel tournant $\frac{d\theta_r}{dt} = 0; \omega = p \cdot \Omega$): Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.

Référentiel fixé au champ tournant statorique (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$): Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande. Les axes sont désignés par (d, q) .

II.6. Modèle diphasé de la MADA

En considérant le choix du repère (d_q) lié au champ tournant statorique et en négligeant la résistance des bobinages statorique, une simplification des équations électriques de la MADA peut être obtenue [BEN, BEL, 23] :

Equations électriques

La substitution des enroulements fictifs S_d, S_q, R_d, R_q aux enroulements triphasés du modèle (2.14), (2.16) permet l'écriture des équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.22)$$

Equation magnétique (Relations flux – courants)

Nous appliquons la transformation de Park aux relations entre flux et courants, nous trouvons les relations électromagnétiques de la machine généralisée:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (2.23)$$

Ou:

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{sq} \end{cases} \quad (2.24)$$

Avec:

$$L_s = l_{ss} - m_{ss}, L_r = l_{rr} - m_{rr}, M = \frac{3}{2} m_{sr} \quad (2.25)$$

Equation mécanique

L'équation mécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = T_{em} - T_r \quad (2.26)$$

Avec : $\Omega = \frac{\omega}{p}$

Le couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous différentes formes. Celle qui sera utilisée pour concevoir le système de commande utilise uniquement les grandeurs au stator [ELA, 04] :

$$T_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (2.27)$$

Ou :

$$T_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (2.28)$$

Puissances statoriques

Les expressions des puissances active et réactive statoriques, sont exprimés par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Réal}[\bar{S}_s] \\ Q_s = \text{Im}[\bar{S}_s] \end{cases} \quad (2.29)$$

Après la transformation de Park, nous trouvons :

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (2.30)$$

Représentation des équations de la MADA dans le repère de Park [**GEO**, 07]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + \omega_s \cdot \phi_{sq} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} + v_{sd} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = -\omega_s \cdot \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} + v_{sq} \\ \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sq} - (R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s) i_{rd} + \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \left(v_{rd} - \frac{M}{L_s} v_{sd} \right) \\ \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} - \sigma L_r \omega_r i_{rd} - (R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s) i_{rq} + \left(v_{rq} - \frac{M}{L_s} v_{sq} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_{em} - C_r) - \frac{F}{J} \cdot \omega \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Où :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \text{ Est le coefficient de dispersion des flux magnétiques.}$$

II.7. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur électronique de puissance dont le rôle principal est de transformer le courant continu en courant alternatif. Son principe de fonctionnement repose sur des composants tels que des transistors (IGBT, GTO, MOSFET) et une commutation forcée. Les méthodes de commande peuvent être classiques ou s'appuyer sur la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Dans le cadre de cette étude, c'est la technique MLI qui est retenue pour piloter un onduleur de tension. Structuellement, cet onduleur comprend trois bras distincts, chacun associant deux interrupteurs. Chaque interrupteur intègre un transistor et une diode montés en antiparallèle, permettant ainsi de réguler les tensions ou courants délivrés à la machine avec une amplitude et une fréquence ajustables. Concernant l'alimentation du rotor de la MADA, celle-ci est assurée par un onduleur de tension bipolaire équipé de semi-conducteurs commandés (ouverts ou fermés électriquement). Pour faciliter la modélisation du convertisseur, une hypothèse simplificatrice est adoptée : les interrupteurs semi-conducteurs sont considérés comme idéaux, sans pertes ni délais de commutation [**LAK**, 24].

Le schéma détaillé du convertisseur assurant l'alimentation rotorique de la machine est représenté par la figure suivant :

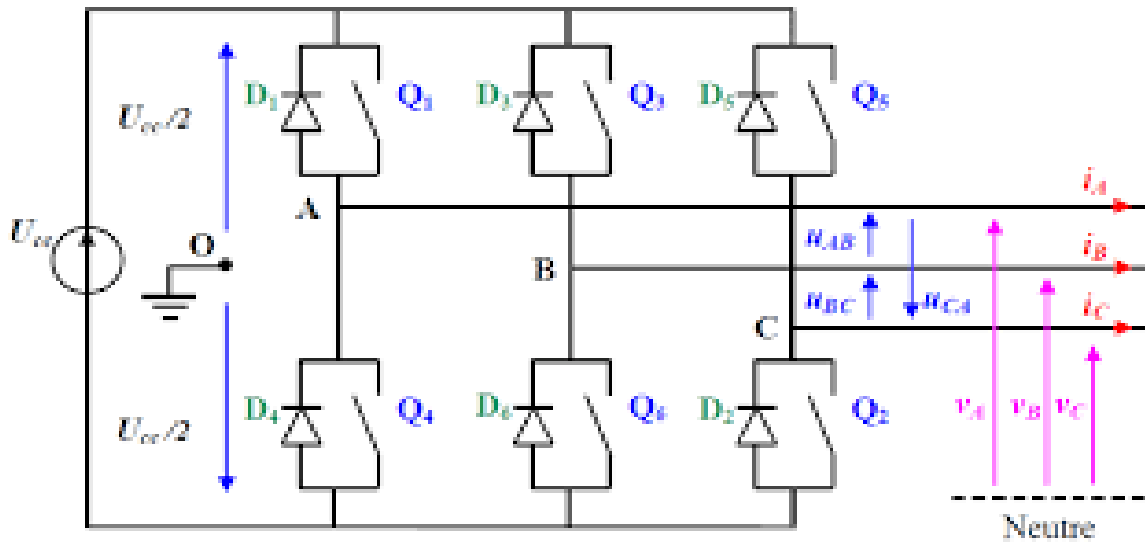


Figure II.9 : représentation schématique d'un onduleur de tension.

II.7.1 Principe de la commande MLI

Cette innovation technologique a pour objectif d'optimiser la pureté des tensions générées en les rapprochant d'une forme sinusoïdale idéale. Ce résultat est obtenu grâce à une commutation plus rapide des composants électroniques, permettant ainsi de limiter la génération d'harmoniques indésirables. Cette approche contribue à diminuer les déperditions énergétiques tout en améliorant l'efficacité globale du système.

Le fondement de la modulation par largeur d'impulsions (MLI) repose sur une comparaison permanente entre une onde triangulaire haute fréquence (signal porteur) et trois signaux sinusoïdaux basse fréquence (références de tension). Les points de croisement entre ces courbes déterminent précisément le chronométrage d'activation et de désactivation des commutateurs, pilotant ainsi la forme d'onde finale. [BEN, 24]

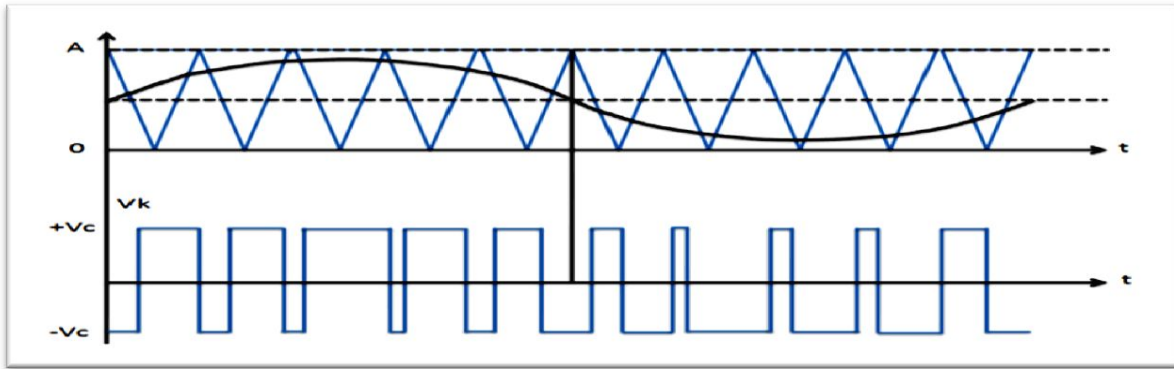


Figure II.10 : principe de commande MLI.

II.8.Conclusion

Ce chapitre a abordé la modélisation des éoliennes et de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en mettant en avant l'optimisation de la conversion de l'énergie éolienne.

Pour cela, on aura recours à ce que l'on appelle la commande vectorielle par orientation de flux statorique qui est l'objectif du chapitre suivant.

CHAPITRE 03

COMMANDE

VECTORIAELLE

DE LA GADA

III.1. Introduction

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans ce chapitre, nous allons étudier la commande vectorielle de la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice intégrée dans système éolien.

III.2. Commande vectorielle

La commande vectorielle constitue l'une des approches de régulation utilisées pour les machines électriques. Cette méthode permet d'instaurer un fonctionnement découplé en optimisant le positionnement des vecteurs de courant et des vecteurs de flux résultants. En effet, elle facilite l'assimilation du comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant d'induit. **[BEN, 13]**.

On peut les classer en différentes catégories:

♦ Suivant la source d'énergie:

Commande en tension.

Commande en courant.

♦ Suivant les opérations désirées pour le flux :

Commande vectorielle de flux rotorique.

Commande vectorielle de flux statorique

Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).

♦ Suivant la détermination de la position du flux

Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase).

Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement

III.3. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle, également désignée sous le terme de commande par orientation de champ (FOC - Field-Oriented Control), constitue une méthode

de régulation employée dans les systèmes de contrôle des moteurs électriques, notamment pour les moteurs à courant alternatif (AC) tels que les moteurs asynchrones ou les moteurs synchrones équipés d'aimants permanents. La fondation de la commande vectorielle repose sur la capacité à gérer de manière indépendante le flux magnétique et le couple du moteur électrique. Historiquement, les moteurs AC étaient régulés par des méthodes basées sur la tension ou la fréquence, ce qui ne permettait pas un contrôle précis et réactif. La commande vectorielle a été conçue pour pallier ces limitations. Cette technique implique la transformation des grandeurs électriques triphasées du moteur (courants et tensions) d'un système triphasé en un système de référence bidimensionnel, connu sous le nom de système de référence direct-quadratique. Dans ce cadre, la composante directe représente le flux magnétique généré par le moteur, tandis que la composante quadratique correspond au couple. Grâce à des algorithmes de commande avancés, la commande vectorielle permet de réguler de manière indépendante le flux et le couple en modulant les composantes directes et quadratiques du courant alimentant le moteur. Cela conduit à un contrôle précis et à des performances optimales en matière de dynamique, d'efficacité et de réactivité face aux variations de charge. [BOU, 09].

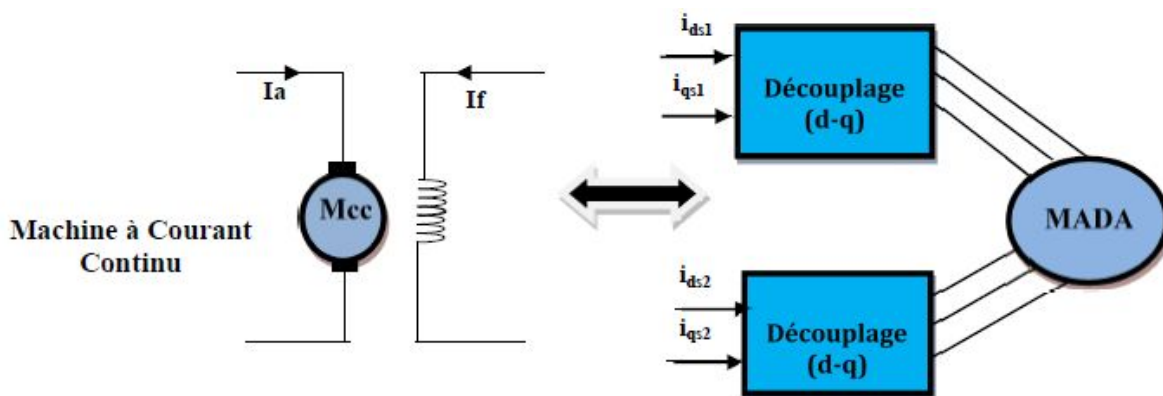


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle.

III.4. Synthèse de la commande à flux orienté de la GADA

Pour faire la régulation des puissances de la GADA, nous examinons le modèle électrique suivant:

$$\begin{cases} v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \\ v_{sq} = \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} \\ \left(v_{rd} - \frac{M}{L_s} v_{sd} \right) = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sq} + \left(R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} \\ \left(v_{rq} - \frac{M}{L_s} v_{sq} \right) = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \left(R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rq} \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$ est le facteur de dispersion.

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (3.2)$$

III.5. Orientation par flux statorique

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par une autre composante. Pour cela, on choisit un référentiel diphasé (dq) lié au champ statorique et on aligne le vecteur flux statorique sur l'axe (d) du référentiel et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. [TAM, 06].

Comme il est illustré dans la figure (III.2). Le flux sera callé sur l'axe (d) et la tension du stator sur l'axe (q).

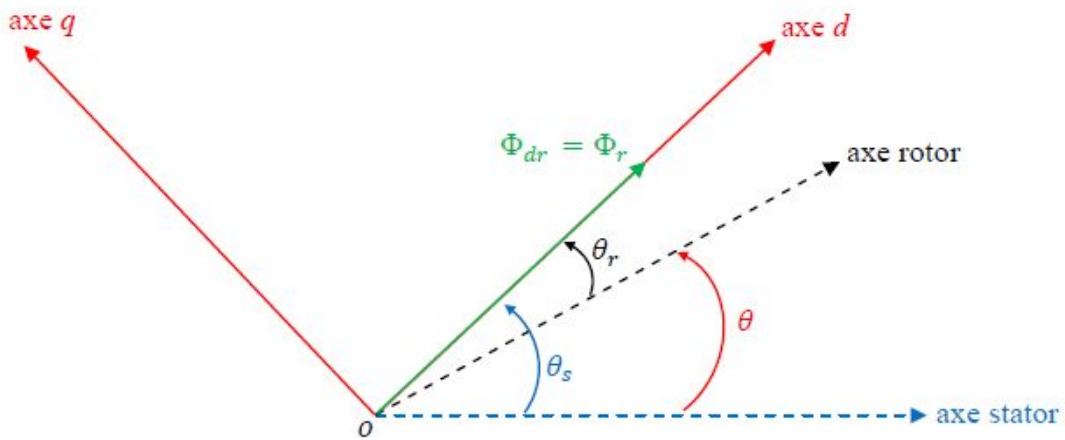


Figure III.2 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Chapitre 03 : Commande Vectorielle de la GADA

Avec cette orientation, Le modèle issu de la GADA se simplifie et le système de commande qui en découle l'est également.

Ainsi, nous obtenons $\phi_{sq} = 0$ et $\phi_{sd} = \phi_s$.

Donc, Nous avons la possibilité de formuler les équations des tensions statorique et rotoriques de la machine de la manière suivante :

♦ Tensions statoriques

$$\begin{cases} v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \\ v_{sq} = \omega_s \cdot \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (3.3)$$

♦ Tensions rotoriques

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + (R_r + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{M}{L_s} R_s) i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} v_{sd} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + (R_r + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{M}{L_s} R_s) i_{rq} + \frac{M}{L_s} v_{sq} \end{cases} \quad (3.4)$$

En remplaçant les équations des tensions statoriques (3.3) dans les équations des tensions rotoriques (3.4), nous obtenons le modèle suivant:

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.5)$$

En posant les *f.e.m* suivantes :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.6)$$

Nous réussissons alors :

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} + f_{em,d} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + f_{em,q} \end{cases} \quad (3.7)$$

Chapitre 03 : Commande Vectorielle de la GADA

Avec la transformé de Laplace, nous écrivons :

$$\begin{cases} (\sigma L_r \cdot s + R_r) i_{rd} = v_{rd} - f_{em,d} \\ (\sigma L_r \cdot s + R_r) i_{rq} = v_{rq} - f_{em,q} \end{cases} \quad (3.8)$$

Ou :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) \\ i_{rq} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir de ces équations, nous pouvons repérer le schéma bloc du modèle simplifié des courant rotoriques de la GADA suivant la figure (III.3) :

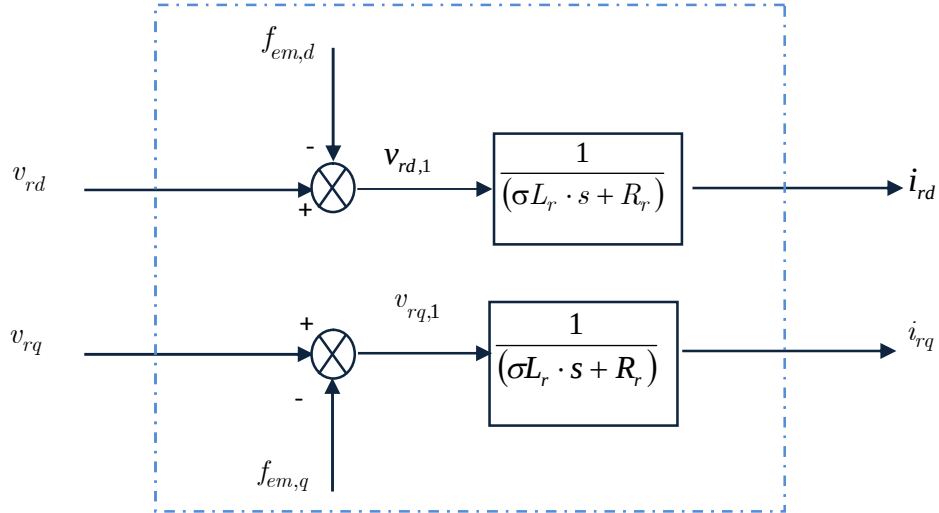


Figure III.3 : Modèle simplifié des courants rotoriques de la GADA.

♦ Puissances statoriques

Dans le repère de Park, les puissances statoriques active et réactive d'une machine asynchrone à double alimentation s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (3.10)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($v_{ds} = 0, v_{qs} = cst = V_s$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{sq} \\ Q_s = V_s i_{sd} \end{cases} \quad (3.11)$$

D'après les relations flux – courants (2.23), les flux statoriques s'écrivent :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Après orientation du flux statoriques, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ 0 &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Donc :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (3.14)$$

Alors :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(i_{rd} - \frac{\phi_s}{M} \right) \end{cases} \quad (3.15)$$

Cette dernière équation peut être représentée par le schéma bloc suivant :

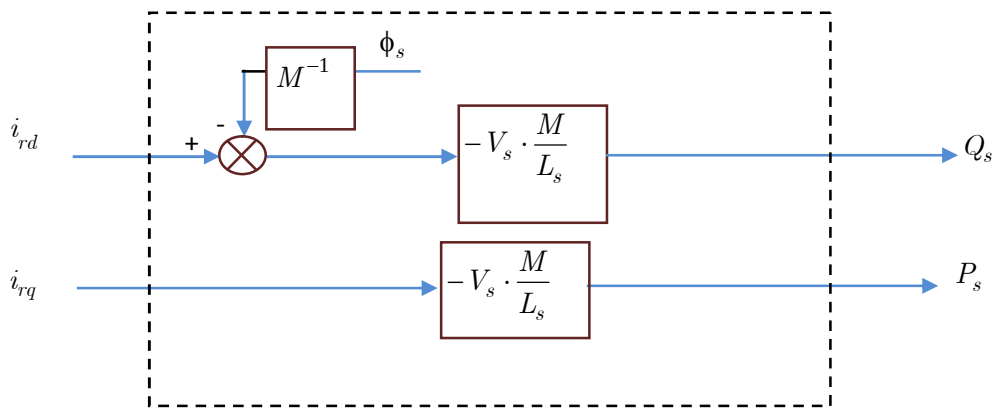


Figure III.4 : Modèle simplifié des puissances statoriques de la GADA.

III.6 Modèle simplifié de la GADA avec orientation du flux statorique

Dans ces situations, nous pouvons effectuer un modèle simplifié pour les enroulements rotoriques de la GADA suivant la figure (III.5) :

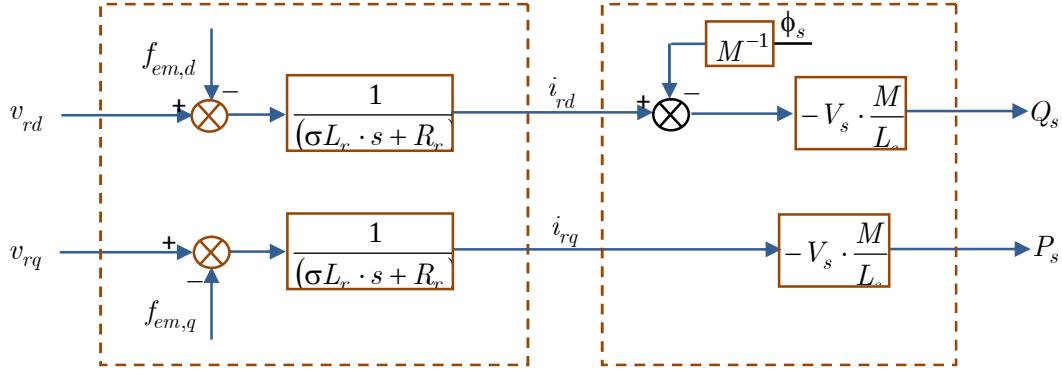


Figure III.5 : Modèle réduit des puissances statoriques de la GADA.

Pour cette représentation, nous considérons les tensions rotorique v_{rd}, v_{rq} comme variables de commande et les courants rotoriques i_{rd}, i_{rq} comme variables d'état intermédiaires.

III.6.1 Estimation du flux statorique $\phi_{sd} = \phi_s$

Étant donné les désavantages associés à l'implémentation des capteurs destinés à mesurer le flux statorique, Hasse a suggéré une approche fondée sur le modèle dynamique des flux magnétiques, permettant ainsi une estimation à partir de grandeurs aisément mesurables telles que les tensions et les courants. [HAS, 69].

♦ Estimation de ϕ_{sd} à partir de l'équation différentielle :

A partir du modèle orienté de la machine :

$$v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \quad (3.16)$$

D'après la transformation de Laplace, nous obtenons :

$$\left(s + \frac{R_s}{L_s} \right) \phi_{sd} = v_{sd} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \quad (3.17)$$

Donc :

$$\phi_{sd} = \frac{1}{s + \frac{R_s}{L_s}} \left(v_{sd} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \right) \quad (3.18)$$

♦ **Détermination de ϕ_{sd} à partir de la mesure des courants :**

A partir de l'équation (3.14), la composante directe du flux statorique s'écrit :

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (3.19)$$

♦ **Estimation de ϕ_{sd} à partir du régime permanent :**

D'après le modèle de base de la GADA de l'équation (2.31), nous avons :

$$\frac{d}{dt} \phi_{sq} = v_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (3.20)$$

Si nous négligeons les chutes de tension $R_s \cdot i_{sd}$ et $R_s \cdot i_{sq}$, nous pouvons écrire :

$$\frac{d}{dt} \phi_{sq} = v_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (3.21)$$

Pour $\phi_{sq} = 0$:

$$0 = v_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (3.22)$$

Cela signifie

$$\phi_{sd} = \frac{v_{sq}}{\omega_s} \quad (3.23)$$

Ou :

$$\phi_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.24)$$

III.6.2 Mise en évidence des termes de couplage

Les termes $f_{em,d}$ et $f_{em,q}$ correspondent aux termes de couplage entre les axes (d) et (q) sont données par :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = -\sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \cdot \omega_r \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.25)$$

En utilisant l'équation (3.24), nous obtenons :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -g \sigma L_r \omega_s i_{rq} \\ f_{em,q} = +g \sigma L_r \omega_s i_{rd} + g \frac{M}{L_s} V_s \end{cases} \quad (3.26)$$

III.7. Réglage des puissances statoriques du GADA

La commande vectorielle à flux rotorique orienté, est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique.

III.7.1. Méthode directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. L'appellation commande directe vient du fait que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine. L'intérêt que présente cette méthode est que sa mise en œuvre est simple.

Pour réguler la GADA, nous avons mis en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur PI. [RAH, TEG, 14].

III.7.1.1 commande directe

Dans la méthode directe, l'idée de la régulation consiste à commander indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la GADA.

♦ Schéma de bloc en boucle ouverte

Par la substitution des courants rotoriques de l'équation (3.9) dans l'équation (3.15), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(\frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) - \frac{\phi_{sd}}{M} \right) \end{cases} \quad (3.27)$$

Ou :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) + V_s \cdot \frac{\phi_{sd}}{L_s} \end{cases} \quad (3.28)$$

Avec

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.29)$$

Selon le modèle des puissances (3.28), le contrôle des puissances de la GADA consiste à gérer les deux puissances et par les deux composantes et. Il est également à noter qu'il existe un fort couplage entre les puissances statoriques et les tensions rotoriques selon le modèle de puissance (3.28). Nous constatons que les deux puissances incluent des termes croisés. Par conséquent, un découplage est nécessaire pour contrôler ces puissances de manière indépendante. Dans ce contexte, nous appliquons un découplage par compensation. À partir des équations (3.28), nous pouvons établir le schéma bloc simplifié de la GADA :

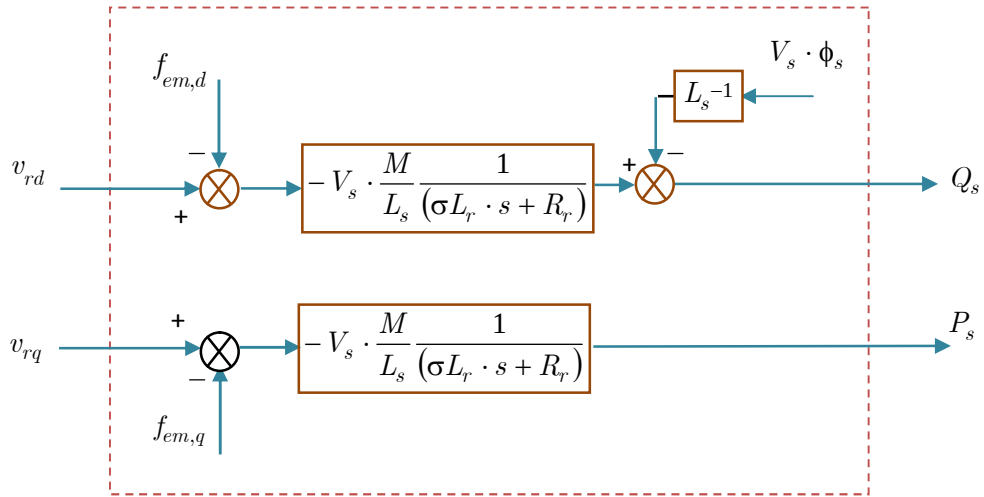


Figure III.6: Modèle réduit des puissances statoriques de la GADA.

III.7.1.2. Schéma bloc de la régulation

Afin de contrôler les puissances statoriques de la machine, nous allons établir une boucle de régulation pour chaque puissance, accompagnée d'un correcteur autonome, tout en tenant compte des termes de perturbation présents dans le schéma bloc illustré à la figure (III.6). Cela nous permet d'atteindre un découplage par compensation, rendant ainsi les axes et complètement indépendants, comme le démontre la figure (III.7).

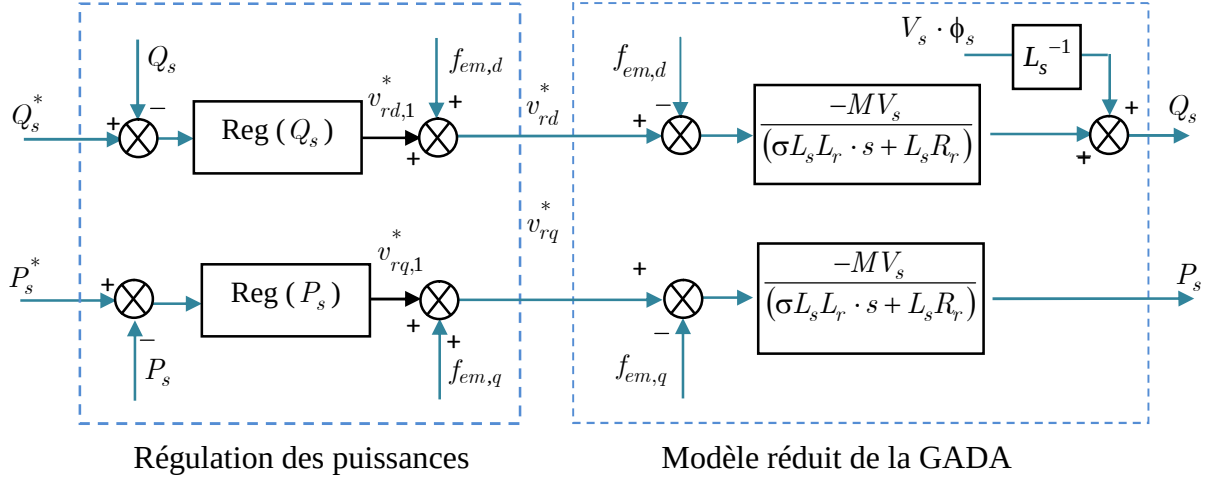


Figure III.7 : Contrôle des puissances statoriques de la GADA.

Nous aboutissons alors aux schémas blocs simples et identiques pour les deux puissances statoriques :

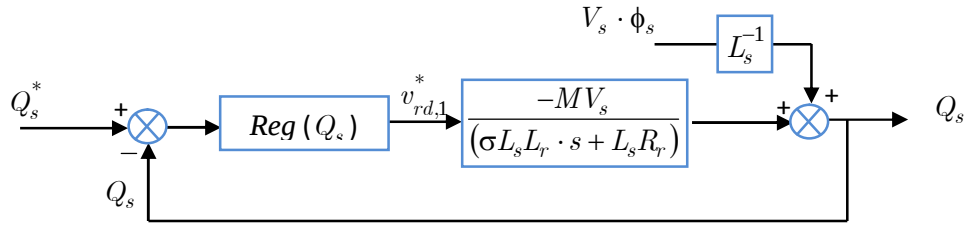


Figure III.8 : Boucle de régulation de la puissance Q_s après découplage.

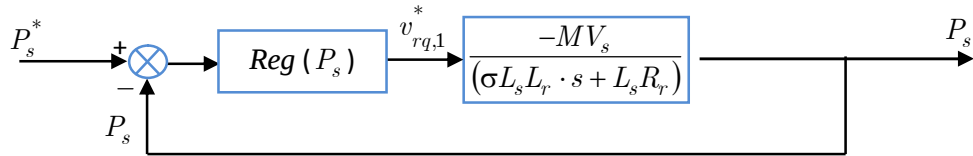


Figure III.9 : Boucle de régulation de la puissance P_s après découplage.

III.7.1.3. Synthèse des correcteurs

Le régulateur Proportionnelle Intégrale (PI) employé pour ajuster les puissances de la GADA est à la fois simple et rapide à mettre en œuvre, tout en garantissant des performances satisfaisantes. L'action proportionnelle ajuste la rapidité de la dynamique du système, tandis que l'action intégrale vise à supprimer l'écart entre la valeur de consigne et celle que l'on souhaite contrôler. Sa fonction de transfert est :

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.30)$$

Avec

$$\begin{cases} A = \frac{-MV_s}{L_s R_r} \\ T = \sigma T_r \end{cases} \quad (3.32)$$

La boucle de régulation du courant i_{rd} est représentée par la figure (III.10) :

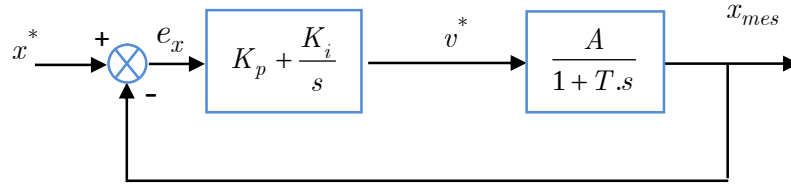


Figure III.10: Système à régulé par un correcteur PI.

La fonction transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les correcteurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{A}{T}(K_p \cdot s + K_i)}{s^2 + s\left(\frac{1 + A \cdot K_p}{T}\right) + \frac{A \cdot K_i}{T}} \quad (3.33)$$

Le dimensionnement du correcteur se réalise selon le principe de placement des pôles. Étant donné que le polynôme caractéristique de l'équation (3.33) est de degré deux, nous choisissons d'imposer deux pôles avec une partie réelle négative. Pour augmenter la flexibilité dans le choix des dynamiques de régulation, nous nous basons sur le faisceau de courbes présenté en annexe (B), dont le dénominateur des fonctions de transfert associées prend la forme suivante :

$$D(s) = s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2 \quad (3.34)$$

Ainsi, nous obtenons les paramètres du correcteur, en fonction de l'amortissement ξ et la pulsation propre ω_0 .

$$\begin{cases} K_p = \frac{(2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{A} \\ K_i = \frac{T \cdot \omega_0^2}{A} \end{cases} \quad (3.35)$$

Chapitre 03 : Commande Vectorielle de la GADA

Par remplacement des coefficients de l'équation (3.32) dans (3.35), nous obtenons les paramètres suivants du correcteur *PI* :

▪ **Correcteur de la puissance P_s**

	K_{p,P_s}	K_{i,P_s}
Correcteur PI	0.0013	0.0579

Tableau III.1 : Paramètres du correcteur PI de la puissance statorique active.

▪ **Correcteur de la puissance Q_s**

	K_{p,Q_s}	K_{i,Q_s}
Correcteur PI	0.0013	0.0579

Tableau III.2 : Paramètres du correcteur PI de la puissance statorique réactive.

III.7.1.4. Schéma bloc de la régulation des puissances statoriques de la GADA

La figure ci-dessous représente le schéma de la simulation. La machine est connectée directement au réseau du côté statorique. D'un autre côté, le circuit rotorique est alimenté à travers un convertisseur à MLI. Les erreurs entre les puissances de références et celles mesurées au niveau du stator sont traitées par l'algorithme de contrôle considéré, afin de concevoir les tensions de références du rotor. Ces tensions de référence ainsi que celles à l'entrée du convertisseur à MLI sont utilisées par la technique de modulation considérée pour la synthèse des signaux de commande pour les interrupteurs bidirectionnels du convertisseur (figure III.11).

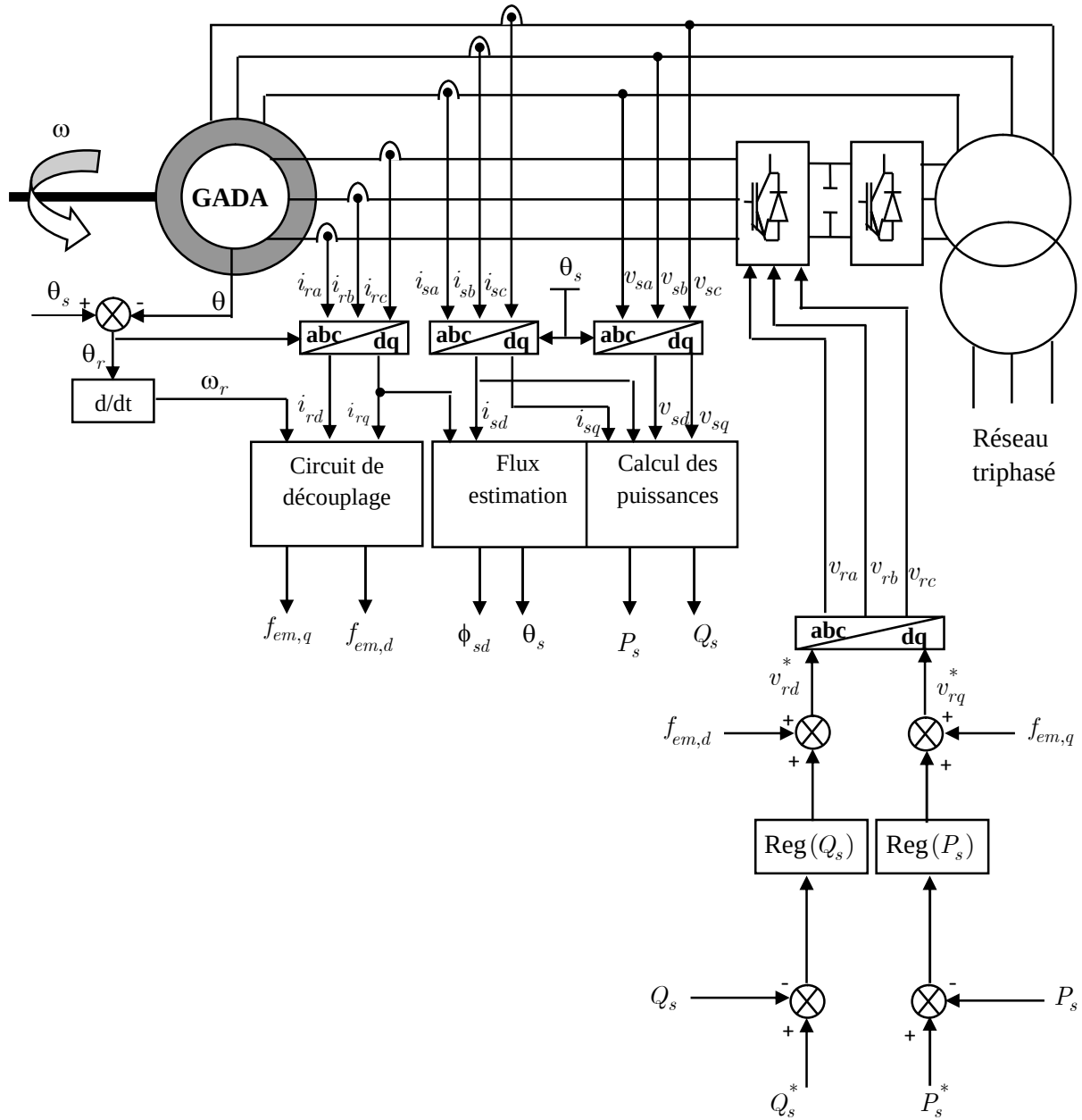


Figure III.11 : Schéma bloc de la méthode directe de réglage des puissances statoriques de la GADA. [BEL, 14]

III.7.2. Méthode Indirecte

Le fondement de cette approche repose sur l'évaluation de la position du vecteur de flux, plutôt que sur la mesure ou l'estimation de son amplitude. Cette notion a été introduite par Hasse. L'objectif consiste à déterminer la position du vecteur de flux tout en ajustant son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou courants requis pour orienter le flux et effectuer le découplage sont calculés à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a gagné en popularité avec l'avènement des microprocesseurs, bien qu'elle soit très sensible aux variations des paramètres de la machine. Il convient de noter que la méthode indirecte est généralement plus facile à mettre en œuvre et plus fréquemment adoptée que la méthode directe, mais le choix entre ces deux approches dépend de l'application particulière. [CAP, 92].

III.7.2.1. Commande Indirecte

Cette technique consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [Boy-06]. Nous construisons ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. Nous aboutissons alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La méthode indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la GADA. Nous partons donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

♦ Réglage indirect sans boucle de régulation

La commande sans boucle de régulation de puissance consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes directe et en quadratique du courant rotorique par des correcteurs PI. Les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

Les courants rotoriques obtenues à partir du système (3.11) sont :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot p + R_r)} (v_{rd} - f e m_d) \\ i_{rq} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot p + R_r)} (v_{rq} - f e m_q) \end{cases} \quad (3.36)$$

Avec :

$$\begin{cases} fem_d = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ fem_q = \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (3.37)$$

D'après le système (3.36) qui lie les courants rotoriques et les tensions rotoriques, nous pouvons établir le schéma bloc simplifié des courants rotoriques de la GADA.

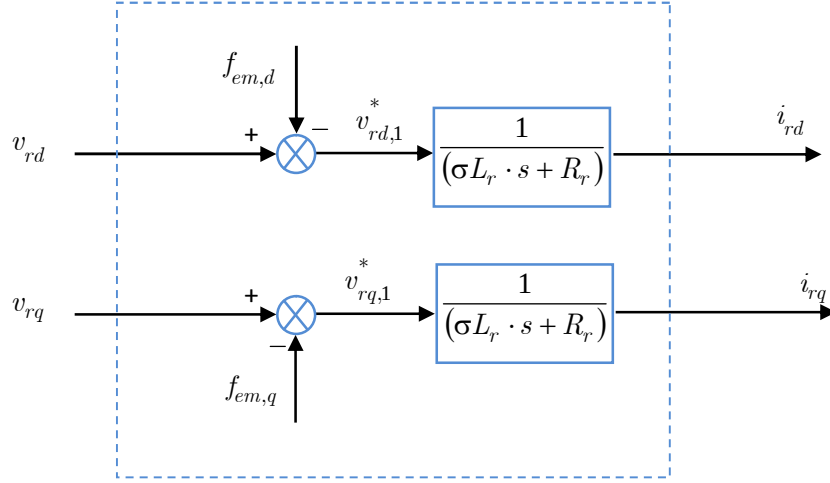
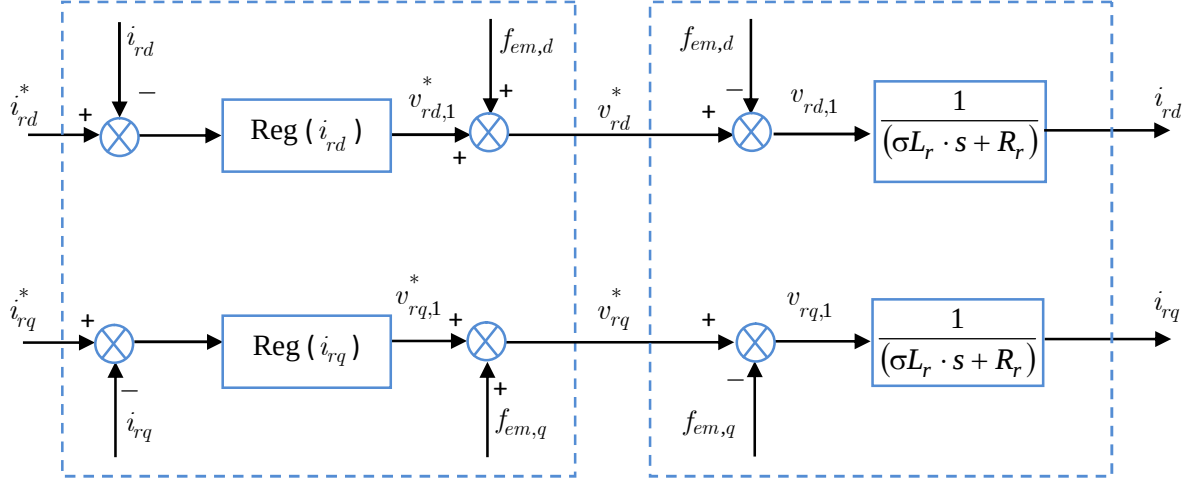


Figure III.12: Modèle simplifié des courants rotoriques de la GADA.

♦ Schéma bloc de la régulation

Si nous observons le schéma de la figure (III.12), nous remarquons que les tensions v_{rd}, v_{rq} sont liées aux courants rotoriques i_{rd}, i_{rq} par les termes $f_{em,d}$ et $f_{em,q}$. Le modèle (3.36) est non linéaire à cause des termes de couplages. Donc, il est nécessaire de réaliser un découplage pour commander séparément les courants. Dans ce cas, nous utilisons le découplage par compensation. Pour rendre les axes d et q complètement indépendants, il est nécessaire d'ajouter des termes identiques de découplage mais de signe opposé à la sortie des correcteurs comme le montre la figure (III.13).



Régulation des courants rotoriques.

Modèle simplifié du rotor de la GADA.

Figure III.13: Découplage par addition des termes de compensation.

Pour contrôler les puissances par les courants rotoriques, nous utilisons les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(i_{rd} - \frac{\phi_{sd}}{M} \right) \end{cases} \quad (3.38)$$

Donc, nous obtenons l'expression des courants rotoriques comme suite :

$$\begin{cases} i_{rq} = -\frac{L_s}{MV_s} P_s \\ i_{rd} = -\frac{L_s}{MV_s} Q_s + \frac{\phi_{sd}}{M} \end{cases} \quad (3.39)$$

Ou encore :

$$\begin{cases} i_{rq} = -\frac{L_s}{MV_s} P_s \\ i_{rd} = -\frac{L_s}{MV_s} \left(Q_s - V_s \cdot \frac{\phi_{sd}}{L_s} \right) \end{cases} \quad (3.40)$$

Donc

$$\begin{cases} i_{rq} = -\frac{L_s}{MV_s} P_s \\ i_{rd} = -\frac{L_s}{MV_s} \left(Q_s - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (3.41)$$

Si nous avons les puissances de référence P_s^* et Q_s^* , nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{rq}^* = -\frac{L_s}{MV_s} P_s^* \\ i_{rd}^* = -\frac{L_s}{MV_s} \left(Q_s^* - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \right) \end{cases} \quad (3.42)$$

Donc, le bloc de régulation de la figure (III.13) devient :

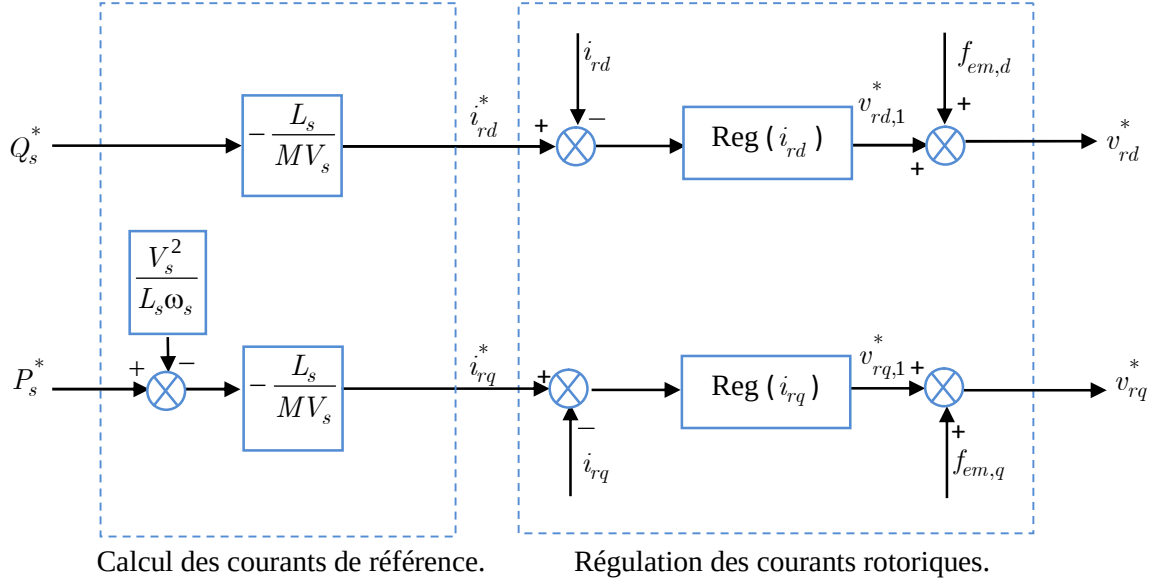


Figure III.14: Schéma bloc de la régulation en cascade.

♦ Synthèse des correcteurs

Le diagramme de régulation des puissances à l'aide des courants rotoriques est élaboré de la manière suivante :

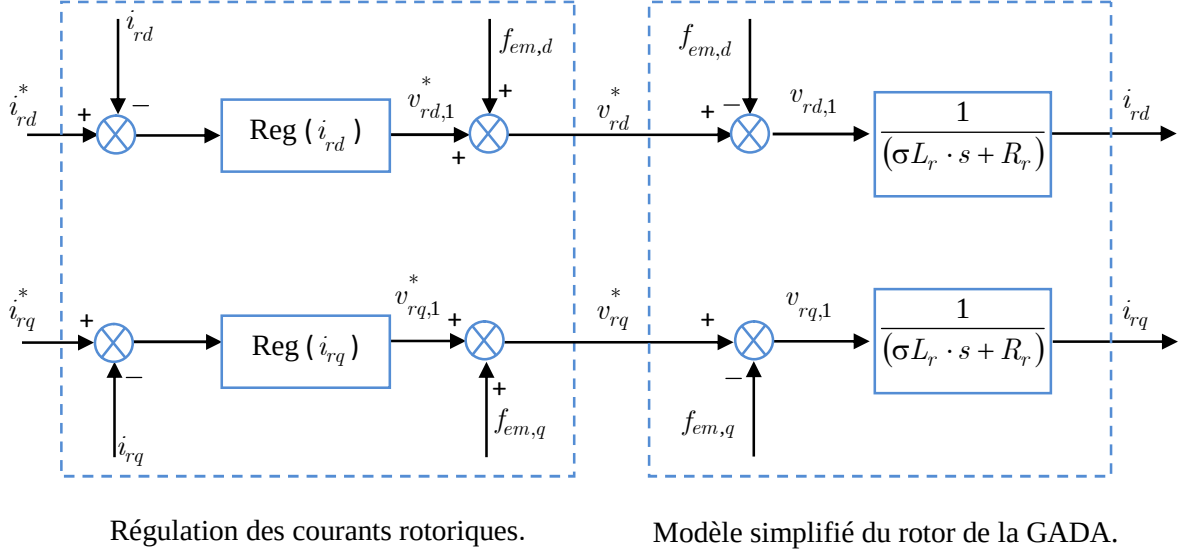


Figure III.15: Découplage par addition des termes de compensation.

Selon le découplage par addition des termes de compensation illustré dans la figure (III.14), nous obtenons des schémas blocs simples et identiques pour les deux courants rotoriques.

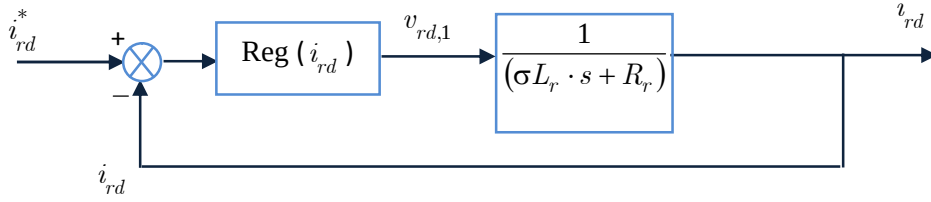


Figure III.16: Boucle de régulation du courant i_{rd} après découplage.

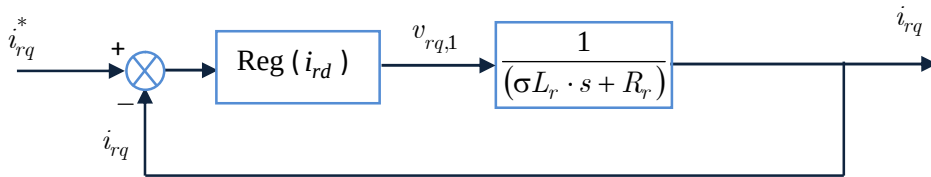


Figure III.17: Boucle de régulation du courant i_{rq} après découplage.

▪ **Correcteur du courant i_{rd} :**

Le régulateur de courant continu délivre la tension $v_{rd,1}$ requise pour garantir un contrôle adéquat du courant i_{rd} , et par conséquent, de la puissance Q_s .

D'après la figure (III.14), la fonction de transfert $\frac{i_{rd}}{v_{rd,1}}$ est donnée par :

$$\frac{i_{rd}}{v_{rd,1}} = \frac{A}{1 + T \cdot s} \quad (3.43)$$

Avec

$$\begin{cases} A = \frac{1}{R_r} \\ T = \sigma T_r \end{cases} \quad (3.44)$$

La boucle de régulation du courant i_{rd} est montrée par la figure (III.17).

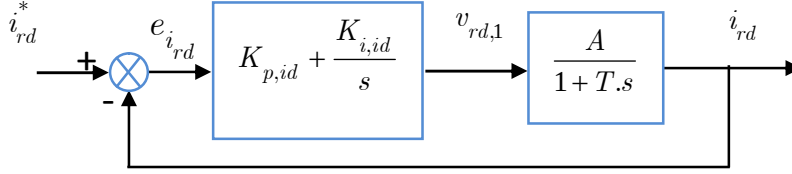


Figure III.18: Schéma bloc de régulation du courant i_{rd} .

Par remplacement de l'équation (3.44) dans (3.35), nous obtenons les paramètres suivants du correcteur PI :

	$K_{p,id}$	$K_{i,id}$
Correcteur PI	$(2\xi\omega_0\sigma T_r - 1)R_r$	$\omega_0^2\sigma T_r R_r$
Valeurs	0.0057	85.7143

Tableau III.3 : Paramètres du correcteur du courant d'axe direct.

▪ **Correcteur du courant i_{rq} :**

Le correcteur de courant en quadrature génère la tension $v_{rq,1}$ requise pour garantir un contrôle adéquat du courant i_{rq} , et par conséquent, de la puissance P_s .

Suivant la figure (III.12), la fonction de transfert $\frac{i_{rq}}{v_{rq,1}}$ est donnée par :

$$\frac{i_{rq}}{v_{rq,1}} = \frac{1}{R_r} \frac{1}{1 + \sigma T_r \cdot s} \quad (3.45)$$

Chapitre 03 : Commande Vectorielle de la GADA

Les calculs identiques réalisés pour le correcteur de courant i_{rd} sont également appliqués à ce correcteur. Par conséquent, les paramètres de ce dernier demeurent inchangés. Ils sont exprimés par :

	$K_{p,iq}$	$K_{i,iq}$
Correcteur PI	$(2\xi\omega_0\sigma T_r - 1)R_r$	$\omega_0^2\sigma T_r R_r$
Valeurs	0.0057	85.7143

Tableau III.4 : Paramètres du correcteur du courant d'axe en quadrature.

Schéma bloc du contrôle indirect de la GADA

Le diagramme de contrôle indirect de la GADA sans boucle de puissance est illustré dans la figure (III.19). Ce système permet de réguler les puissances de manière indirecte en ajustant les deux composantes, directe et quadratique, du courant rotorique à l'aide de correcteurs PI, dont les consignes sont directement dérivées des valeurs des puissances.

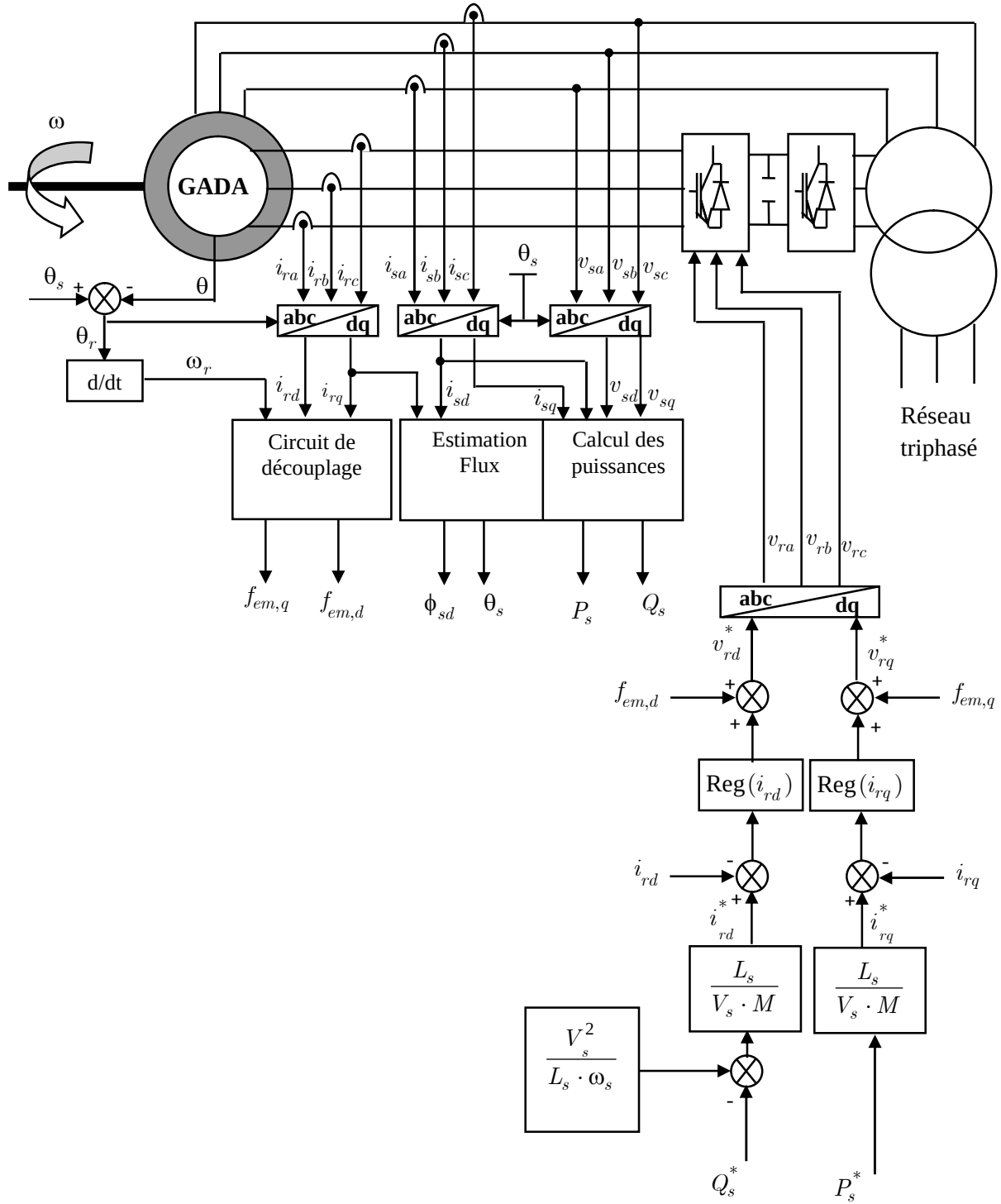


Figure III.19 : Schéma bloc de la méthode indirecte de réglage des puissances statoriques de la GADA. [BEL, 14]

III.8. Résultats de simulation et interprétations

Le système de conversion est schématisé par la figure (III.19). La machine est connectée directement au réseau du côté stator. Le circuit rotorique est alimenté à travers un onduleur contrôlé par la technique à MLI.

La stratégie de la régulation directe des puissances statoriques active et réactive a été implémentée dans l'environnement Matlab/Simulink afin d'évaluer et de tester le système complet pour un fonctionnement à vitesse constante ou variable. Les résultats de simulation sont donnés à la figure (III-20)

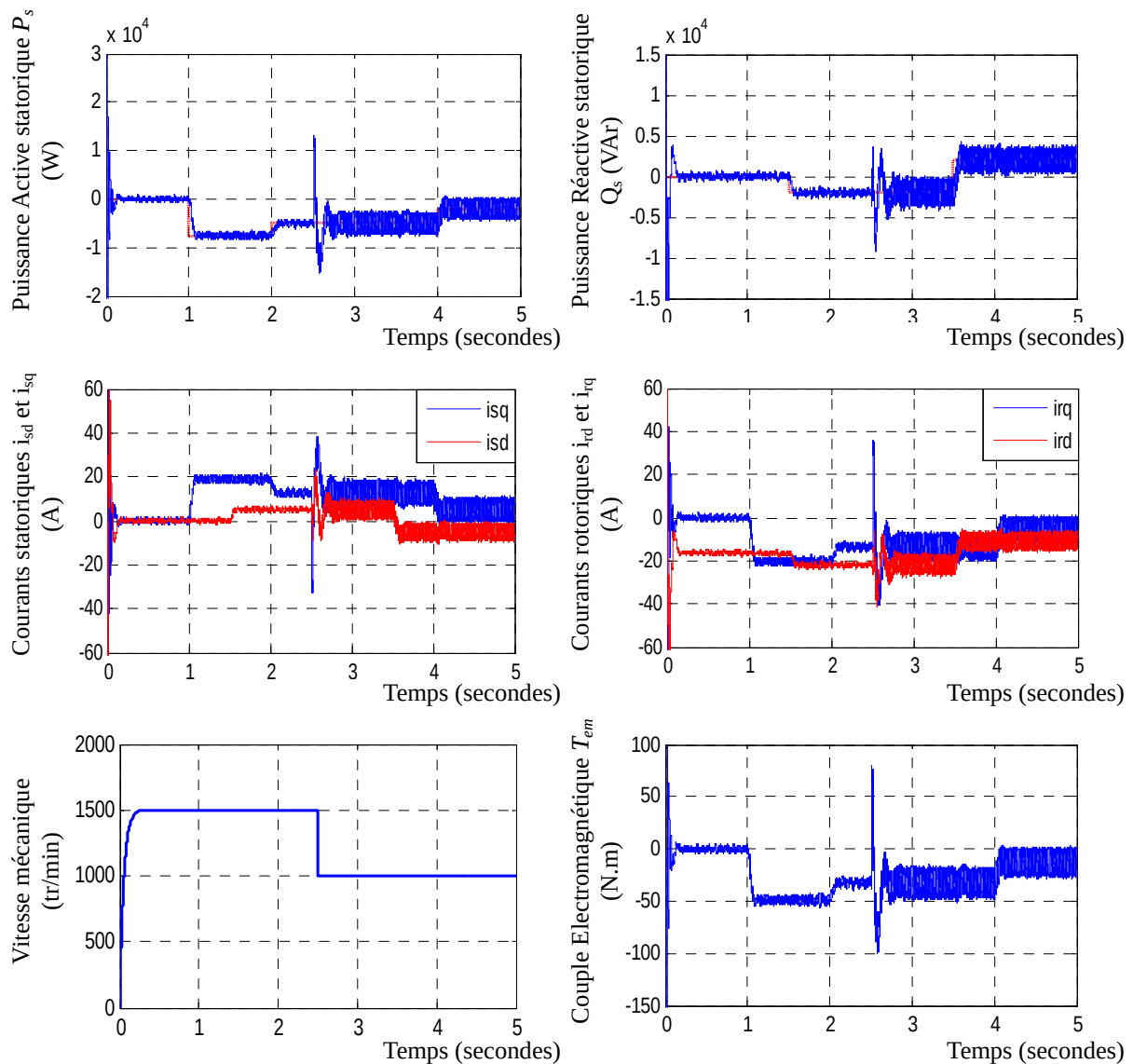


Figure (III-20): Réglage des puissances de la GADA par la méthode directe

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par le générateur aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active et réactive) induit de faible oscillation sur la seconde.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, Une étude théorique sur la commande vectorielle a été présentée, identifiant trois types d'orientation du flux : le flux rotorique, le flux statorique et le flux magnétisant. L'orientation du flux statorique a été privilégiée, car elle permet d'atteindre un découplage complet entre les axes d et q . Nous avons développé deux méthodes de contrôle des puissances de la machine à savoir : le contrôle direct et le contrôle indirect.

Les algorithmes de réglage classiques tels que le correcteur PI peut s'avérer suffisant si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop strictes. Néanmoins, dans le cas contraire et particulièrement lorsque la partie commandée est soumise à de forte non linéarités et à des variations temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant la robustesse du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations. Dans ce contexte, le prochain chapitre traite l'application d'une commande occupant une importante place parmi les commandes robustes, connues par son adaptation aux changements paramétriques et par sa stabilité. Cette commande est nommée commande synergétique.

.

CHAPITRE 04

COMMANDE

SYNERGÉTIQUE

DE LA MADA

IV.1 Introduction

Ce chapitre introduit la théorie de la commande synergétique, développée initialement par des chercheurs russes et récemment appliquée avec succès dans le domaine de l'électronique de puissance. Nous présentons d'abord les concepts de base de cette approche innovante, puis détaillons les étapes de conception d'un contrôleur synergétique destiné à réguler les puissances active et réactive d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Contrairement aux méthodes classiques, cette stratégie s'affranchit de la linéarisation du modèle et utilise explicitement une modélisation non linéaire pour synthétiser la commande, garantissant une stabilité globale et une adaptation optimale aux systèmes complexes multi-connectés.

Après avoir expliqué les principes fondamentaux de cette théorie, nous illustrons son application pratique à la GADA, en mettant en lumière les mécanismes de réduction de complexité et les performances attendues, offrant ainsi une solution robuste aux défis des commandes traditionnelles.

IV.2.Principe généraux de la synergétique

Les systèmes étudiés théoriquement ou expérimentalement sont contrôlés par des paramètres ajustables (externes comme le courant d'un laser, ou internes comme les hormones). Lorsque ces paramètres atteignent des valeurs critiques, le système perd sa stabilité et adopte un nouvel état macroscopique. Près de ces seuils critiques, émergent des paramètres d'ordre à dynamique réduite qui, selon le principe d'asservissement, gouvernent le comportement global du système malgré les fluctuations. En phase critique, ces paramètres peuvent subir une transition de phase déséquilibrée, marquée par une perte de symétrie, un ralentissement critique et des fluctuations amplifiées. La synergétique, liée à la théorie du chaos, des catastrophes et aux équations stochastiques (Langevin, Fokker-Planck), trouve des applications en physique (lasers, hydrodynamique), biologie (évolution biomoléculaire), médecine (activité cérébrale), sociologie (opinion publique), informatique (auto-organisation) et modélisation comme transitions d'états via le modèle Haken-Keelso-Bunz.[HAK,07].

IV.3. Présent le Théorie de commande de synergétique

Face aux limites des méthodes traditionnelles (linéarisation, commande par modes glissants) face à la multi-connectivité et la multi-dimensionnalité des systèmes complexes, la commande synergétique s'impose comme une approche novatrice en théorie des commandes modernes [Kol 02a][Kon04] [Kon 06].

Cette méthode permet de concevoir analytiquement des lois de commande garantissant non seulement la stabilité globale en boucle fermée, mais aussi une réduction de l'ordre du système via des décompositions successives. Elle résout des problèmes critiques tels que l'optimisation du comportement dynamique, la transition fluide entre stratégies de partage de puissance, ou la minimisation des pertes énergétiques. Fondée sur les attracteurs et leurs secteurs d'attraction (concepts clés définissant les zones de stabilité alignées avec les objectifs de contrôle), la commande synergétique offre un cadre robuste pour concevoir des contrôleurs optimaux adaptés aux systèmes non linéaires hautement complexes, là où les méthodes classiques échouent.

IV.3.1.Principe de la commande synergétique

La théorie de la commande synergétique (**SC**) est développée par Anatoly Kolesnikov. C'est une stratégie de commande non linéaire qui vise le même objectif que la commande par mode glissant. Cette commande partage avec la commande par mode glissant les avantages de stabilité globale, la réduction d'ordre et l'insensibilité vis-à-vis des paramètres et elle diffère dans le fait que cette commande est toujours continue ce qui permet d'éviter le problème de broutement ("chattering" en anglais) de la commande par mode glissant.[AKO,00]

Cette théorie a récemment été appliquée avec succès dans le domaine des commandes de l'électronique de puissance on cite à titre d'exemple, son application sur un convertisseur élévateur 'convertisseur Boost' qui a été présentée dans et sur un 'convertisseur Buck' dans, aussi parmi les applications pratiques on la trouve dans le système de conversion de l'énergie éolienne qui a été discutés dans et sur le chargement de batteries dans .

L'objectif de cette commande en fait est de forcer le système à fonctionner dans une région bien déterminée définie par une macro-variable. Le concept fondamental de cette approche est de gouverner les trajectoires du système contrôlé vers une variété désirée dans l'espace d'état du système [MAH, 22]

IV.3.2. Synthèse du régulateur synergétique

Supposons que le système à commander soit décrit par un ensemble d'équations non linéaires de dimension 'n' qui a la forme suivante [KBE, 20] :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (4.1)$$

Où :

x : Le vecteur d'état du système,

u : Le vecteur de commande,

t : représente le temps. Cette macro-variable peut être définie sous forme d'une combinaison linéaire des variables d'état du système, sachant que le nombre de macro-variables ne dépasse pas le nombre de variables à contrôler. Soit :

$$\psi = \psi(x, t) \quad (4.2)$$

ψ : La macro-variable

$\psi(x, t)$: Fonction des variables d'état.

L'objectif de la commande synergétique consiste à trouver une commande $u(t)$ qui force les trajectoires du système à tendre vers une variété (manifold) ou bien une hyper surface d'équation ($\psi = 0$), d'où :

$$\psi(x, t) = 0 \quad (4.3)$$

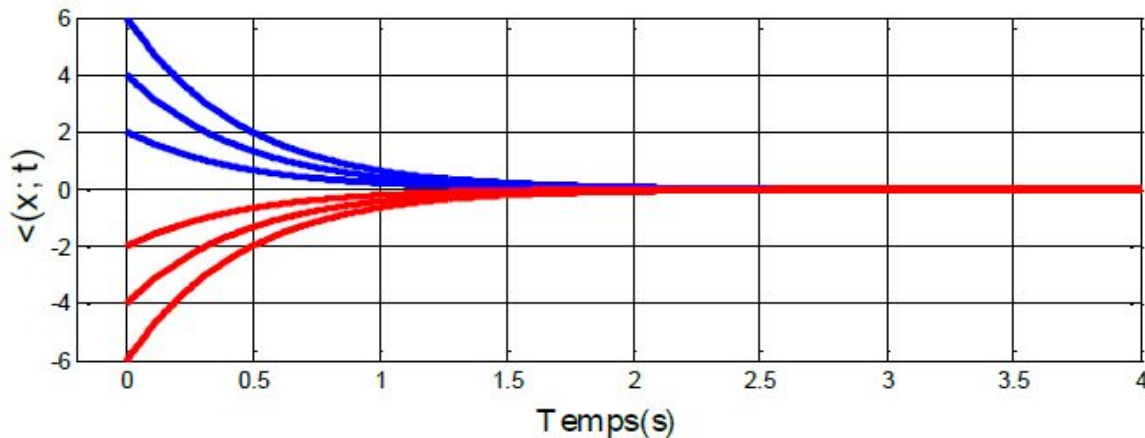


Figure 4.1 : Représentation graphique de la solution de l'équation fonctionnelle pour différentes conditions initiales

Manifold est un concept important dans la théorie du contrôle synergétique. Il peut réduire l'ordre du système en construisant un collecteur approprié. Brièvement, chaque variété (manifold) qui réduit l'ordre du système, soumet une nouvelle contrainte. Le choix approprié des macro-variables et de leurs caractéristiques permet au concepteur d'atteindre les performances ciblées pour la conception du système, y compris la stabilité et la sensibilité des

Chapitre 04 : Commande Synergétique de la GADA

paramètres. La fixation de l'évolution dynamique des macro-variables (4.3) vers les manifolds ($\psi = 0$) par une équation fonctionnelle, définie par la forme générale suivant :

$$T\dot{\psi} + \psi = 0 \quad (4.4)$$

Où :

T : est un paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence des macro-variables vers le domaine indiqué [JAE-AKO, 04]

La substitution de (4.1) et de (4.2) dans (4.4) permet d'écrire : [MZH, 18-MNC, 20]

$$T \frac{d\psi}{dx} f(x, u, t) + \psi(x, t) \quad (4.5)$$

En résolvant (4.5), la loi de commande peut être trouvée comme : [AMR, 19] [SZI, 15]

$$U = g(x, T, \psi(x, t), t) \quad (4.6)$$

À partir de l'équation (4.6), on peut voir que la commande synergétique dépend non seulement des variables d'état du système, mais également de la macro-variable et de la constante de temps choisies T .

Ainsi, il est intéressant de noter que la loi de la commande synergétique garantit la stabilité globale sur le domaine choisi. Ceci signifie qu'une fois que l'hyper surface est atteinte le système n'est pas supposé la quitter, même en cas d'assez grandes variations des paramètres [MAR, 22].

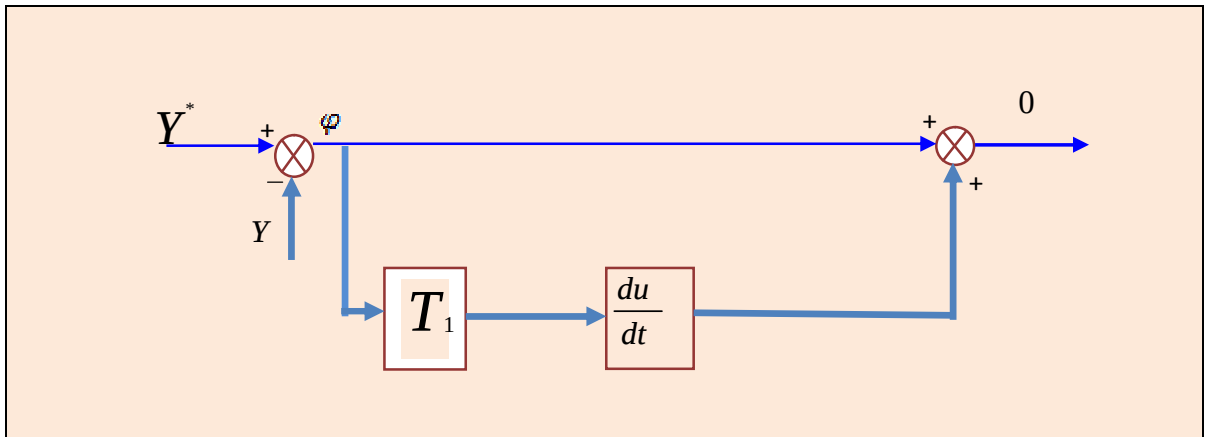


Figure IV.2 : Synthèse de commande synergétique.

IV.4. Application de la commande synergétique à la MADA

L'application de la commande synergétique à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée dans le système éolien permet d'améliorer les performances de régulation et robustesse face aux variations des conditions de vent.

Voici une analyse détaillée de cette approche :

$$T\dot{\psi} + \psi = 0 \quad (4.7)$$

Définition des macro-variables (synergies)

On choisit deux macro-variables représentent les erreurs de régulation :

$$\begin{cases} \psi_{P_s} = P_s^* - P_s \\ \psi_{Q_s} = Q_s^* - Q_s \end{cases} \quad (4.8)$$

Pour garantir la convergence vers le zéro, on remplace l'équation (4.8) dans (4.7)

$$\begin{cases} T_{qr}(\dot{P}_s^* - \dot{P}_s) + (P_s^* - P_s) = 0 \\ T_{dr}(\dot{Q}_s^* - \dot{Q}_s) + (Q_s^* - Q_s) = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

Où :

T_{qr} et T_{dr} sont des constants de temps qui déterminent la rapidité de convergence.

On a :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} \left(i_{dr} - \frac{\phi_s}{M} \right) \end{cases} \quad (4.10)$$

Remplaçant l'équation (4.10) dans l'équation (4.9), on trouve:

$$\begin{cases} T_{qr} \left(\dot{P}_s^* + V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \right) + (P_s^* - P_s) = 0 \\ T_{dr} \left(\dot{Q}_s^* + V_s \frac{M}{L_s} \left(i_{dr} - \frac{\phi_s}{M} \right) \right) + (Q_s^* - Q_s) = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Ou :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(V_{dr} - R_r i_{dr} + \sigma L_r \omega_r i_{qr} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_s}{dt} \right) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left(V_{qr} - R_r i_{qr} - \sigma L_r \omega_r i_{dr} - \frac{M}{L_s} \omega_s \phi_{ds} \right) \end{cases} \quad (4.12)$$

On a :

$$\begin{cases} f_{em,d} = \sigma L_r \omega_r i_{rq} - \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_r \omega_r i_{rd} - \frac{M}{L_s} \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (4.13)$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{dr} - R_r i_{dr} - f_{em,d}) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{qr} - R_r i_{qr} - f_{em,q}) \end{cases} \quad (4.14)$$

Remplaçant l'équation (4.14) dans (4.11)

$$\begin{cases} T_{qr} \left(\dot{P}_s^* + \frac{MV_s}{L_s} \right) \left(\frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} - R_r i_{dr} - f_{em,d} \right) + (P_s^* - P_s) = 0 \\ T_{dr} \left(\dot{Q}_s^* + \frac{MV_s}{L_s} \right) \left(\frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} - R_r i_{qr} - f_{em,q} \right) - \frac{MV_s}{L_s} \frac{\phi_s}{M} + (Q_s^* - Q_s) = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Finalement on :

$$\begin{cases} V_{qr} = \frac{\sigma L_s L_r}{TMV_s} \left[-T\dot{P}_s^* + \frac{MV_s}{L_s} R_r i_{dr} + \frac{MV_s}{L_s} f_{em,d} - (P_s^* - P_s) \right] \\ V_{dr} = \frac{\sigma L_s L_r}{TMV_s} \left[-T\dot{Q}_s^* + \frac{MV_s}{L_s} R_r i_{qr} + \frac{MV_s}{L_s} f_{em,q} - (Q_s^* - Q_s) \right] \end{cases} \quad (4.16)$$

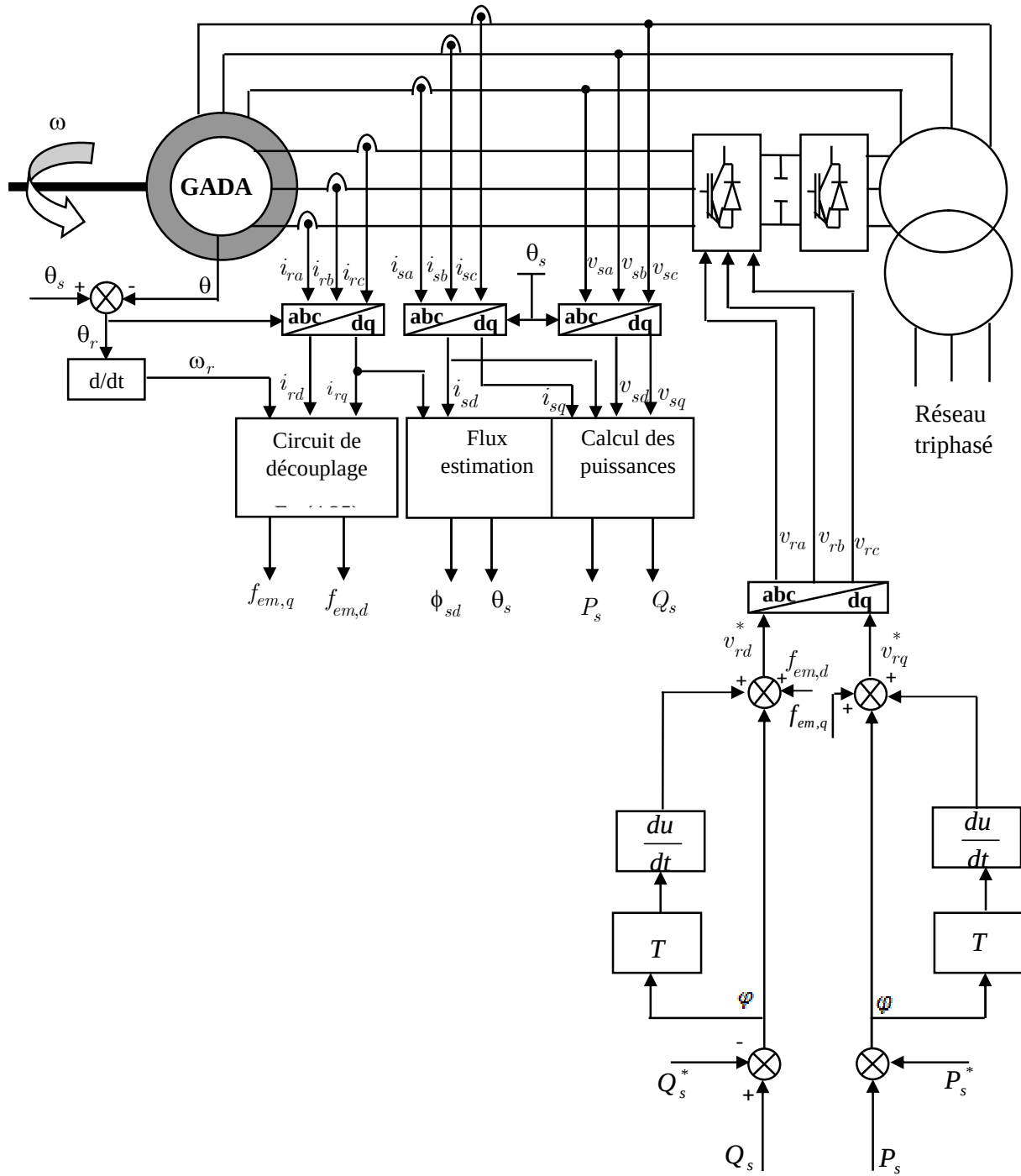


Figure IV.3 : Schéma bloc de commande synergétique.

IV.5 Résultats de simulation

Les performances sont évaluées par le biais d'une simulation numérique dans les mêmes conditions de fonctionnement présentés dans les chapitres précédents.

Les figures (IV.4), illustrent les performances du réglage des puissances statoriques (active et réactive) par la théorie de la synergie . Nous remarquons que les puissances active et réactive suivent leurs références. Nous pouvons déduire le découplage entre la commande des deux puissances. Ce mode de réglage donne de bonnes performances vis-à-vis de la poursuite de la consigne sans dépassement remarquable en dépit de la perturbation. Nous constatons aussi un réglage rapide pour atteindre les valeurs de référence.

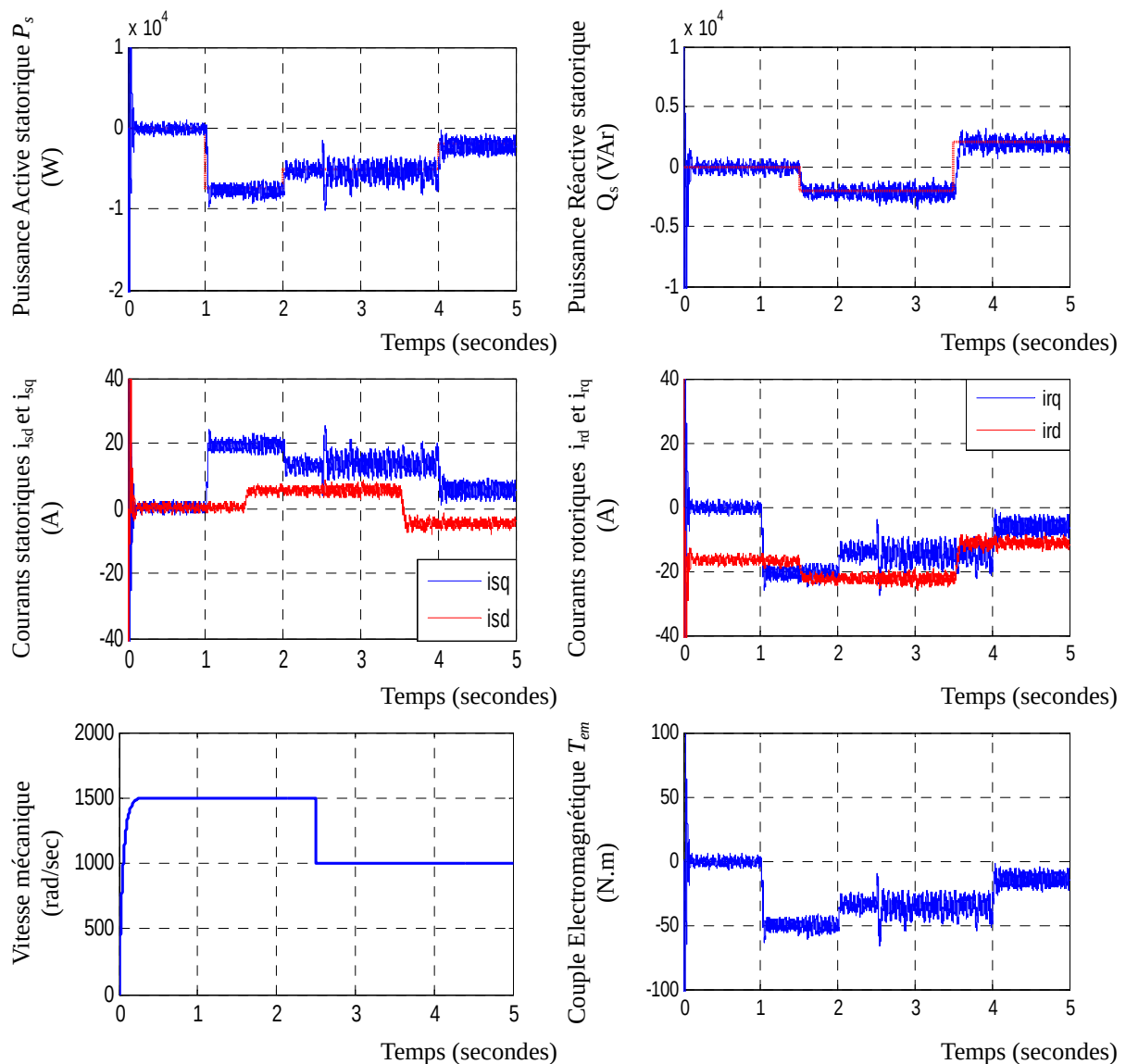


Figure IV.4 : Réglage des puissances de la GADA par la méthode synergétique

IV.7. Conclusion

La commande synergétique se positionne comme une solution hautement performante pour les applications exigeantes de la GADA, combinant rigueur théorique et efficacité pratique. Son adoption dans l'industrie, notamment pour les systèmes de génération éolienne, confirme son potentiel pour concilier précision, stabilité et économie d'énergie.

Ce chapitre a permis de cerner les fondements et les atouts de cette commande, ouvrant la voie à des approfondissements en automatique avancée et électrotechnique moderne.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif initial de cette étude était d'analyser, de modéliser et de contrôler une MADA, conçue pour produire de l'énergie éolienne en transformant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Le premier chapitre est abordé des concepts généraux sur l'énergie éolienne, incluant un historique et des statistiques mondiales. Il traite également des technologies des éoliennes, en présentant leurs différentes configurations, telles que les éoliennes à axe vertical et horizontal, à vitesse fixe et variable, ainsi que les diverses machines électriques utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne. Enfin, il offre un aperçu des avantages et des inconvénients associés au secteur éolien.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, d'abord dans un cadre triphasé, puis dans le cadre diphasé de PARK. Nous avons mis l'accent sur la modélisation de la turbine éolienne, qui, bien qu'appartenant au domaine de la mécanique, joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Dans le troisième chapitre, la commande par orientation du flux statorique est abordée, permettant de traiter la MADA de manière similaire à une machine à courant continu, ce qui offre une solution prometteuse pour améliorer les performances dans les applications à vitesse variable.

Nous avons également développé un modèle d'onduleur de tension triphasé à commande MLI, associé au rotor de la MADA.

Le quatrième chapitre présente une étude et l'application de la théorie de la commande synergétique à la MADA. Cette technique de commande a été appliquée au même modèle précédemment traité avec la commande vectorielle.

Toutefois, la commande synergétique des puissances active et réactive d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système éolien constitue une avancée majeure dans la production d'énergie renouvelable. Cette méthode de gestion permet de contrôler simultanément les flux d'énergie active et réactive, tout en garantissant une résilience face aux fluctuations des conditions de vent et aux perturbations du

réseau électrique. Cela pave la voie à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie éolienne, favorisant ainsi la transition vers des systèmes énergétiques plus propres et stables.

En réponse à ces observations et aux résultats obtenus, plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour améliorer davantage les performances de notre système, notamment :

- L'utilisation d'un convertisseur (redresseur + onduleur) permettant la bidirectionnalité du transfert de puissance entre le rotor et le réseau.
- L'intégration d'un système de stockage dans une éolienne à vitesse variable afin de garantir un fonctionnement sur réseau.
- L'application de méthodes d'intelligence artificielle pour son déploiement en temps réel.
- L'établissement d'un modèle de commande en puissance de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.

ANNEXE

Annexe A

Grandeurs nominales et paramètres du système éolien [ELA-04].

A.1 Grandeurs nominales de la machine asynchrone à double alimentation

Puissance nominale	7.5 kW
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Vitesse nominale	$N_n = 1500 \text{ tr} / \text{m}$
Tension nominale	$380/660 \text{ V}$

A.2 Paramètres électriques de la machine asynchrone à double alimentation

Résistance statorique	$R_s = 0.455 \text{ } \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 0.62 \text{ } \Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0.084 \text{ H}$
Inductance rotorique	$L_r = 0.081 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$M = 0.078 \text{ H}$

A.3 Paramètres mécaniques de la machine asynchrone à double alimentation

Moment d'inertie	$J = 0.3125 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.00673 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$

A.4 Paramètres de la turbine éolienne

Moment d'inertie de l'ensemble (turbine-pales)	$J_t = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Rapport du multiplicateur	$G = 35$
Rayon de la turbine	$R = 13 \text{ m}$
Vitesse nominale du vent	$V = 15 \text{ m} / \text{s}$

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIES

A :

- AMR, 19** **Ardjal.A, Bettayeb.M, Mansouri.R,** «Fractional Nonlinear Synergetic Control of Wind Turbine for Maximum Power Point Tracking"978-1-7281-5341-4/19/\$31.00 ©2019 IEEE
- ARI, 20** **ARIBI Cheyma, HAMLAOUI Meryem** « Commande par mode glissant doté à action intégrale application à la machine asynchrone à double alimentation(MADA) », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf Msila, Algérie, 2020.

B :

- BAN, 22** **BANJAR Abah Moussa, NUVUNGA Celso Estevao,** « Commande directe des puissances (DPC) appliquée sur une génératrice à double alimentation connectée avec turbine éolienne», mémoire de master, université Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, 2022.
- BEK, 14** **BEKAKRA Y,** «Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, université Mohamed khider, Biskra, Algérie, 2014.
- BEL, 14** **BELGACEM K,** « Optimisation des performances des systèmes énergétiques dans la production d'énergie éolienne à vitesse variable », thèse de doctorat, université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algérie, 2014.
- BEL-SAH, 22** **BELMOSTEFA et SAHRAOUI,** « commande vectorielle d'un aérogénérateur asynchrone double alimentation» mémoire de master, spécialité instrumentation et système, université d'Ouargla, 2022.
- BEN, 13** **BenAon.A,** « Commande directe des puissances d'une machine asynchrone à double Alimentation intégré dans un système éolienne connecté au réseau » Mémoire de Magister, Université d'EL-oued, 2013
- BEN-BEL, 23** **BENDIDOUCH.I, BELHARAZEM. W,** « Etude, Modélisation et Command robuste d'une MADA », mémoire de master, Ecole supérieure en sciences appliquées, Tlemcen, 2023.
- BEN, 24** **BENTALHA Mohamed, BELHAMRI Abderrahmane,** «Commande des puissances active et réactive d'une Machine Asynchrone à Double

BIBLIOGRAPHIES

Alimentation (MADA) intégrée à un système de conversion d'énergie éolienne» mémoire de master, université Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, 2024.

BER, 13 **BERNARD, W.** promesses et réalités des énergies renouvelable. EDP sciences, 2013.

BER, 19 **BERRAT A, DJEDI N,** « Commande directe du couple d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master, université Mohamed Boudiaf Msila, Algérie.2019.

BOU, 09 **BOUDJEMAA Zine Laabidine,** "Commande Vectorielle sans capteur de vitesse de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par régulateur pi-flou", Mémoire de Magister de l'école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009.

BOY, 06 **Boyette A,** « Contrôle Commande d'un Générateur à double alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2006.

C :

CAM, 03 **CAMBLONG.H** – « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

CHA, 14 **CHABANI.Z,** « La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030 », Mémoire de magister, université Mohamed-Boumerdès, 2014.

CHE, 03 **CHEMIDI.A,** « Analyse, Modélisation et Commande Avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme » thèse de doctorat, spécialité Electronique et génie électrique, université de Nantes 2003, page 11.

COU, 08 **Courtesuisse.V,** «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique» Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008.

BIBLIOGRAPHIES

E :

- EKA, 03** **Ekanayake J, Holdsworth L, Wu X, et al**, « Dynamic modeling of doublyfed induction generator Wind turbines », IEEE Transactions on Power Systems, 2003.
- ELA, 04** **EL AIMANI.S**, « Modélisation de Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension », Thèse De Doctorat De L'Ecole Centrale de Lille France, 2004.
- ELO, 21** **EL OUALID Z**, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones », Thèse de doctorat, université Mostefa Ben Boulaid, Batna, 2021.

J :

- JAE, 04** **J.BASTOS, MONTI.A AND SANTI.E**, « Design and implementation of a nonlinear speed control for a PM synchronous motor using the synergetic approach to control theory », 351h, Annul IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004.

H :

- HAK, 07** Hermann Haken. '' Synergetics ''. Scholarpedia, p.7017, 2007.
- HAM, 12** **HAMANE. B, Benghanem. M, Bouzid. A M, Belabbes. A, Bouhamida. M Draou. A**, « Control for variable speed Wind turbine driving a doublyfed induction generator using fuzzy pi control », Energy Procedia Vol. 18, PP:4766485, 2012.
- HAS, 69** **Hasse K**, « *Zur dynamik drehzahlgegelter antriebe mit stromrichtegespeisten asynchron-kurzschlusslaufer-machinen* », Ph. D. Dissertation, TH Darmstadt, 1969.

G :

- GEO, 07** **Georges Salloum**, « *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation* », docteur de l'institut national polytechnique de toulouse, 2007

BIBLIOGRAPHIES

K :

- KBE, 20** **K.BEHIH**, «Contribution à la commande des systèmes non linéaires incertains et perturbés», Thèse de Doctorat, Université de Setif1, 2020.
- KHE, 17** **KHELFAT. L, M ATAOU. L**, « Etude et simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone doublement alimentée », Mémoire de master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
- KOL, 00** **A. KOLESNIKOV, G. VESELOV**, « Modern applied control theory: synergetic approach in control theory, in Russian, Moscow-Taganrog, TSURE press, 2000.
- KOL, 02a** **Anatoly Kolesnikov, Guennady E. Veselov, Andrey Popov, Alexander Kolesnikov, Mikhail Medvedev, Roger A. Dougal, Igor Kondratiev**. « Synergetic Control for group of DC–DC Buck Converters». Proceedings of the Power system 2002 conference: Impact of distributed generation, March 13-15, 2002.Ramada Inn, Clemson, SC.
- KOL, 04** **A. KOLESNIKOV**, « Synergétique processus d'auto organisation et commande », Taganrog, Russie 2004.
- KON, 04** **I. Kondratiev, R. Dougal, E. Santi, G. Veselov**. «Synergetic Control for DC-DC Buck Converters with Constant Power Load». 3rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004.
- KON, 06** **I. Kondratiev and R. Dougal**. « General Synergetic Control Strategies for Arbitrary Number of Paralleled Buck Converters Feeding Constant Power Load: Implementation of Dynamic Current Sharing». IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2006, Montreal, Quebec, Canada

L :

- LAK, 24** **LAKECHAL.M.I, BENMAKHLOUF.A**, « Modélisation et control d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », mémoire de master, université Badji Mokhtar, Annaba, 2024.
- LAT, 12** **LATRECHE.M**, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » thèse de magister, spécialité électronique, université de Sétif 2012, page 11.
- LIT, 13** **LITAMINE Toufik**, « Modélisation et commande d'une MADA destinée à la

BIBLIOGRAPHIES

production d'énergie éolienne» mémoire de master, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.

MAH, 22 **MAHGOUN Mohamed Seddik**, «Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédié à la conversion éolienne», thèse de doctorat, université Ferhat Abbès de Sétif 1, département d'électrotechnique, 2022.

MER, 13 **MERIZEK Habarek, KACI Amani**, «Etude de générateur asynchrone à vitesse fixe et variable appliqué à une éolienne », mémoire de master, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2013.

MNC, 20 **M.Nicola, Ionel Nicola**, «Sensorless Fractional Order Control of PMSM Based on Synergetic and Sliding Mode Controllers», Electronics 2020, 9, 1494; doi: 10.3390/electronics9091494.

MZH, 18 **M.Zhao, Wang.T**, «A sliding mode and synergetic control approach supplied to Permanent Magnet Synchronous Motor», First International Conference on Advanced Algorithms and Control Engineering, (2018), doi: 10.1088/1742-6596/1087/4/042012.

N :

NAI-HAD, 12 **NAIT AMARA Sofiane, HADDADI Ali**, «Modélisation et Commande vectorielle de la Machine Asynchrone a Double Alimentation» mémoire de Master, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.

P :

POI, 03 **POITIERS.F**, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation de L'énergie Eolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.

R :

RAH-TEG, 14 **RAHAB Yacine TEGGOUR Mouloud** « étude de l'association d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et d'un convertisseur multiniveaux», mémoire de master, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2014

ROP, 08 **ROPERT.J**, « FABAS Laurent, Guide de la maison économique », Edition Eyrolle, Paris, 2008.

BIBLIOGRAPHIES

S :

- SZI, 15** **S.Zine, Mazari.B, Bouzid, Mihoub.A** «Synergistic and Sliding Mode Controls of Wind Energy Conversion System», International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 8, N. 6 ISSN 1974-9821, December 2015

T :

- TAM, 06** **Tamrabet.H,** “Robustesse d’un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d’une Machine Asynchrone,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2006.
- TAM, 19** **T. Tameghe,** «Contribution à la mise en oeuvre et à la commande d’un micro-réseau de cogénération modulaire (injection de puissance et stabilisation de fréquence).» Thèse de doctorat, Université Québec – Chicoutimi, Canada, 2019.
- TOU, 99** **TOUNZIA** – « Utilisation de l’énergie éolienne dans la production de l’électricité », Journées du club EEA, 28-29 Janvier, 1999, Paris, France, pp.1-14.
- TOU, 00** **TOUNZIA,** "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000,
- TRI, 13** **TRIA .F,** « Contribution à la commande d’un système éolienne basé sur une MADA par différentes techniques », Mémoire de Magister, université d’El-oued, Algérie ,2013.
- ZEG, 20** **ZEGHLACH.A, BERRA .CH,** «Commande des puissances par logique floue applicatif à MADA », Mémoire de master, université Mohamed Boudiaf, Msila, Algérie, 2020.