

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي

سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique industrielle

Par : FASSI Abdellah et BOURAS Amir

Sujet

**Régulation des puissances active et réactive statoriques d'une GADA
intégrée dans un système éolien par Algorithme Supert-wisting**

Soutenue publiquement en **11/06/2026** devant le jury composé de :

Mr. BOUANANE Abdelkrim	...	Univ. Saida	Président
Mr. BELGACEM Kheira	Pr	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. AIMER Ameer Fathi	MCA	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2025/2026

Remerciement

Avant toutes choses, Nous tenons à remercier Dr. Bouanane Abdelkarim et Dr. Aimer Fathi d'avoir accepté de faire de notre jury de mémoire de fin d'études. Sans eux ces travaux n'auraient aucune valeur.

Nos remerciements les plus respectueuses vont au Dr. Belgacem Kheira d'avoir efficacement dirigé nos travaux de mémoire de fin d'études. Nous la remercions aussi pour les bonnes conditions de travail qu'elle nous a assurées et les conseils qu'elle nous a prodigués tout au long de ce travail.

Nous voulons aussi dire un mot à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont soutenus pour réaliser ce travail, et nous ont permis de la finaliser : Merci !

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À ALLAH, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force, le courage et la patience pour mener ce travail à son terme.

À mes très chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

À toute ma famille et à mes proches, pour leur présence et leurs conseils précieux.

À mon binôme, « Fassi Abdellah » pour sa collaboration, son sérieux et les efforts partagés durant toute cette aventure universitaire.

À mes amis, pour leur soutien, leurs encouragements et les bons moments passés ensemble.

À mon encadreur « Belgacem Kheira » pour son accompagnement, ses orientations et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

À l'ensemble des membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail.

À tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et à mon apprentissage.

Enfin, à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous.

Bouras Amir

DEDICACE

Avant tout, je remercie ALLAH pour toutes ses puissances de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents.

Toute la famille.

À mon binôme, « Bouras Amir » pour sa collaboration, les efforts dans cette aventure universitaire.

À mon encadreur « Belgacem Kheira » pour son accompagnement, ses orientations et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Tous mes enseignants.

Tous mes camarades de la promotion d'électrotechnique.

Tous mes amis.

A tous ceux qui me chers.

Fassi Abdellah

Sommaire	
Notation	
Introduction générale.....	1
Chapitre I État de l’art sur le système éolienne	
I.1. Introduction.....	4
I.2. L’énergie éolienne	4
I.2.1. production mondiale d’énergie éolienne	5
I.2.2. Production optimale d’un système éolienne	5
I.3.Contexte actuel en Algérie.....	6
I.4. Un système éolien.....	7
I.5. Principe de fonctionnement d’une éolienne	8
I.6. Les différents types d’éoliennes :.....	8
I.6.1. Eoliennes à axe vertical	8
I.6.1.1. Les éoliennes à axe vertical de type Savonius.....	9
I.6.1.2. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus	9
I.6.2. Eoliennes à axe horizontal.....	10
I.7. Principe de conversion de l’énergie éolienne.....	12
I.8. Avantages et inconvénients.....	12
I.8.1. Avantages.....	12
I.8.2. Inconvénients.....	13
I.9. Conclusion.....	13

Chapitre II	
Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA)	
II.1. Introduction.....	15
II.2. L'évolution de l'énergie éolienne	15
II.2.1 La nature du vent.....	15
II.2.2 Modélisation du vent.....	16
II.3. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	17
II.3.1 Modélisation de la turbine.....	17
II.3.2 La vitesse spécifique de vitesse (Tip-Speed-Ratio).....	18
II.3.3 Coefficient de puissance aérodynamique.....	18
II.3.4 Couple aérodynamique.....	19
II.3.5 Modélisation du multiplicateur de vitesse.....	19
II.3.6 Equation dynamique de l'arbre.....	21
II.3.7 Description du système électrique.....	22
II.4 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)	23
II.4.1. Modèle triphasé de la GADA.....	23
II.4.2. Hypothèses simplificatrices.....	24
II.4.3. Les équations électriques.....	24
II.4.4 Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park (d, q)	26
II.4.4.1 Equation mathématiques de la GADA dans le repère (d,q).....	29
II.4.4.2 Modèle d'état de Park de la GADA.....	31
II.5 Modélisation des convertisseurs statiques.....	31
II.5.1 Description de l'onduleur.....	32
II.5.2 Commande de l'onduleur de tension à MLI (sinus-triangle)	33
II.5.2.1. Equation de la porteuse.....	34
II.5.2.2 Equation de la référence.....	34
II.5.3 Caractéristiques de la MLI	35
II.6. Conclusion.....	36

Chapitre III Commande vectorielle de la (GADA)	
III.1. Introduction.....	38
III.2. La commande vectorielle (principes et objectifs).....	38
III.3. Synthèse de la commande à flux orienté de la GADA.....	39
III.3.1. Orientation de flux statorique.....	39
III.4. Modèle simplifié de la GADA avec orientation du flux statorique.....	43
III.4.1. Estimation du flux statorique.....	44
III.4.2. Mise en évidence des termes de couplage.....	45
III.5. Réglage des puissances statoriques de la GADA	46
III.5.1. Réglage directe.....	46
III.5.1.1. Schéma bloc en boucle ouvert.....	46
III.5.1.2. Schéma bloc de la régulation	47
III.5.1.3. Synthèse des correcteurs	49
III.5.1.4 Schéma bloc de la régulation des puissances statoriques	50
III.6. Résultats de simulation des commandes directe et indirecte de la GADA	51
III.7. Conclusion.....	54
Chapitre IV Commande non linéaire de la GADA.	
IV.1. Introduction.....	56
IV.2. Notions d'un système à structure variable.....	57
IV.2.1. Définition.....	57
IV.3. Positionnement par rapport aux modes glissants classiques	58
IV.3.1 Rappel du problème du chattering	58
IV.3.2 Principe des modes glissants d'ordre deux	59
IV.4. Formulation mathématiques du Super-twisting	59

IV.4.1. Structure de base.....	59
IV.4.2.Interpretation.....	59
IV.5Application de la commande STA au contrôle de la GADA.....	60
IV.5.1. Contrôle des puissances statoriques active et réactive de la GADA ...	60
IV.5.1.1.Commande de la puissance active statoriques Ps.....	60
IV.5.2.Puissance réactive.....	61
IV.6. Schéma bloc du contrôle des puissances statoriques de la GADA	62
IV.7. Résultats de simulation de la commande (HOSTSMC)	63
IV.7.1. Discussions	64
IV.8. Conclusion	64
Conclusion générale	66
BIBLIOGRAPHIE	68
ANNEXE	71

Notation

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;
CSSV	C ommande S ystème à S tructure V ariable ;

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);
MPPT	M aximum P ower P oint T racking
SMC	S liding M ode C ontrol;
FLC	F uzzy L ogic C ontrol ;
FSMC	F uzzy S liding M ode C ontrol ;
IGBT	Transistors bipolaires à grille isolée (I nsulated G ate B ipolar T ransistor) ;
MOSFET	Transistors à Effet de Champ M etal- O xyde- S emi conducteur ;
GTO	Thyristors commandés à l'ouverture (G ate- T urn- O ff Thyristors) ;

Liste des Symboles

Les principales notations et abréviations utilisées dans cette thèse 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	(Var)	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 $\vec{R}_a$ par rapport au l'axe statorique $\vec{S}_a$;
θ_s	(rad)	Position angulaire l'axe statorique $\vec{S}_a$ par rapport à l'axe(d) ;
θ_r	(rad)	Position angulaire de l'axe rotorique $\vec{R}_a$ 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 magnétiques 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 mécaniques de la machine:

f_s (Hz) Fréquence des grandeurs électrique statoriques;

f_r (Hz) Fréquence des grandeurs électrique rotoriques;

Ω (rd / 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} ;

$u_{eq,xy}$ (–) Composante équivalente de la tension de commande u_{xy} ;

$u_{n,xy}$ (–) Composante normale de la tension de commande u_{xy} ;

$S_c(x)$ (–) Surface de glissement d'une variable à réguler ;

$\dot{S}_c(x)$ (–) Dérivé de la surface de glissement d'une variable à réguler;

$S_c(P_s)$ (–) Surface de glissement pour la puissance active;

$S_c(Q_s)$ (–) Surface de glissement pour la puissance réactive;

r (–) Degré relatif de la surface de glissement ;

e, e_n Erreurs absolue et normalisée ;

u, u_n		Incrément de la sortie (loi de commande), absolue et normalisée ;
μ		Fonction (degré) d'appartenance ;
D		Dépassement ;
ξ		Amortissement ;
t_m	(sec)	Temps de montée ;
$tr_{5\%}$	(sec)	Temps de réponse à 5 %

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	(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 · m)	Couple aérodynamique de la turbine;
G	(—)	Gain du multiplicateur de vitesse ;
Ω_{mec}	(rad / s)	Vitesse mécanique de la GADA;
J	(kg · m ²)	Inertie totale sur le rotor de la génératrice;
$J_{turbine}$	(kg · m ²)	Moment d'inertie totale de la turbine;
f	(Nm · s / rad)	Coefficient de frottements visqueux;
T_g	(N · m)	Couple mécanique entraînement de la génératrice;
λ	(—)	Rapport de vitesse;
β	(deg)	Angle d'orientation des pales ;
T_{em}	(N · m)	Couple électromagnétique;
T_{vis}	(N · m)	Couple des frottements visqueux;
f_e	(Nm · 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;

Introduction Générale

Introduction Générale

Ces dernières décennies, la prise de conscience des impacts environnementaux liés à l'utilisation des énergies fossiles, conjuguée à la raréfaction de ces ressources, a largement favorisé l'essor des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne occupe une place prépondérante, de par son potentiel technique et économique considérable [1].

Dans ce contexte, la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) s'est imposée comme une solution de choix pour les éoliennes à vitesse variable, notamment en raison de sa capacité à fonctionner avec un convertisseur de puissance partielle, réduisant ainsi les pertes et le coût du système [2].

Cependant, l'intégration efficace de la GADA dans un système éolien nécessite une régulation robuste et performante des puissances active et réactive statoriques. En effet, ces grandeurs sont directement couplées et sensibles aux variations paramétriques, aux perturbations externes (comme les fluctuations du vent) et aux défauts du réseau. Les techniques de commande classiques, telles que les régulateurs proportionnels-intégraux (PI), montrent leurs limites face à ces incertitudes, en raison de leur faible robustesse et de leur sensibilité aux réglages [3].

Pour pallier ces inconvénients, les commandes non linéaires et robustes, en particulier les modes glissants d'ordre supérieur, ont suscité un intérêt croissant. Parmi elles, l'algorithme *Supertwisting* se distingue par sa capacité à éliminer l'effet de *chattering* (réticence) tout en assurant une convergence en temps fini et une insensibilité aux perturbations bornées.

Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est de concevoir et d'évaluer une stratégie de régulation des puissances active et réactive statorique d'une GADA intégrée dans un système éolien, basée sur l'algorithme *Supertwisting*.

Le présent travail est organisé en quatre chapitres, structurés de manière à mener l'étude de la modélisation théorique jusqu'à la validation par simulation d'une commande avancée :

- **Le premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique sur l'énergie éolienne. Nous y présentons l'état de l'art des systèmes de conversion, en mettant l'accent sur les avantages de la Génératrice à Double Alimentation (GADA) par rapport aux autres technologies de machines électriques.
- **Le deuxième chapitre** porte sur la modélisation mathématique de la chaîne de conversion. Nous y établissons les modèles de la turbine éolienne et de la GADA dans

le repère de Park, essentiels pour la compréhension du comportement dynamique du système.

- **Le troisième chapitre** traite de la commande vectorielle par orientation du flux statorique (VOC). Ce chapitre détaille la stratégie de découplage des puissances active et réactive et présente la synthèse des régulateurs classiques de type Proportionnel-Intégral (PI) qui serviront de base de comparaison.
- **Le quatrième chapitre** constitue le cœur de notre contribution. Il est dédié à la conception et à l'application de la commande par modes glissants d'ordre supérieur, spécifiquement l'algorithme Super-Twisting. Nous y présentons les résultats de simulation.

Et en fin notre travail est achevé par une conclusion générale.

Chapitre I
Etat de l'art sur le système
éolien

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermiqueetc).

Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur L'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux.

L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne Depuis 10 ans.[4]

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par les énergies renouvelables et spécifiquement l'énergie éolienne son historique, la production éolienne et principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons traité la modélisation d'une chaîne éolienne, ainsi que la manière pour stocker cette énergie et finalement leurs avantages et inconvénients.

I.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne, qui est une partie de l'énergie renouvelable, est une énergie non polluante. Elle constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et nucléaires. La consommation d'énergie a montré que la part des énergies renouvelables dans la production mondiale de l'énergie est de 18% seulement , dont 1,8% est produite à partir des éoliennes, Mais ce secteur est en plein essor [5].



Figure I.1 : L'énergie éolienne

I.2.1. Production mondiale d'énergie éolienne :

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité. La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passait de 12 à 35 US\$.

Soudainement, les pays de l'OCDE voulurent devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité. Vingt ans plus tard, la technologie en matière d'éoliennes a mûri et les éoliennes sont passées de 10 kW à plus de 3000 Kw [6].

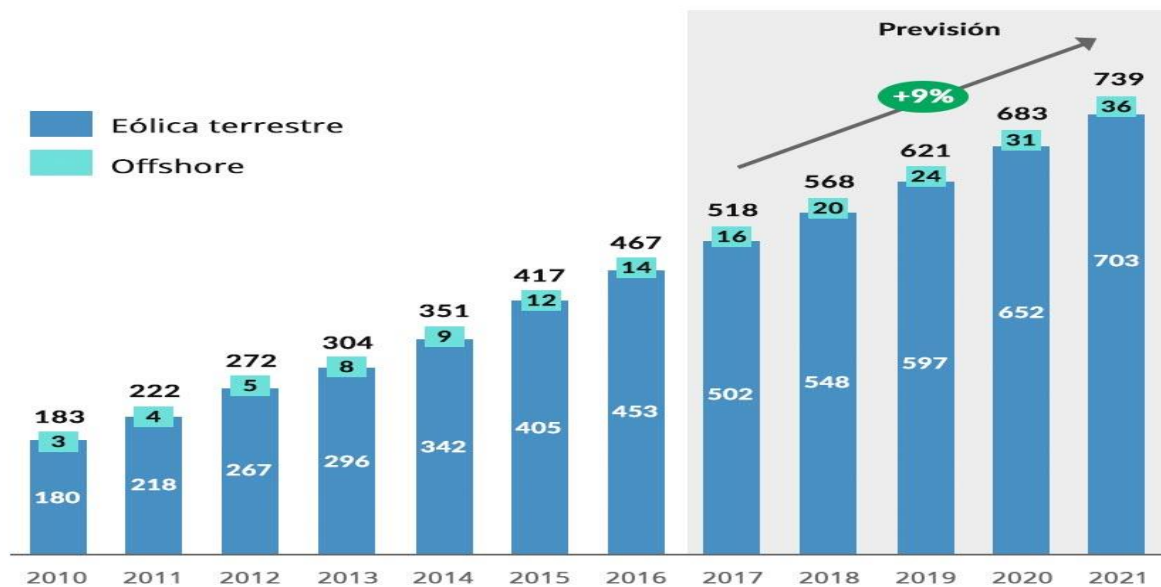


Figure I.2: l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2010-2021 [6]

I.2.2. Production optimale d'un système éolienne :

Une éolienne produit environ 1/5 de sa puissance nominale, c'est à dire qu'une éolienne de 5 MW produira en réalité l'équivalent d'1 MW car elle ne produit pas en permanence.

La mise en exploitation d'une éolienne de 1 MW permet d'éviter un rejet de 2 000 tonnes de CO₂ par an, en comptant les dépenses d'énergie liées à la construction. Une éolienne de 5 MW produit 10 millions de kWh. Une éolienne produit en 2 à 3 mois l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication, transports compris.

On distingue deux sortes d'éoliennes :

- Les petites éoliennes ou éolien individuel, dédiées aux particuliers, qui ne sont pas très grandes et produisent peu (quelques kW (0,1 à 20 kW)) elles sont installées au fond d'un jardin, ou sur le toit d'une maison, elle est équipée d'un rotor à deux ou trois pales, de 2 à 10 m de diamètre, qui tournent entre 10 et 25 tours par minute environ et fonctionne sur le même principe de base qu'un grand aérogénérateur[7] .
- Les éoliennes industrielles, qui produisent beaucoup d'énergie (100 Kw jusqu'à 4 MW, certaines éoliennes très récentes peuvent même aller jusqu'à 5MW. En moyenne, elles développent une puissance de 1,5MW., qui mesurent parfois plus de 120 m et qui coûtent très cher. Le diamètre de leur rotor peut atteindre 100 m. On les trouve généralement par groupes : on parle alors de fermes éoliennes ou de parcs éolien[7].

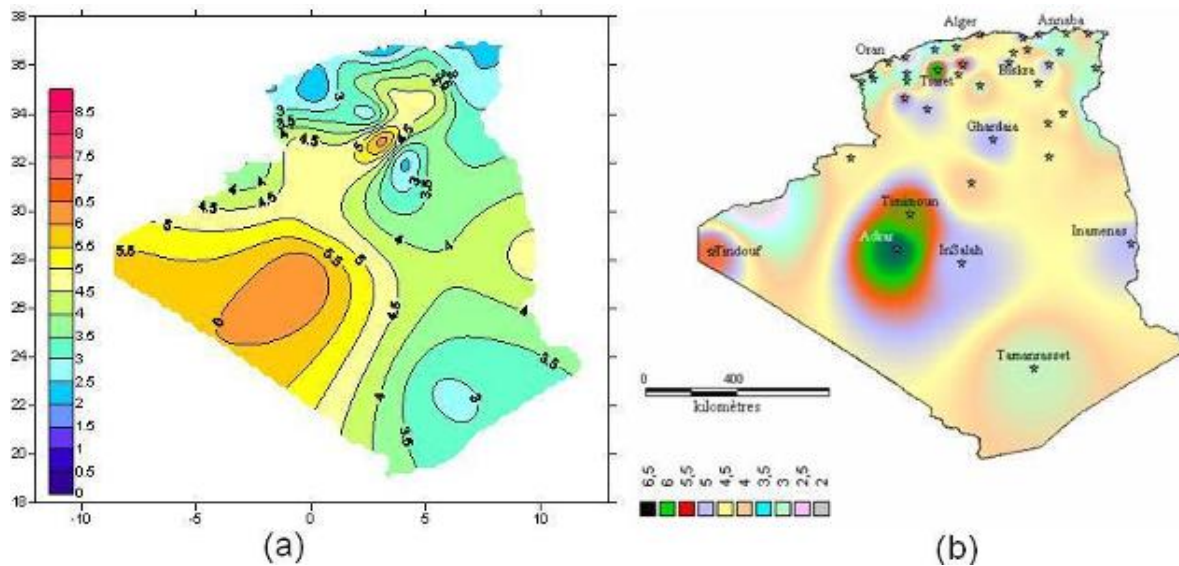
I.3. Contexte actuel en Algérie :

L'Algérie à l'instar des autre pays essaye de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays [8]. La carte représentée dans la figure (I.25) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevés que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver.



(a) Cart annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali

(b) Cart annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr kasbadji-Merzouk

Figure I.3 : carte du potentiel éolien en Algérie [8]

I.4. Un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.[9].
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [10].

Et la figure ci-dessous montre la conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique.

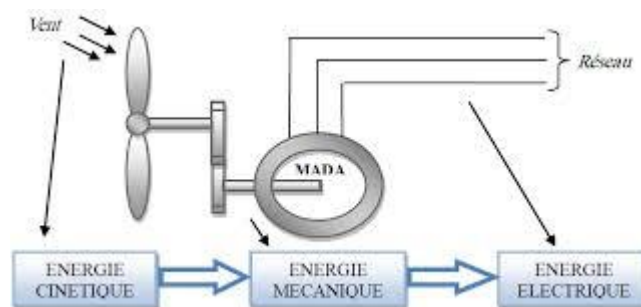


Figure I.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [11].

Le fonctionnement général est illustré par la figure I.5

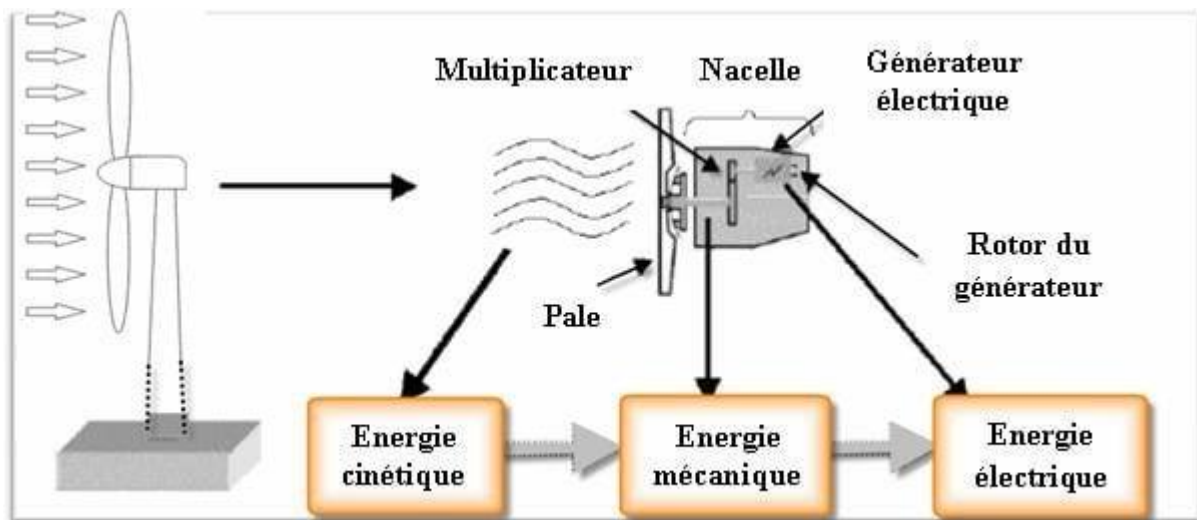


Figure I.5 : Principe de la conversion d'énergie éolienne [11]

I.6. Les différents types d'éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [12] .

I.6.1. Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus.

I.6.1.1. Les éoliennes à axe vertical de type Savonius

Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison.

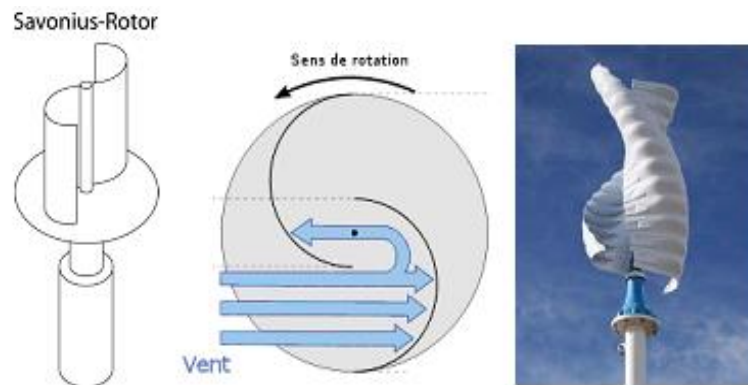


Figure I.6 : L'éolienne a axe vertical de type Savonius

I.6.1.2. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus :

Les éoliennes de type Darrieus (Georges Darrieus) peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes. Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elles ne peuvent pas démarrer toutes seules.

Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépasse que très rarement 500kW en raison de leur grande sensibilité.

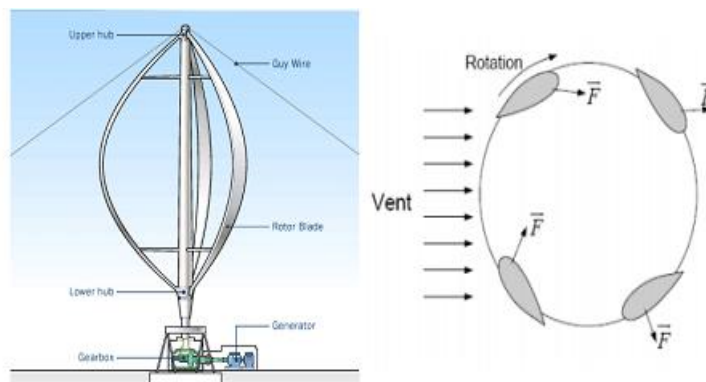


Figure I.7 : Les éoliennes à axe de type Darrieus

I.6.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à mono-pale, bipale, tripale ou multi-pales face ou sous le vent. D'une part elles sont caractérisées par leur capture du vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol, ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage car le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle. D'autre part ces éoliennes ont un coût de construction très élevé, en effet l'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident [13].

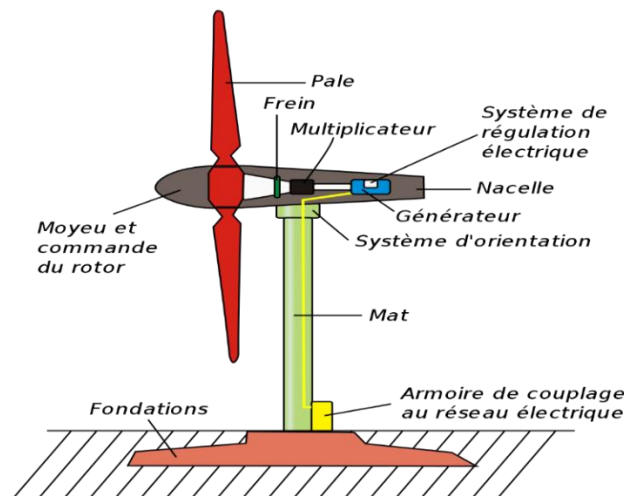


Figure I.8 : Différentes parties d'une éolienne à axe horizontal (hélice)

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée à trois éléments principaux :

Le mât : c'est un tube d'acier ou de béton, elle doit être placée le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [14].

Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité [14].

Le rotor : C'est la partie tournante dans une éolienne. Il transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Il est constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu [15].

La nacelle : est la salle des machines de la turbine.

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique telle que :

- **Multiplicateur de vitesse :** il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **L'arbre secondaire :** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **La génératrice :** C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un système de contrôle-commande :** comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôle le dispositif d'orientation en cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale transmis à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.
- **Un système de refroidissement :** qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.
- **Le dispositif d'orientation de la nacelle :** Il permet la rotation de la nacelle. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques [16]

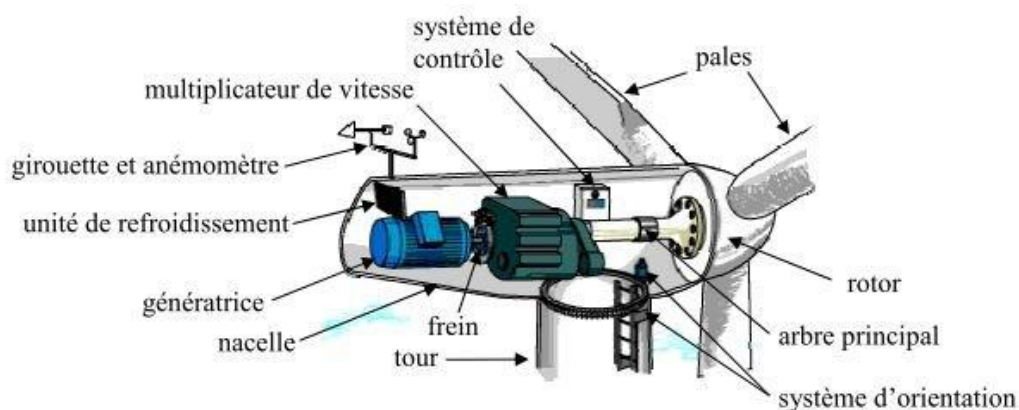


Figure I.9 : Elément d'une nacelle éolienne

Dans la partie suivante, nous allons présentons les modèles de dimensionnement associés ce système, en particulier pour la turbine éolienne.

I.7. Principe de conversion de l'énergie éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public .

I.8. Avantages et inconvénients:

L'énergie éolienne a des avantages permettant son évolution, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir. D'autre part il faut éviter l'impact créé par ses inconvénients

I.8.1. Avantages :

- L'énergie éolienne à permet d'éviter le réchauffement climatique, des pluies acides et la pollution de notre planète en général.
- Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Le coût d'investissement nécessaire d'un parc éolien est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles .

I.8.2. Inconvénients :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, notamment le bruit aérodynamique (les pales) et celle-ci doit donc être limité.
- Les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux.
- La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- L'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs sur le réseau

I.9. Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans la première partie de ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la représentation et la production mondiale de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs principales composantes. Dans la deuxième nous allons établir un modèle mathématique de la partie mécanique qui permettra de modéliser le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. Nous allons dans cette partie, commencer par modéliser le vent, puis nous allons intéresser à la modélisation de la turbine choisie. Ainsi nous avons décrit le type de stockage de l'énergie éolienne, leurs avantages et inconvénients. Dans le chapitre suivant, nous allons exploiter l'énergie éolienne dans la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en mode génératrice (GADA).

Chapitre II
Modélisation de la Machine
Asynchrone à Double
Alimentation (GADA)

II.1. Introduction

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable ; Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA).

Ce chapitre a pour objectif de présenter la modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA.

II.2. L'évolution de l'énergie éolienne

II.2.1. La nature du vent

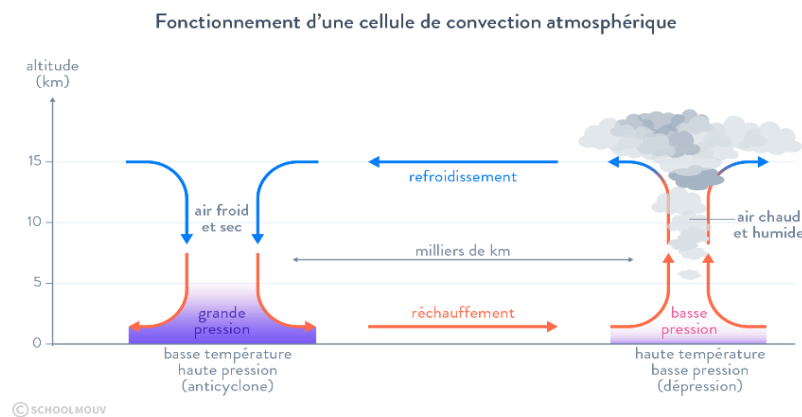


Figure II.1: cellule de convention atmosphérique .

Étant donné que l'atmosphère terrestre est chauffée de manière asymétrique par le rayonnement solaire, on observe des zones de basse pression (appelées dépressions), où l'air est moins dense en raison de sa chaleur, et des zones de haute pression (connues sous le nom d'anticyclones), où l'air est plus dense en raison de sa fraîcheur. Pour retrouver un état d'équilibre, un mouvement d'air est nécessaire : le vent se déplace des zones de haute pression

vers les régions de basse pression. . Les différents aspects de la production électrique éolienne sont représentés par la figure (II.2).

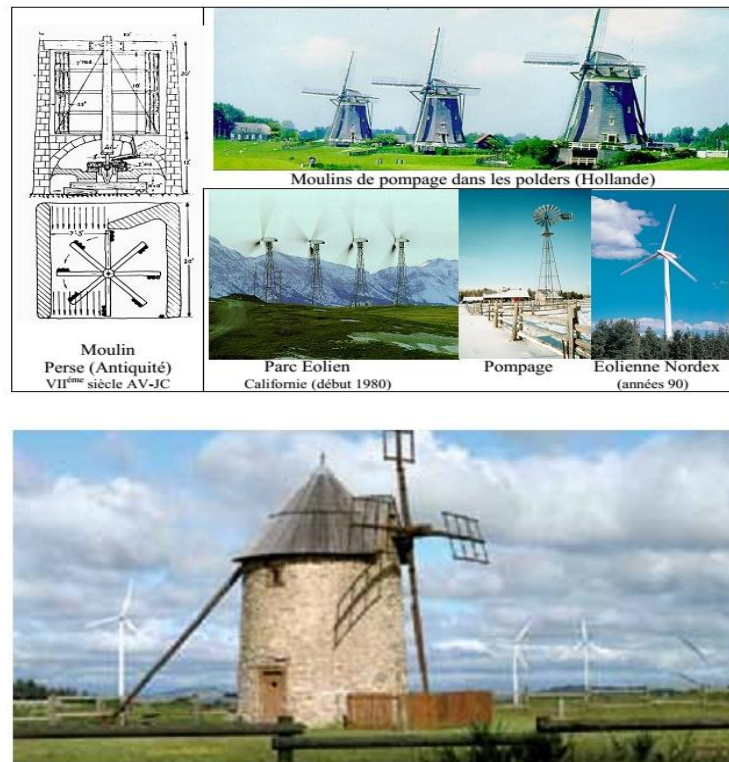


Figure II.2 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours .

II.2.2. Modélisation du vent

Dans un système éolien, le vent joue un rôle crucial et est également essentiel pour estimer la production d'électricité et la rentabilité. En effet, dans des conditions optimales, la puissance capturée par l'éolienne varie de manière cubique en fonction de la vitesse du vent. On définit ce composant comme une masse d'air en déplacement et l'énergie cinétique du vent est exprimée par:

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

Où (m) est la masse d'air en mouvement [g] ; (V) est la vitesse de déplacement d'air [m/s].

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.

$$m = \rho \cdot V_o \quad (\text{II.2})$$

La puissance du vent durant Δt [s] en fonction de l'énergie s'exprime selon :

$$P_{vent} = \frac{E}{\Delta t} \quad (II.3)$$

II.3. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique figure (II.3) [17].

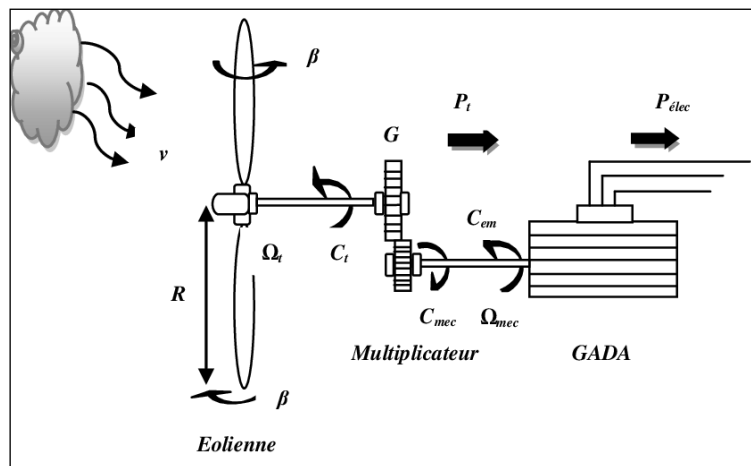


Figure II.3 : Système Eolien

II.3.1. Modélisation de la turbine

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (II.4)$$

V : La vitesse du vent;

ρ : La densité de l'air (approximativement $1.22 \text{ Kg} / \text{m}^3$ 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 apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'exprime comme suit :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (II.5)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne qui dépend de la caractéristique de la turbine .

II.3.2. La vitesse spécifique de vitesse (Tip-Speed-Ratio)

λ est le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne, c'est un paramètre de base sans unité, lié à la conception de chaque éolienne. Il représente le rapport entre la vitesse linéaire des pales et celle du vent.

λ est défini de la manière suivante:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (II.6)$$

Où :

R : Rayon de la turbine en m

V : Vitesse de vent en m/s.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine en rad/s

II.3.3. Coefficient de puissance aérodynamique

$C_p(\lambda, \beta)$ Est le coefficient de puissance aérodynamique qui varie avec la vitesse d'entrée. Ce coefficient n'a pas d'unité, il dépend du nombre de pales du rotor, du ratio de vitesse λ et de l'angle d'orientation des pales β . La limite supérieure théorique du coefficient de puissance $C_{p_{max}} = \frac{16}{27} \approx 0,5926$ est fournie par : **La loi de Betz** :

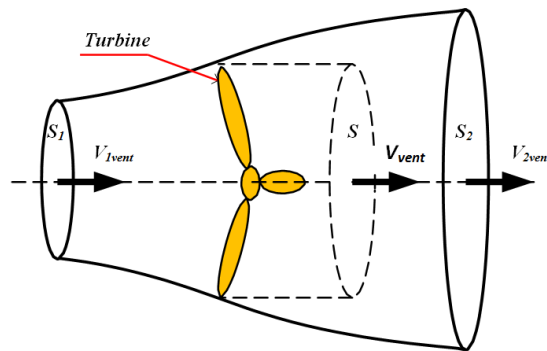


Figure II.4: Tube du courant d'air en amont et en aval d'une éolienne.

Les surfaces S_1 et S_2 correspondent aux surfaces occupées par les particules d'air participant à la conversion d'énergie. La vitesse V_2 étant plus faible que la vitesse V_1 , pour conserver la quantité de particules en déplacement, la surface S_2 est plus grande que la surface S_1 .

L'expression du coefficient de puissance est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{10 - 0.3\beta}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.7})$$

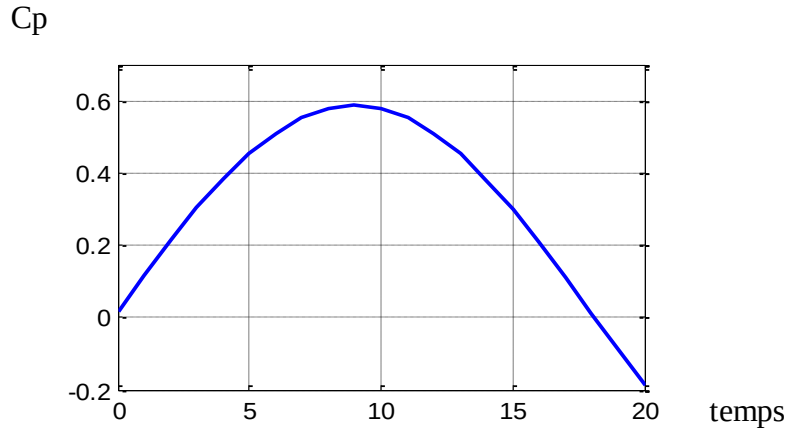


Figure II.5 : Courbe caractéristique retenue de C_p pour notre étude.

II.3.4. Couple aérodynamique

L'énergie cinétique du vent capturée par l'aérogénérateur se transforme en énergie mécanique qui se traduit par un couple aérodynamique C_{aer} faisant tourner le rotor à une vitesse $\Omega_{turbine}$. En termes de puissance, on peut écrire :

$$P_{aer} = C_{aer} \cdot \Omega_{turbine} \quad (\text{II.8})$$

En substituant l'expression (II.7) de P_{aer} dans (II.10) et en tenant compte de (II.8), on peut réécrire l'expression du couple aérodynamique sous la forme :

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

II.3.5. Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$, assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g .

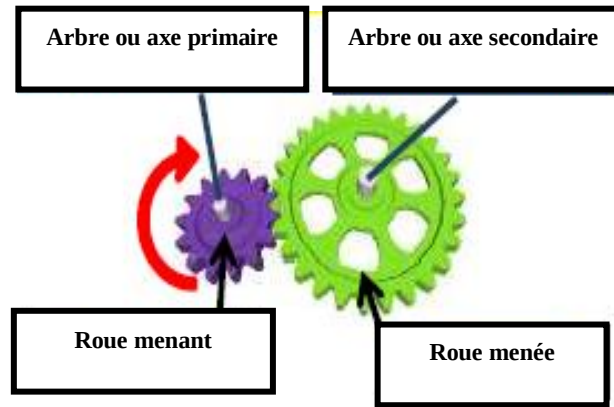


Figure II.6 : Modèle mécanique du multiplicateur.

Le schéma bloc du multiplicateur de vitesse est présenté par la figure (II.7).

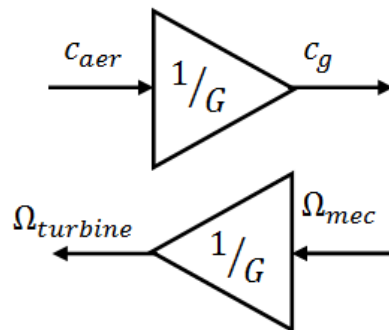


Figure II.7 : Schéma bloc du multiplicateur.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\begin{cases} C_g = \frac{C_{aer}}{G} \\ \Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \end{cases} \quad (II.10)$$

Où :

C_g : Couple de la g génératrice [N.m] ;

C_{aer} : Couple aérodynamique de la turbine éolienne [N.m] ;

Ω_{mec} : Vitesse mécanique de l'arbre de génératrice [rad/s] ;

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine en [rad/s] ;

G : Rapport de multiplication (sans unité).

II.3.6. Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J_t = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.11)$$

Donc, le modèle mécanique de la turbine est montré sur la figure suivante :

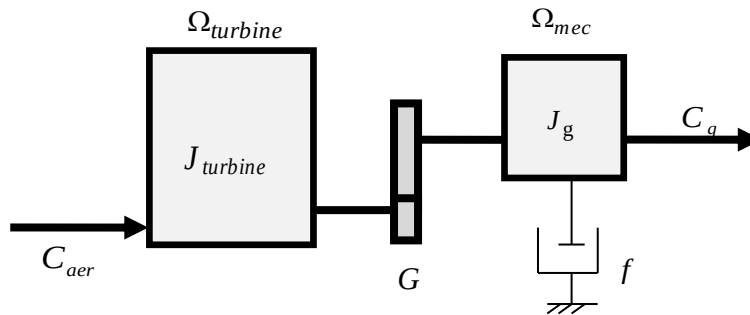


Figure II.8 : Modèle mécanique simplifié de la turbine

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

Avec :

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

J_g : Le moment d'inertie de la GADA ;

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

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

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

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet

de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J_t \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.12})$$

Où : J_t est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique est la résultante du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.13})$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Le schéma bloc de l'ensemble de la turbine éolienne est donné par :

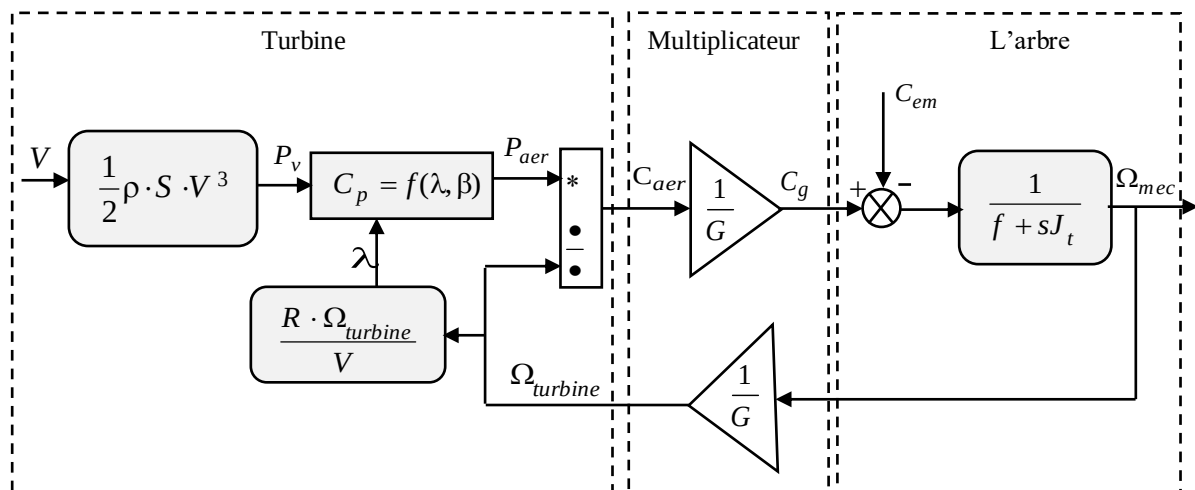


Figure II.9: Schéma bloc du modèle de l'ensemble de la turbine éolienne.

II.3.7. Description du système électrique

Dans ce travail, nous avons étudié une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus connue sous l'appellation de Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA). L'architecture de l'ensemble du système éolien étudié est présentée par la figure (II.10).

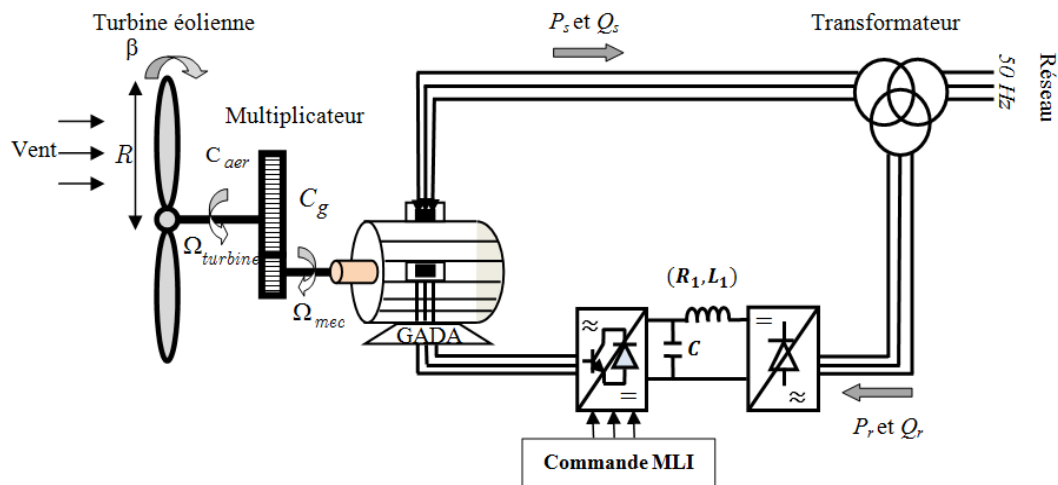


Figure II.10: Schéma bloc du modèle de l'ensemble de la turbine éolienne.

II.4. Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

II.4.1. Modèle triphasé de la GADA

La GADA considérée dans cette étude est une génératrice asynchrone triphasée à rotor bobiné, constituée d'un stator fixe portant trois enroulements identiques logés dans des encoches, ayant un nombre 'p' de paires de pôles et décalés entre eux d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$, et d'un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine qui comporte aussi trois enroulements triphasés, connectés en étoile et dont les extrémités sont raccordées à un système bagues-balais.

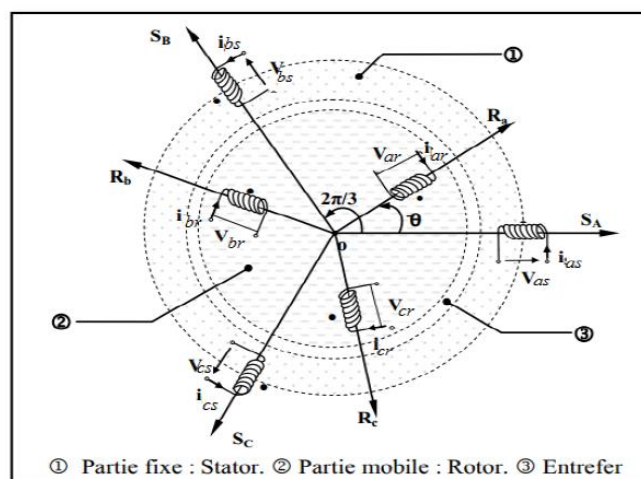


Figure II.11: Représentation électrique de la GADA.

II.4.2. Hypothèses simplificatrices

Notre étude s'appuie sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Circuit magnétique non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartitions sinusoïdales.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé. Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :
- L'additivité des flux,
- La constante des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.4.3. Les équations électriques

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

$$v(t) = R i(t) + \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (\text{II.15})$$

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

- Les tensions statoriques triphasées données par :

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{II.17})$$

- Les tensions rotoriques triphasées s'écrivent comme suivant :

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Où

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (\text{II.19})$$

Avec :

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

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

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;

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

$$[\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M][I_r] \quad (\text{II.20})$$

$$[\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M][I_s] \quad (\text{II.21})$$

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

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

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

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

m_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique;

II.4.4. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park (d, q)

Afin d'obtenir une représentation mathématique plus simple de la machine, son modèle diphasé dans le repère de *Park* tournant noté (d, q) est présenté dans cette section ; ' d ' désigne l'axe direct du repère et ' q ' désigne son axe en quadrature. Ce modèle est un outil mathématique qui permet de ramener les variables d'un repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère biphasé tournant $(d - q)$.

Cette transformation est appelée la transformation de Park du nom de Robert H. Park qui écrivit ces équations en 1929 dans un article publié par l'American Institute of Electrical Engineers. Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère comme le montre les figures (II.12) et (II.13).

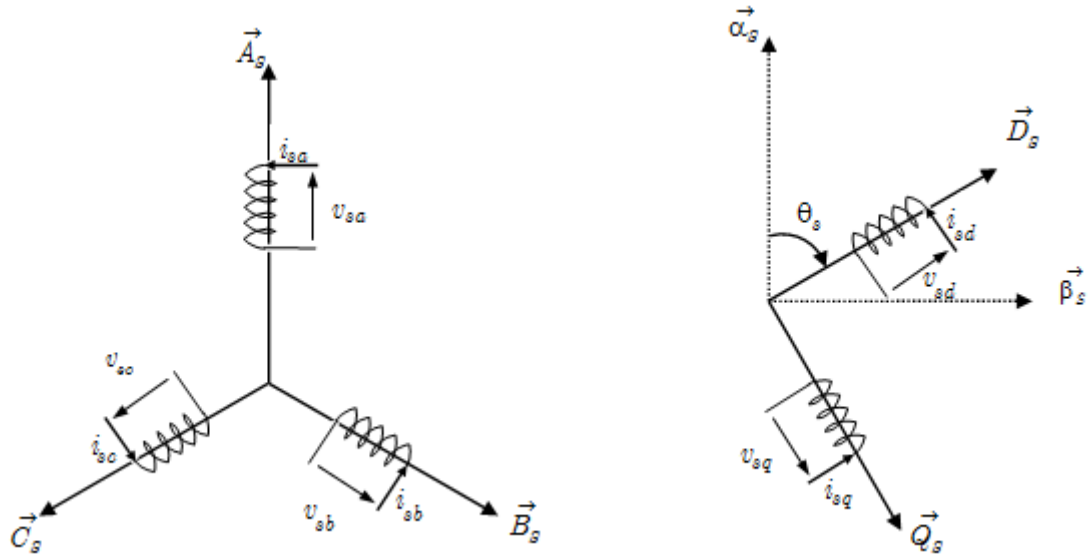


Figure II.12: Repérage angulaire du système d'axes $(d - q)$ associé au stator de la GADA.

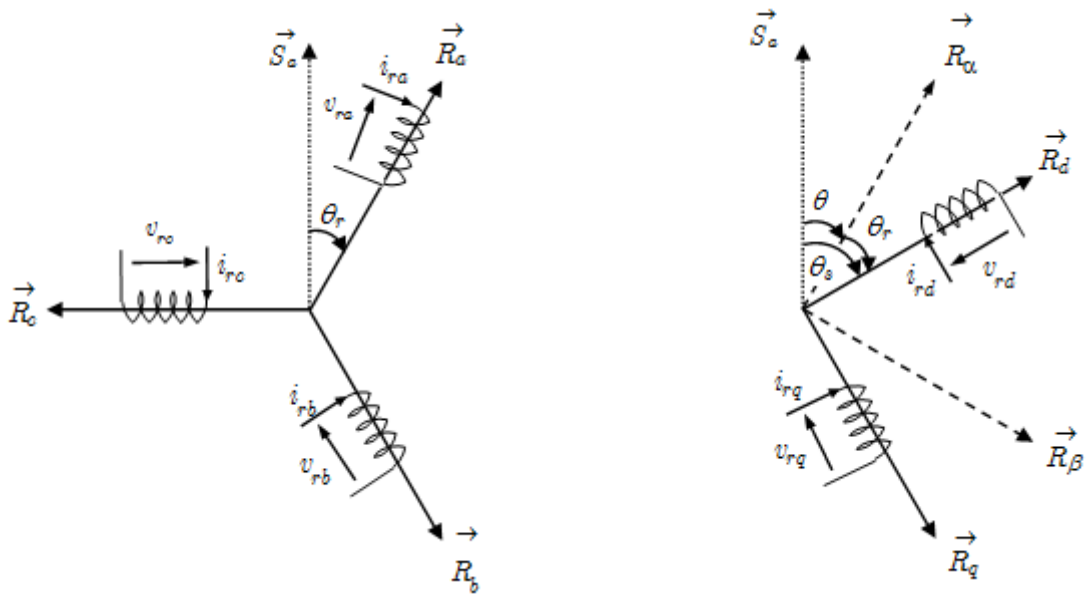


Figure II.13 : Repérage angulaire du système d'axes $(d - q)$ associé au rotor de la GADA.

Selon les figures (II.12) et (II.13), les angles θ_s et θ_r sont liés à l'angle θ par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.22})$$

Et par suite:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.23})$$

Le passage du repère triphasé vers un repère diphasé est obtenu par la multiplication des grandeurs de tensions, de courants et de flux par une matrice de transformation, définie par [18] :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)][x_{abc}] \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Et

$$[P(\theta)^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Selon l'objectif de modélisation et le principe de fonctionnement de la machine, nous avons trois références de Park qui sont :

- Repère fixe au stator appelé (référentiel stationnaire $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$) : Ce repère est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- Repère fixe au rotor appelé (référentiel tournant $\frac{d\theta_r}{dt} = 0 = \omega = p \cdot \Omega$) : Ce choix du repère est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.
- Repère fixe au champ tournant statorique (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$) : Ce repère est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande. Les axes sont désigné par (d, q) .

II.4.4.1. : Equation mathématiques de la GADA dans le repère (d,q)

- **Equations électriques**

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

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

- **Relations flux – courants**

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

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Où :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

- **Equation mécanique**

L'équation mécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_m \quad (II.30)$$

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

$$C_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (II.31)$$

▪ Couple électromagnétique

L'équation générale du couple électromagnétique est exprimée par:

$$C_{em} = [I_s]^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [M] \right\} [I_r] \quad (II.32)$$

En appliquant la transformation de Park, nous achevons à l'expression :

$$C_{em} = p \cdot M(i_{rd} i_{sq} - i_{sd} i_{rq}) \quad (II.33)$$

Avec l'utilisation des équations (II.31), (II.32) et (II. 33), d'autres expressions du couple électromagnétique peuvent être déduits :

$$C_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (II.34)$$

Où :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (II.35)$$

• Puissances statoriques

Les puissances actives et réactives échangées avec le réseau électrique dépendent aussi des variables électriques du stator et du rotor. Au stator, les puissances active et réactive sont respectivement données par **[19]** :

$$\bar{S}_s = V_s \bar{I}_s^* \quad (II.36)$$

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

$$\begin{cases} P_s = \text{Réel} [\bar{S}_s] \\ Q_s = \text{Im} [\bar{S}_s] \end{cases} \quad (II.37)$$

Après la transformation de Park, nous trouvons :

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

II.4.4.2. Modèle d'état de Park de la GADA

Nous pouvons exprimer le modèle d'état de Park de la GADA sous la forme matricielle suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + \omega_s \cdot \phi_{sq} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} + v_{sd} \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = -\omega_s \cdot \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} + v_{sq} \\ \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sq} - (R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s) i_{rd} + \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \left(v_{rd} - \frac{M}{L_s} v_{sd} \right) \\ \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} - \sigma L_r \omega_r i_{rd} - (R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s) i_{rq} + \left(v_{rq} - \frac{M}{L_s} v_{sq} \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (C_g - C_{em}) - \frac{F}{J} \cdot \omega \end{array} \right. \quad (\text{II.39})$$

Où :

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

II.5. Modélisation des convertisseurs statiques

L'alimentation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) au niveau du rotor est assurée par un ensemble d'une chaîne de conversion électrique comprend :

- Un redresseur d'entrée,
- Un filtre passe bas comportant un condensateur de forte capacité qui rend négligeable les ondulations de la tension U à l'entrée de l'onduleur et une inductance pour le lissage du courant.
- Un onduleur à MLI de tension.

Le schéma de l'association convertisseurs – GADA est donné par la figure (II.14).

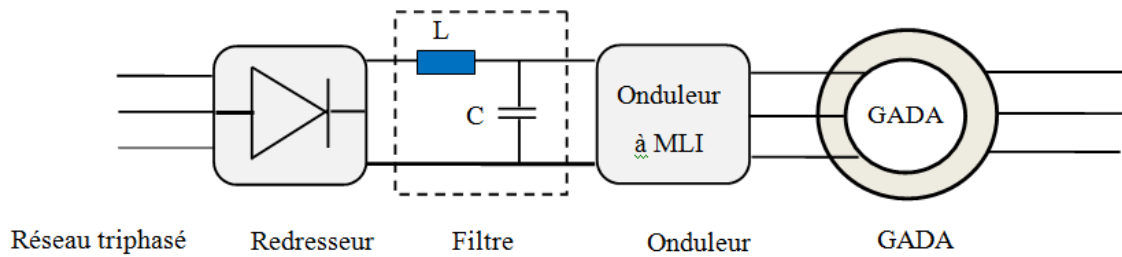


Figure II.14: L'ensemble convertisseur-GADA.

Le convertisseur considéré dans notre étude, est un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

II.5.1. Description de l'onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continue en une alimentation de tension alternative d'amplitude et de fréquence réglables pour alimenter des charges en courant alternatif. La puissance maximale de l'onduleur transmise reste à déterminer selon les caractéristiques propres de la machine à alimenter. Notre travail repose sur le choix d'un onduleur de tension à MLI.

La figure (II.15) représente le schéma de principe de l'onduleur triphasé à deux niveaux de tension montée en pont alimentant une charge triphasée. Il s'agit d'un onduleur de tension possédant six cellules de commutation et six diodes de roue libre. Chaque bras de l'onduleur comporte deux cellules de commutations constituées chacune, de l'interrupteur avec sa diode.

Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires afin de ne pas court-circuiter l'alimentation continue de l'onduleur, les interrupteurs d'électroniques de puissance se composent, selon la puissance commutée, des transistors (bipolaires, MOSFET, IGBT) et les thyristors rapides (principalement les GTO).

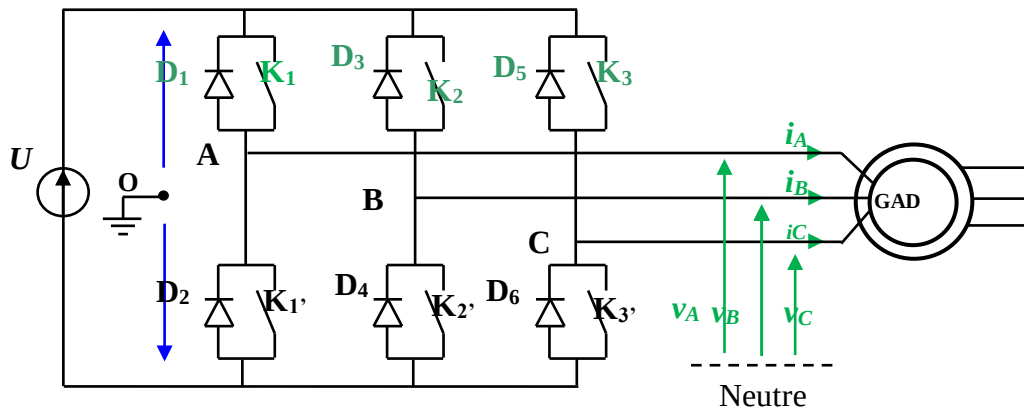


Figure II.15: Représentation schématique d'un onduleur de tension.

II.5.2. Commande de l'onduleur de tension à MLI (sinus-triangle)

La technique de la MLI repose sur la comparaison entre deux signaux:

- Signal de référence (Modulatrice) représente la forme de la sinusoïde v_{ref} qu'on désire à la sortie de l'onduleur et de fréquence f_{ref} ;
- Signal porteuse (Triangulaire) v_p , définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de hautes fréquences f_p par rapport au signal de référence.

L'onde en impulsion est meilleure que l'onde rectangulaire (plein onde) ($f_p > 20 \cdot f_{ref}$), de ce fait, la fermeture des interrupteurs est défini par les intersections entre les deux ondes, quant à la fréquence de commutation, elle est déterminée par celle de la porteuse. La figure (II.17) représente le principe de la commande à modulation de largeur d'impulsion MLI sinus-triangle.

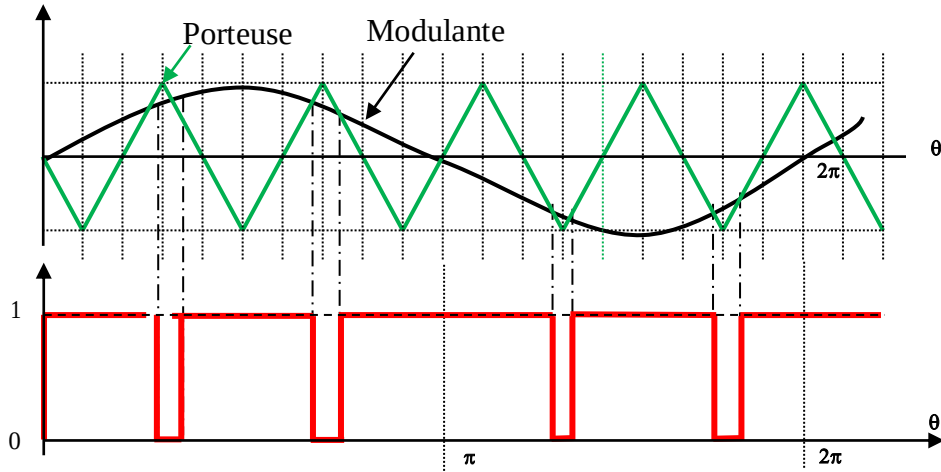


Figure II.16: Principe de la commande MLI sinus-triangle

La fonction logique S_x associée au signal de commande est définie par :

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{Si } v_{ref} \geq V_p \\ 0 & \text{Si } v_{ref} \leq V_p \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

II.5.2.1. Equation de la porteuse

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par une fréquence f_p ($T_p = 1/f_p$) et de sa valeur crête V_{pc} . On définit l'équation de la porteuse par [24] :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_{pc}(-1 + 4\frac{t}{T_p}) & t \in \left[0, \frac{T_p}{2}\right] \\ x_2(t) = V_{pc}(3 - 4\frac{t}{T_p}) & t \in \left[\frac{T_p}{2}, T_p\right] \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

II.5.2.2. Equation de la référence

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude v_{ref} et de fréquence f_{ref} . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par :

$$\begin{cases} v_{ref,a} = v_{ref} \sin \omega_{ref} t \\ v_{ref,b} = v_{ref} \sin(\omega_{ref} t - 2\pi/3) \\ v_{ref,c} = v_{ref} \sin(\omega_{ref} t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

II.5.3. Caractéristiques de la MLI

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande : l'indice de modulation et le taux de modulation .

➤ *L'indice de modulation en fréquence I_m*

L'indice de modulation en fréquence I_m est défini comme étant le rapport de la fréquence du signal triangulaire f_p par rapport à la fréquence f_{ref} de la référence sinusoïdale [20].

$$I_m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (II.43)$$

Lorsque la valeur de I_m augmente, les harmoniques se déplacent vers les fréquences élevées. Ce qui est un avantage, par contre on obtient une augmentation du déchet de tension. Donc, l'optimisation de la valeur de I_m est nécessaire [21].

➤ **L'indice de modulation en amplitude**

C'est un coefficient de réglage de la tension, qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à l'amplitude de la porteuse [20].

$$T_m = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (II.44)$$

La modulation sinus-triangle pour inconvénient de générer des impulsions dissymétriques par rapport à une période de la porteuse. Ainsi que les instants de commutation ne peuvent être exprimés sous forme analytique simple; ce qui rend délicate sa mise en œuvre dans les applications numériques.

Par contre l'avantage majeur de cette technique, repose soit sur la réduction et élimination des harmoniques non désirés ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants; ce qui conduit à la réduction des harmoniques dans le réseau électrique et la minimisation des pertes dans le système ; donc amélioration du rendement.

II.7. Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la modélisation du système éolien en utilisant la GADA. D'abord, nous avons mis en place la modélisation du profil de vent ainsi que les équations mathématiques des éléments du système de turbine. Ce chapitre traite en deuxième partie la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation pour son utilisation en tant que génératrice, ainsi que celle des convertisseurs statiques qui permettent la connexion de la GADA au réseau électrique.

Lors de cette modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation. Ce modèle est de type courants rotoriques et flux statoriques ; et comme ce modèle mathématique obtenu est fortement couplé. De plus, l'expression du couple électromagnétique montre une interaction complexe entre les champs statorique et rotorique, il est indispensable de trouver une méthode de commande permettant un contrôle découplé des puissances active et réactive du côté du stator.

Chapitre III
Commande vectorielle de
la (GADA)

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons le réglage des puissances statoriques d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA) à rotor bobiné, alimentée par un onduleur de tension, afin de contrôler les puissances statoriques injectées dans le réseau électrique. L'intérêt principal de l'utilisation de cette machine, au-delà de la réduction de la taille des convertisseurs, réside dans sa capacité à fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne.

Le modèle mathématique de la machine dans le troisième chapitre, il est indispensable de mettre en place une commande appropriée pour maîtriser efficacement les puissances statoriques, garantissant ainsi un fonctionnement optimal de la GADA en mode génératrice. À cet effet, la machine sera pilotée via les tensions rotoriques, ce qui permettra de réguler précisément les composantes actives et réactive des puissances statoriques produites. Cette méthode s'avère particulièrement utile pour la gestion performante de l'éolienne.

III.2. La commande vectorielle : principes et objectifs

Le principe de cette technique consiste à éliminer le problème de couplage entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Pour cela, le courant statorique est décomposé en deux composantes, directe et en quadrature, dans un repère de référence lié au flux statorique. Ainsi, l'une des composantes contrôle le flux tandis que l'autre contrôle le couple. Cette approche permet de faire fonctionner la GADA de manière analogue à une machine à courant continu à excitation séparée, où le courant inducteur pilote le flux et le courant induit contrôle le couple électromagnétique [22].

Plusieurs variantes de ce principe de commande ont été proposées dans la littérature, que l'on peut classer selon l'orientation du repère ($d - q$):

- Orientation suivant le flux rotorique.
- Orientation suivant le flux statorique.
- Orientation suivant le flux d'entrefer.

Dans ce travail, nous développons la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation avec une orientation du repère suivant ($d - q$) le flux statorique. Ce type de commande, dite « commande à flux statorique orienté », est utilisé pour atteindre le mode de fonctionnement souhaité en positionnant de manière optimale le vecteur courant statorique et le vecteur flux magnétique.

La commande vectorielle de la GADA avec orientation du flux statorique se compose de trois parties principales [23] :

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

Pour établir cette commande vectorielle, nous faisons l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques et rotoriques de la machine sont triphasés équilibrés, ce qui signifie que toutes les composantes homopolaires sont nulles [24].

III.3. Synthèse de la commande à flux orienté de la GADA

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

$$\begin{cases} v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \\ v_{sq} = \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} \\ \left(v_{rd} - \frac{M}{L_s} v_{sd} \right) = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sq} + \left(R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} \\ \left(v_{rq} - \frac{M}{L_s} v_{sq} \right) = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \left(R_r + \frac{M}{L_s} \frac{M}{L_s} R_s \right) i_{rq} \end{cases} \quad (III.1)$$

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

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (III.2)$$

III.3.1. Orientation de flux statorique

Le principe d'orientation de flux statorique consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe « d » du référentiel tournant, comme il est montré dans la figure (III-1). Le flux sera callé sur l'axe d et la tension du stator sur l'axe « q ». Cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié.

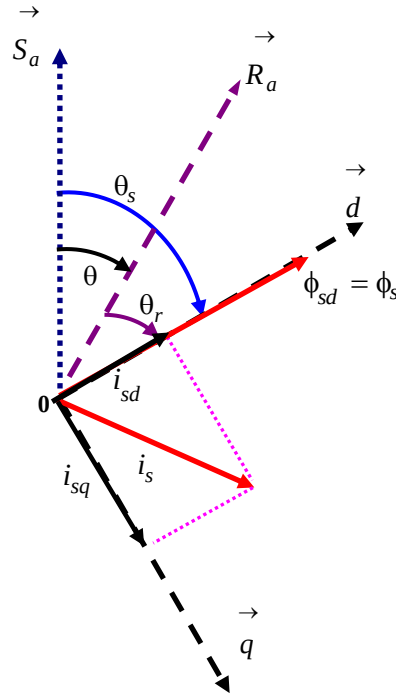


Figure (III-1) : Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Avec cette orientation, le modèle obtenu de la GADA se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Ainsi, nous obtenons $\phi_{sq} = 0$ et $\phi_{sd} = \phi_s$. Donc, nous pouvons écrire les équations des tensions statorique et rotoriques de la machine comme suite :

▪ **Tensions statoriques**

▪

$$\begin{cases} v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \\ v_{sq} = \omega_s \cdot \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (III.3)$$

▪ **Tensions rotoriques**

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{M}{L_s} \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + (R_r + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{M}{L_s} R_s) i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} v_{sd} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} - \frac{M}{L_s} \omega \phi_{sd} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + (R_r + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{M}{L_s} R_s) i_{rq} + \frac{M}{L_s} v_{sq} \end{cases} \quad (III.4)$$

En remplaçant les équations des tensions statoriques (4.3) dans les équations des tensions rotoriques (4.4), nous obtenons le modèle suivant:

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} - \sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

En posant les $f \cdot e \cdot m$ suivantes :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} + f_{em,d} \\ v_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + R_r i_{rq} + f_{em,q} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Avec la transformé de Laplace, nous écrivons :

$$\begin{cases} (\sigma L_r \cdot s + R_r) i_{rd} = v_{rd} - f_{em,d} \\ (\sigma L_r \cdot s + R_r) i_{rq} = v_{rq} - f_{em,q} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Ou :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) \\ i_{rq} = \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

A partir de ces équations, nous pouvons tracer le schéma bloc du modèle simplifié des courant rotoriques de la GADA suivant la figure (4-2) :

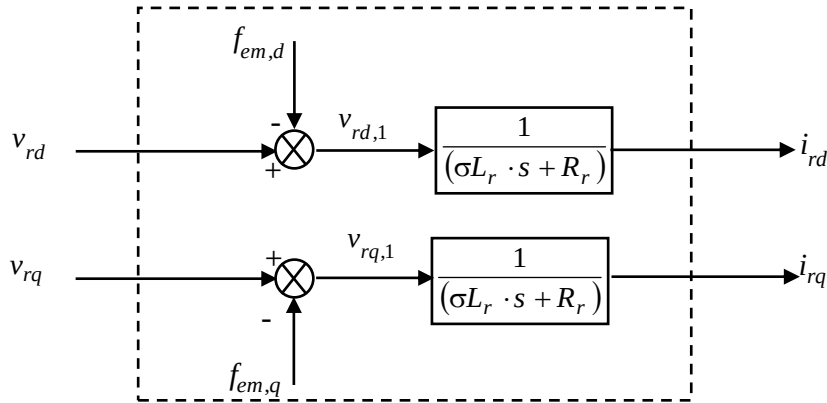


Figure (III-2) : Modèle simplifié des courants rotoriques de la GADA.

▪ Puissances statoriques

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

$$\begin{cases} P_s = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q_s = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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

$$\begin{cases} P_s = V_s i_{sq} \\ Q_s = V_s i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

D'après les relations flux – courants (3.14), les flux statoriques s'écrivent :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Après orientation du flux statoriques, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ 0 &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Alors :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(i_{rd} - \frac{\phi_s}{M} \right) \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

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

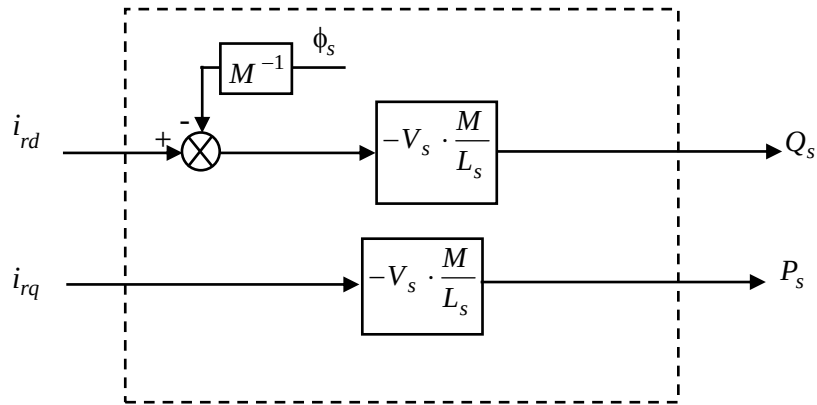


Figure (III-3) : Modèle simplifié des puissances statoriques de la GADA.

III.4. Modèle simplifié de la GADA avec orientation du flux statorique

Dans ces conditions, nous pouvons réaliser un modèle simplifié pour les enroulements rotoriques de la GADA suivant la figure (III-4) :

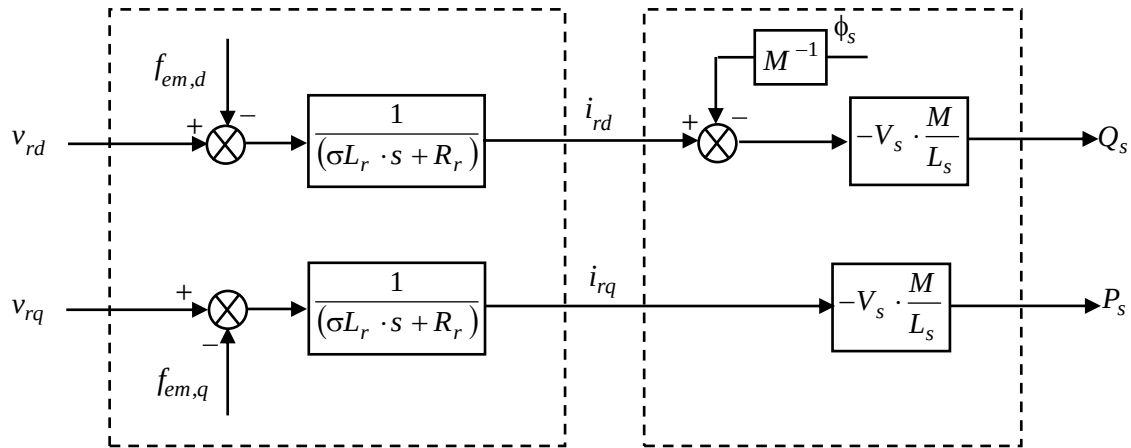


Figure (III-4) : Modèle réduit des puissances statoriques de la GADA.

Pour ce schéma bloc, 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.4.1. Estimation du flux statorique

$$\phi_{sd} = \phi_s$$

Vu les inconvénients liés à l'introduction des capteurs servants à mesurer le flux statorique, *Hasse* a proposé une méthode se basant sur le modèle dynamique du flux magnétiques qui nous permet l'estimation à partir des grandeurs facilement mesurables tel que les tensions et les courants [25].

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

A partir du modèle orienté de la machine :

$$v_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} + \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \quad (III.16)$$

D'après la transformation de Laplace, nous obtenons :

$$\left(s + \frac{R_s}{L_s} \right) \phi_{sd} = v_{sd} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \quad (III.17)$$

Donc :

$$\phi_{sd} = \frac{1}{s + \frac{R_s}{L_s}} \left(v_{sd} + M \frac{R_s}{L_s} i_{rd} \right) \quad (\text{III.18})$$

▪ **Estimation de ϕ_{sd} à partir de la mesure des courants :**

A partir de l'équation(III.14),la composante directe du flux statorique s'écrit :

$$\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (\text{III.19})$$

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

D'après le modèle de base de la GADA de l'équation (II.26), nous avons :

$$\frac{d}{dt} \phi_{sq} = v_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{III.20})$$

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

$$\frac{d}{dt} \phi_{sq} = v_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{III.21})$$

Pour $\phi_{sq} = 0$:

$$0 = v_{sq} - \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{III.22})$$

Cela signifie

$$\phi_{sd} = \frac{v_{sq}}{\omega_s} \quad (\text{III.23})$$

Ou :

$$\phi_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (\text{III.24})$$

III.4.2. Mise en évidence des termes de couplage

Les termes et correspondent aux termes de couplage entre les axes (d) et (q) sont données par :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \cdot \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = -\sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \cdot \omega_r \cdot \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

En utilisant l'équation (III.24), nous obtenons :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -g \sigma L_r \omega_s i_{rq} \\ f_{em,q} = +g \sigma L_r \omega_s i_{rd} + g \frac{M}{L_s} V_s \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

III.5. Réglage des puissances statoriques de la GADA

Il apparaît une solution pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un correcteur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode est appelée **méthode directe** car les correcteurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

III.5.1. Réglage 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.

III.5.1.1. Schéma bloc en boucle ouverte

Par la substitution des courants rotoriques de l'équation (III.9) dans l'équation (III.15), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(\frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) - \frac{\phi_{sd}}{M} \right) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

Ou :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{(\sigma L_r \cdot s + R_r)} (v_{rd} - f_{em,d}) + V_s \cdot \frac{\phi_{sd}}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Avec

$$\begin{cases} f_{em,d} = -\sigma L_r \omega_r i_{rq} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ f_{em,q} = \sigma L_r \omega_r i_{rd} + \frac{M}{L_s} \omega_r \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

D'après le modèle des puissances (III.28), le contrôle des puissances de la GADA revient alors à contrôler les deux puissances P_s et Q_s par les deux composantes v_{rd} et v_{rq} . Nous remarquons aussi qu'il y a un grand couplage entre les puissances statoriques et les tensions rotoriques selon le modèle de puissance (III.28). Nous disons que les deux puissances comportent des termes croisés. Donc, il est nécessaire de réaliser un découplage pour contrôler séparément ces puissances. Dans ce cas, nous utilisons le découplage par compensation. A partir des équations (III.28), nous pouvons établir le schéma bloc simplifié de la GADA :

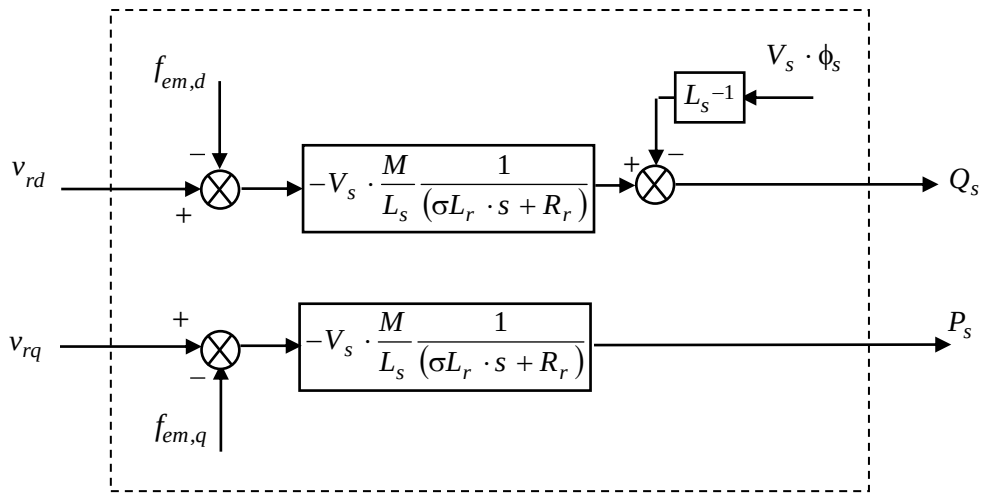


Figure (III-5) : Modèle réduit des puissances statoriques de la GADA.

III.5.1.2. Schéma bloc de la régulation

Pour réguler les puissances statoriques de la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation pour chaque puissance avec un correcteur indépendant, tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (III-5). Nous obtenons, ainsi, un découplage par compensation, qui permet de rendre les axes d et q complètement indépendants, comme le montre la figure (III-6).

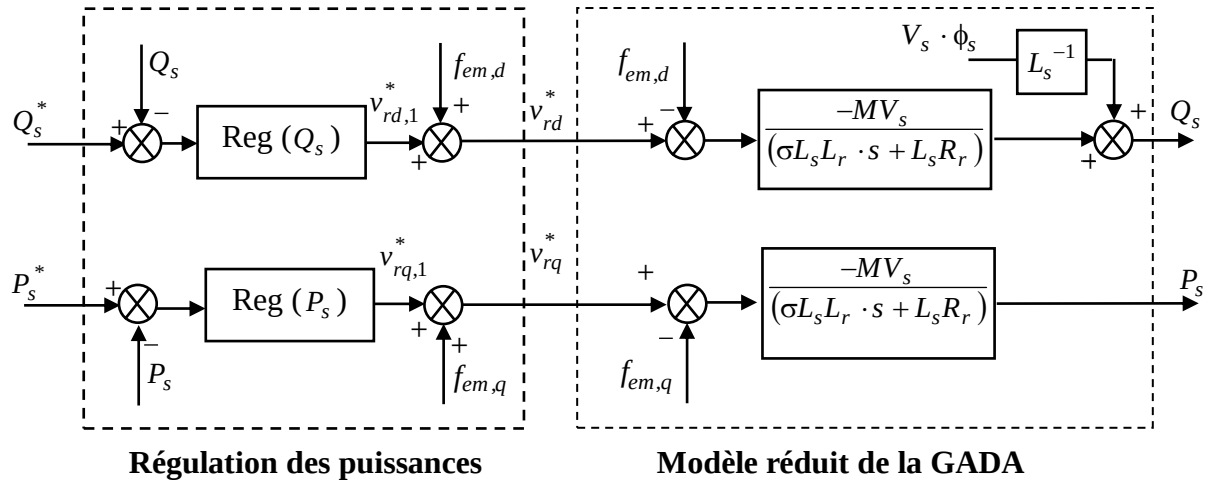


Figure (III-6) : Contrôle des puissances statoriques de la GADA.

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

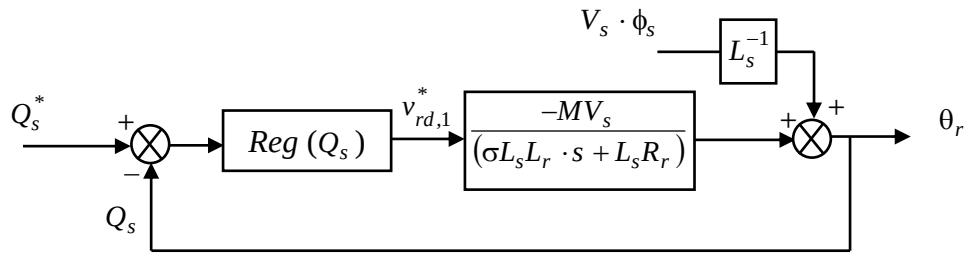


Figure (III-7) : Boucle de régulation de la puissance Q_s après découplage.

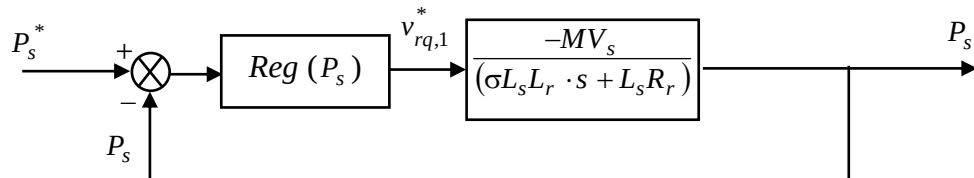


Figure (III-8) : Boucle de régulation de la puissance P_s après découplage.

III.5.1.3. Synthèse des correcteurs

Le correcteur Proportionnelle Intégrale (PI) utilisé pour le réglage des puissances de la GADA est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir. Sa fonction de transfert est :

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.30})$$

D'après les figures (III-7) et (III-8), la fonction de transfert en boucle ouverte $F(s)$ est donnée par :

$$F(s) = \frac{A}{1 + T \cdot s} \quad (\text{III.31})$$

Avec

$$\begin{cases} A = \frac{-MV_s}{L_s R_r} \\ T = \sigma T_r \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

La boucle de régulation du courant i_{rd} est représentée par la figure (III-9) :

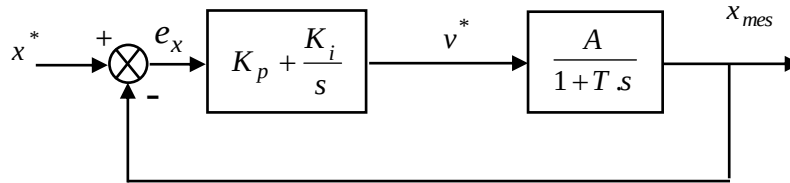


Figure (III-9): Système à régulé par un correcteur PI.

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

$$FTBO = \frac{\frac{A}{T}(K_p \cdot s + K_i)}{s^2 + s\left(\frac{1 + A \cdot K_p}{T}\right) + \frac{A \cdot K_i}{T}} \quad (\text{III.33})$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (III.33) est du deuxième ordre, nous

imposons deux pôles à partie réelle négative .Pour avoir plus de souplesse dans le choix des dynamiques de régulation, nous utilisons le faisceau de courbes présenté à l'annexe (C), pour le quel de dénominateur des fonctions de transfert correspondantes est de la forme :

$$D(s) = s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2 \quad (\text{III.34})$$

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

$$\begin{cases} K_p = \frac{(2 \cdot T \cdot \xi \cdot \omega_0 - 1)}{A} \\ K_i = \frac{T \cdot \omega_0^2}{A} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

III.5.1.4. 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 coté, 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-10)).

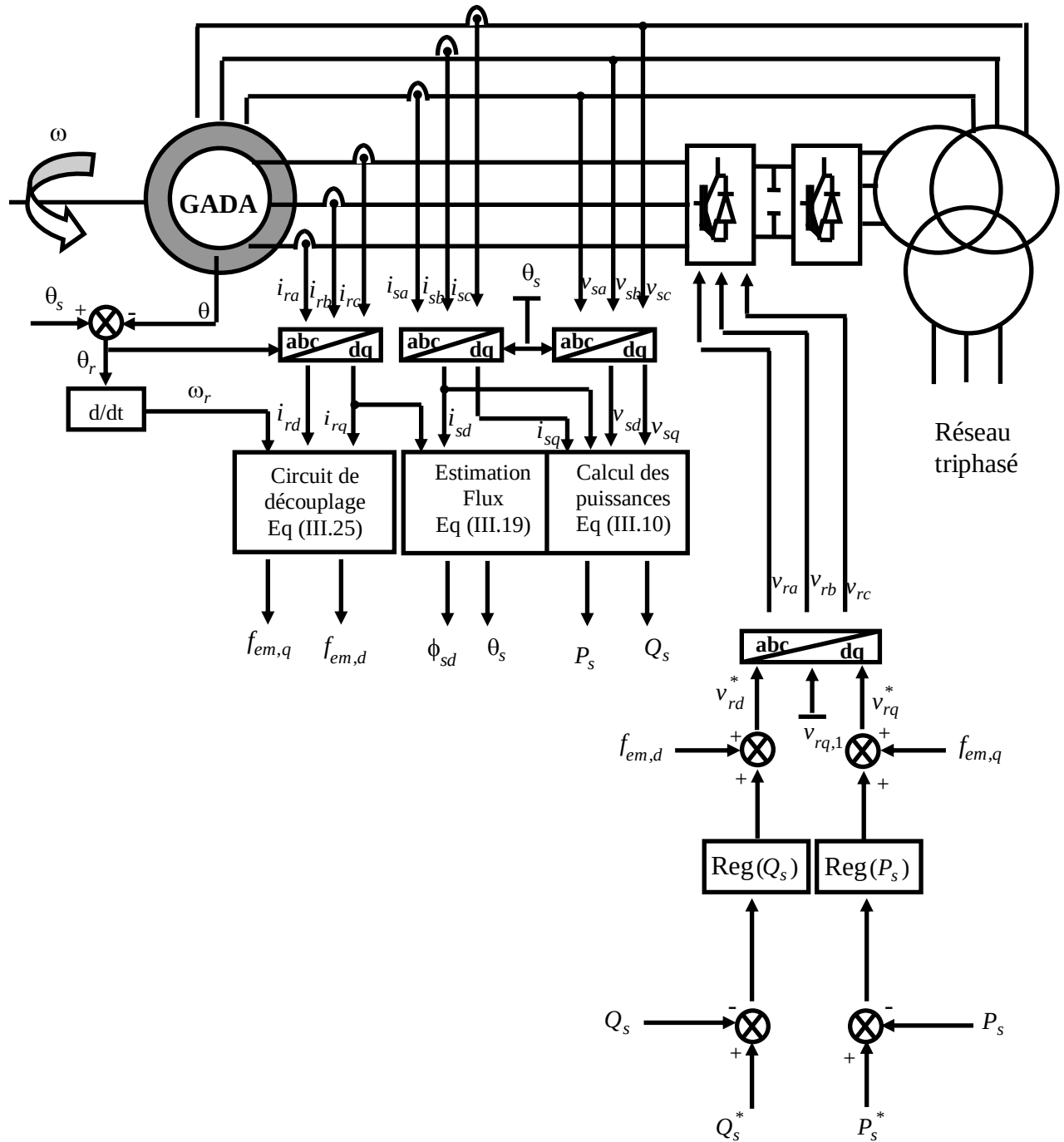


Figure (III-10) : Schéma bloc de la méthode directe de réglage des puissances statoriques

III.6 Résultats de simulation des commandes directe et indirecte de la GADA

Les paramètres de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) de 7,5 kW utilisées dans la simulation sont reportés en annexe 1.

La figure (III.11) illustre les profils de références de la puissance active et réactive statorique.

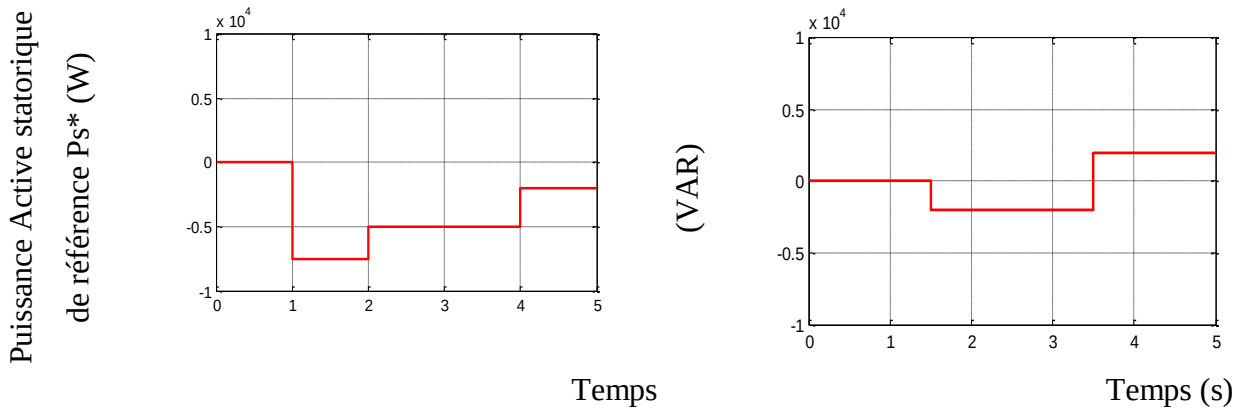


Figure III.11 : Profils de références des puissances statoriques active P_s^* et réactive Q_s^* .

Pour étudier et visualiser le comportement de la commande directe, nous avons soumis cette dernière à des échelons de puissances statoriques active et réactive, qui sont représentés dans les tableaux suivants.

Temps (s)	P_s^* (w)
0 à 1	0
1 à 2	-7500
2 à 4	-5000
4 à 5	-2500

Tableau III.1 : Echelons des puissances active.

Temps (s)	Q_s^* (Var)
0 à 1.5	0
1.5 à 3.5	-2500
3.5 à 5	2500

Tableau III.2 : Echelons des puissances réactive.

Pour montrer l'efficacité et la performance de la méthode proposée, la stratégie de la commande vectorielle directe des puissances statoriques active et réactive à base des régulateurs PI a été implémentée dans l'environnement Matlab/Simulink.

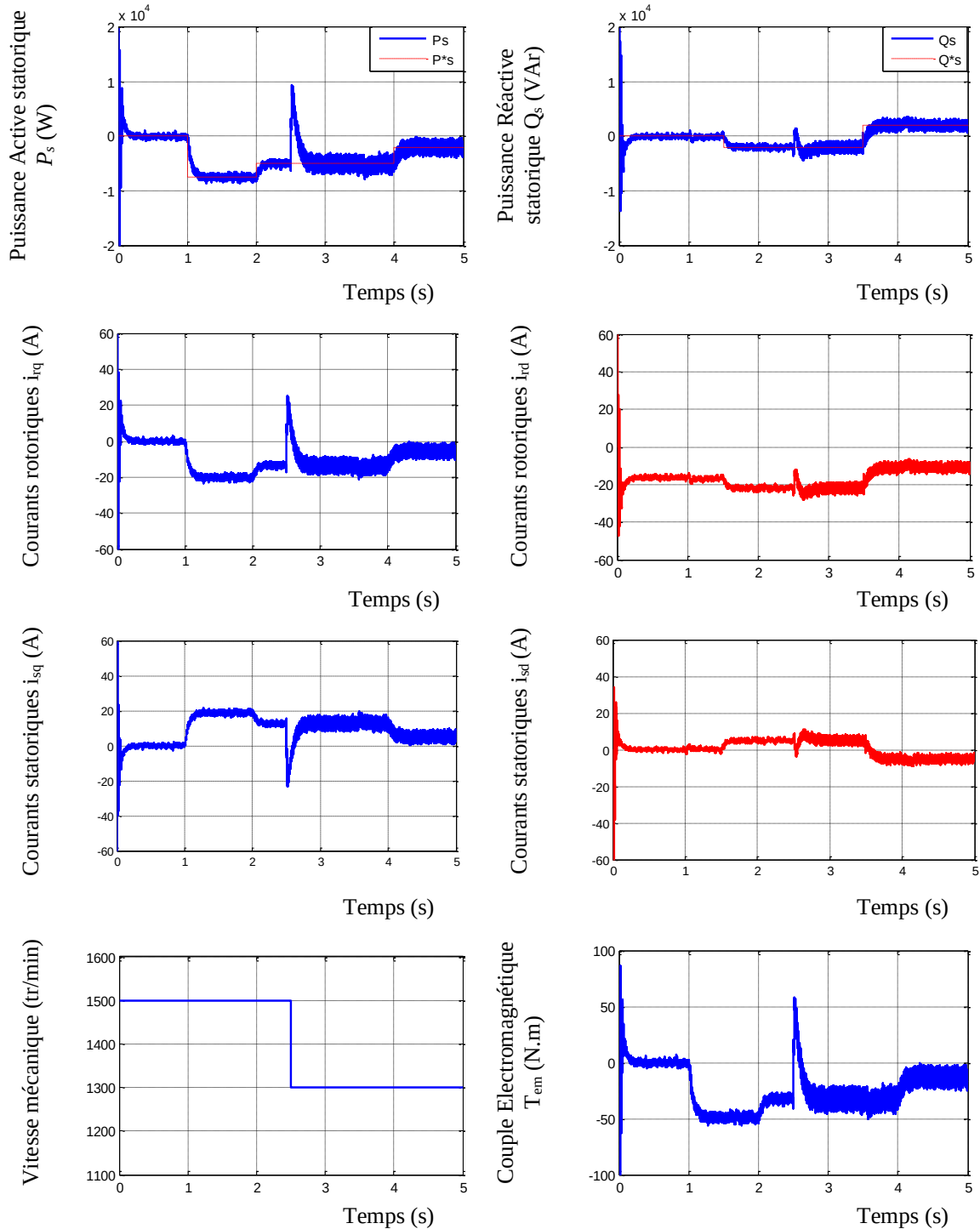


Figure III.12: Résultats de simulation de la commande directe par des contrôleurs PI.

Le système de conversion est schématisé par la figure (III.10). 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 aux figures (III.12).

Les résultats de simulation de la commande directe de la (GADA) montrent clairement l'obtention des performances satisfaisantes selon les profils des références, figure (III.12).

Ces résultats présentent les différentes courbes obtenues par la commande directe ; On peut noter bien que les puissances statoriques active et réactive s'identifient à leurs références rapidement mais avec un petit dépassement au niveau des changements des conditions de fonctionnement, de même, pour le couple électromagnétique.

La puissance active statorique est négative cela signifie que le réseau est un récepteur d'énergie fournie par la GADA tandis que la puissance réactive est nulle, ce qui nous permet d'avoir un facteur de puissance unitaire $\cos(\phi) = 1$, condition de déphasage nul.

Comme on peut constater le découplage parfait des deux puissances (la puissance active est commandée par la composante i_{rq} et la puissance réactive par la composante i_{rd} , figure (III.12).

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude et l'application de la commande vectorielle pour contrôler les puissances active et réactive statoriques de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système éolien. La synthèse des correcteurs Proportionnel-Intégral (PI) a été réalisée d'une manière très simple. Ce type de correcteur reste le plus communément utilisé pour une telle commande, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation électrique en minimisant les dépenses. En effet, nous avons pu constater que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement performant du système de génération en dépit des soucis liés aux variations paramétriques de la GADA.

Chapitre IV

Commande Non linéaire de la GADA

IV.1. Introduction

Les contrôleurs classiques de type PI conventionnel sont efficaces dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants, mais avec la variation des paramètres, le système devient non linéaire, et des incertitudes sont apparues sur les coefficients du régulateur qui lui font perdre les qualités de réglage exigées. La robustesse des régulateurs linéaires n'est valide qu'au voisinage du point de fonctionnement, autour duquel le système est linéaire. De ce fait, on doit faire appel à des algorithmes de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux cas non linéaire telles que les méthodes adaptatives ou de stabilité absolue, et également la commande par mode de glissement.

Cette dernière méthode se base sur la conception de contrôleurs à structure variable (CSV)[26]. La commande par mode de glissement ou à mode glissant est une technique principalement appropriée pour la régulation des systèmes non linéaires avec une dynamique et des perturbations indéterminées, aussi cette commande est peu gourmande en temps de calcul. De multiples études ont été effectuées sur la théorie de ces systèmes depuis une cinquantaine d'années dont les premiers travaux sont ceux d'Anosov et d'Emelyanov dans l'ancienne URSS[27].

A la fin des années soixante-dix, Utkin [26] introduit la théorie des modes glissants. En effet, la robustesse et la simplicité qui la caractérisent, sont les motifs essentiels qui nous amènent souvent à chercher de plus sur cette technique qui a connu une large gamme d'application dans les domaines très variés tels que la robotique, la mécanique et l'électrotechnique. Cependant, les performances de cette commande sont obtenues au prix de certains inconvénients :

Un phénomène de chattering ou broutement provoqué par la partie discontinue de cette commande.

Le système est soumis à chaque instant à une commande élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désirée.

L'algorithme Super-Twisting (STA) constitue l'une des contributions les plus significatives dans le domaine des modes glissants d'ordre supérieur. Développé par Levant dans les années 1990, cet algorithme résout le problème historique du *chattering* — ces oscillations à haute fréquence qui limitaient l'application pratique des contrôleurs par modes glissants classiques.

Ce chapitre présente une analyse rigoureuse du STA, depuis sa formulation mathématique jusqu'à son application sur la machine asynchrone à double alimentation (GADA).

IV.2. Notions d'un système à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Le terme «*Système à structure variable*» apparaît à cause de la commutation (variation discontinue) du système et de son contrôleur (ou observateur) entre deux ou plusieurs structures [26].

L'étude de tels systèmes présente un grand intérêt, notamment en physique, en mécanique et en électricité. Cela est principalement dû aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun des sous-systèmes pris seuls.

IV.2.1. Définition

Un système est dit à structure variable s'il admet une représentation par des équations différentielles du type:

$$\dot{X} = \begin{cases} F_1(x) & \text{Si la condition "1" est vérifiée} \\ \vdots & \\ \vdots & \\ F_i(x) & \text{Si la condition "i" est vérifiée} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Où X est le vecteur d'état et F_i les fonctions appartiennent à un ensemble de sous-systèmes et $i \in [1, n]$.

En conséquence, les systèmes à structures variables sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation.

IV.3. Positionnement par rapport aux modes glissants classiques

IV.3.1. Rappel du problème du chattering

On Considère un système dynamique du second ordre :

$$\ddot{x} = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (IV.2)$$

où u est la commande et f une fonction inconnue mais bornée. Le contrôleur par modes glissants classique utilise une surface de glissement :

$$S_c(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (IV.3)$$

Avec :

$e(x)$ L'écart sur la variable à régler ($e(x) = x^* - x$).

λ_x Coefficient positif qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r degré relatif, égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$$\text{Pour } r=1 \quad S_c(x) = e(x) \quad (IV.3.a)$$

$$\text{Pour } r=2 \quad S_c(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x) \quad (IV.3.b)$$

$$\text{Pour } r=3 \quad S_c(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) \quad (IV.2.c)$$

$S_c(x) = 0$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$

En d'autre terme, la difficulté revient à un problème de poursuite de trajectoire dont l'objectif est de garder $S(x)$ à zéro. Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence.

La loi de commande s'écrit :

$$U = U_{eq} - K \text{sign}(S) \quad (IV.4)$$

Le terme $-K \text{sign}(S)$ (s) est discontinu. En pratique, à cause des retards d'échantillonnage et des dynamiques non modélisées, cette discontinuité génère des oscillations résiduelles : le chattering. Ces oscillations peuvent :

- Endommager les actionneurs mécaniques ;

- Excite des dynamiques non modélisées (vibrations parasites) ;
- Augmenter la consommation énergétique.

IV.3.2. Principe des modes glissants d'ordre deux

L'idée clé des modes glissants d'ordre deux est de faire glisser non pas (s) elle-même, mais sa dérivée $(s)'$. En d'autres termes, on impose :

$$S_c(x) = 0 \text{ et } \dot{S}_c(x) = 0 \quad (\text{IV.5})$$

Le STA est le plus connu des algorithmes d'ordre deux. Sa particularité est de générer une commande continue alors que seule sa dérivée est discontinue.

IV.4. Formulation mathématique du Super-Twisting

IV.4.1. Structure de base

L'algorithme Super-Twisting standard consiste en deux termes :

$$U = -\lambda |s(t)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s(t)) + V(t) \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

$$V(t) = -\alpha \text{sign}(s(t)) \quad (\text{IV.7})$$

Où :

- $s(t)$ est la surface de glissement mesurée ;
- $\lambda > 0$ et $\alpha > 0$ sont les gains à régler ;
- $V(t)$ est un terme intégral.

IV.4.2. Interprétation

- Le **premier terme** $-\lambda |s(t)|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s(t))$: assure une convergence rapide vers zéro lorsque s est grand.
- Le **second terme** (V) : compense les perturbations et maintient le système sur la surface de glissement.

L'originalité réside dans le fait que la commande U est **continue** (grâce à la racine carrée).

C'est uniquement V qui est discontinu, ce qui élimine le chattering en pratique.

IV.5. Application de la commande STA au contrôle de la GADA

Afin de réduire le phénomène de chattering et de conserver les propriétés de robustesse et de convergence du système en temps fini, l'algorithme de Super Twisting, qui est le plus populaire parmi les algorithmes de mode glissant d'ordre supérieur, est appliqué. Vu que la commande se décompose en deux termes suivant l'équation (IV.5), on peut donc considérer cet algorithme comme une généralisation non linéaire d'un PI, [29], [30]. Dans cette commande, les surfaces de glissement sont choisies pour être compatibles avec les erreurs sur les puissances du stator.

IV.5.1. Contrôle des puissances statoriques active et réactive de la GADA

Nous allons nous contenter dans cette partie de l'application de la commande par mode glissant d'ordre deux au contrôle des puissances statoriques active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) en utilisant l'algorithme de super-twisting. Les surfaces glissantes sont choisies dans le but de contrôler indépendamment les puissances générées active et réactive.

Le système d'équations d'état de la GADA, donnant les puissances statoriques est donné par les formulations suivantes:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \left(i_{rd} - \frac{\phi_s}{M} \right) \end{cases} \quad (IV.8)$$

$$i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} (v_{rd} - R_r i_{rd} + \sigma L_r \omega_r i_{rq}) \quad (IV.9)$$

$$i_{rq} = \left(v_{rq} - R_r i_{rq} - \sigma L_r \omega_r i_{rd} - g \frac{M}{L_s} v_s \right) \frac{1}{\sigma L_r} \quad (IV.10)$$

IV.5.1.1. Commande de la puissance active statorique P_s

▪ Définition des surfaces de glissement

Pour la commande directe des puissances, on définit les surfaces de glissement à partir des erreurs de poursuite.

L'erreur de puissance active s'écrit, d'après (IV.3) :

$$S_p = P_s^* - P_s \quad (IV.11)$$

On définit la surface de glissement associée à la puissance active :

$$S_p = P_s^* + \frac{M}{L_s} V_s i_{rq} \quad (\text{IV.12})$$

La dynamique de cette surface est obtenue par dérivation :

$$\dot{S}_p = \dot{P}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s i_{rq} \quad (\text{IV.13})$$

En substituant (IV.9) dans (IV.12) :

$$\dot{S}_p = \dot{P}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s \left(\frac{1}{\sigma L_r} u_q + \varphi_q(t) \right) \quad (\text{IV.14})$$

$$\dot{S}_p = \varphi_p(t) + \frac{M V_s}{\sigma L_r L_s} u_q \quad (\text{IV.15})$$

Avec :

$$\varphi_p = \dot{P}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s \varphi_q(t) \quad (\text{IV.16})$$

IV.5.2. Puissance réactive

De manière similaire, l'erreur de puissance réactive est :

$$S_Q = Q_s^* - Q_s \quad (\text{IV.17})$$

La surface de glissement correspondante est :

$$S_Q = Q_s^* - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} + \frac{M}{L_s} V_s i_{rd} \quad (\text{IV.18})$$

Sa dérivée s'écrit :

$$\dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s i_{rd} \quad (\text{IV.19})$$

En utilisant (IV.8) :

$$\dot{S}_Q = \dot{Q}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s \left(\frac{1}{\sigma L_r} u_d + \varphi_d(t) \right) \quad (\text{IV.20})$$

$$\dot{S}_Q = \varphi_Q(t) + \frac{M V_s}{\sigma L_r L_s} u_d \quad (\text{IV.21})$$

Avec :

$$\varphi_Q = \dot{Q}_s^* + \frac{M}{L_s} V_s \varphi_d(t) \quad (\text{IV.22})$$

IV.6. Schéma bloc du contrôle des puissances statoriques de la GADA

La figure (IV.1) illustre le schéma de la commande par mode glissant d'ordre supérieur utilisant l'algorithme super-twisting (STA) appliquée au contrôle des puissances active et réactive de la GADA.

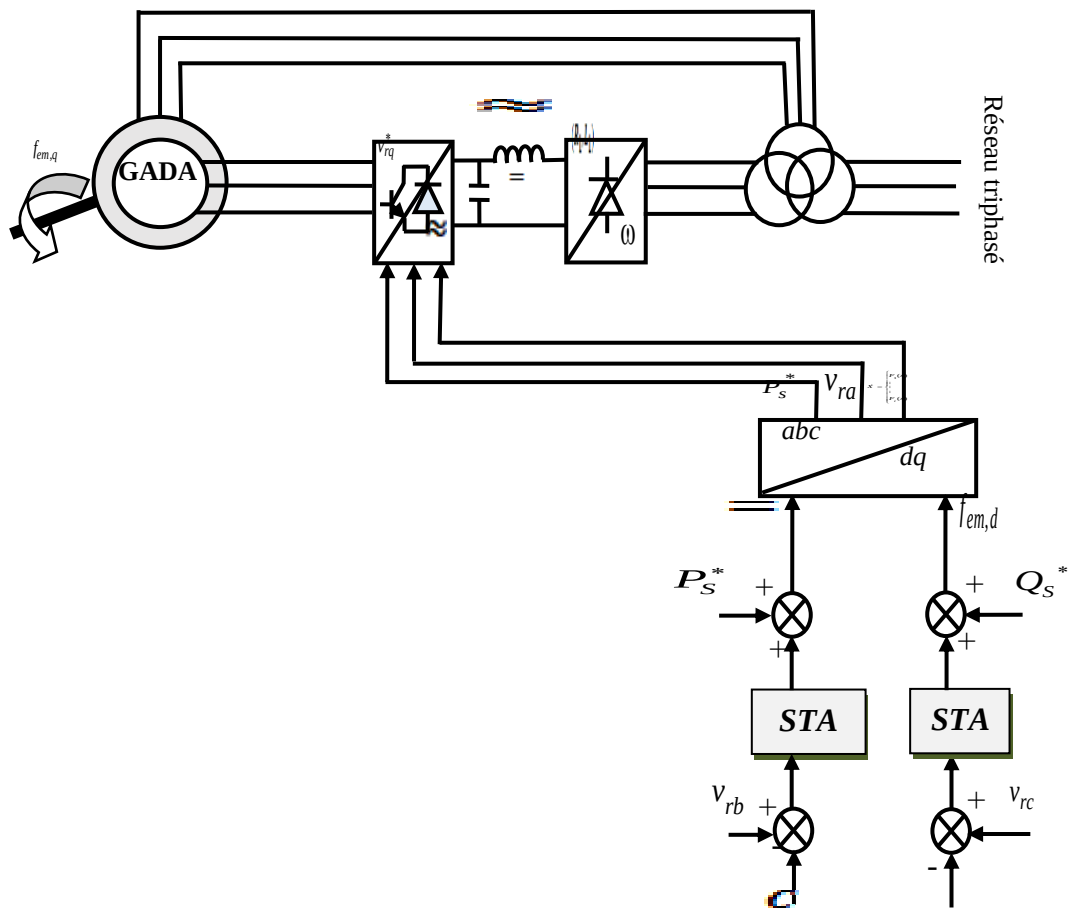
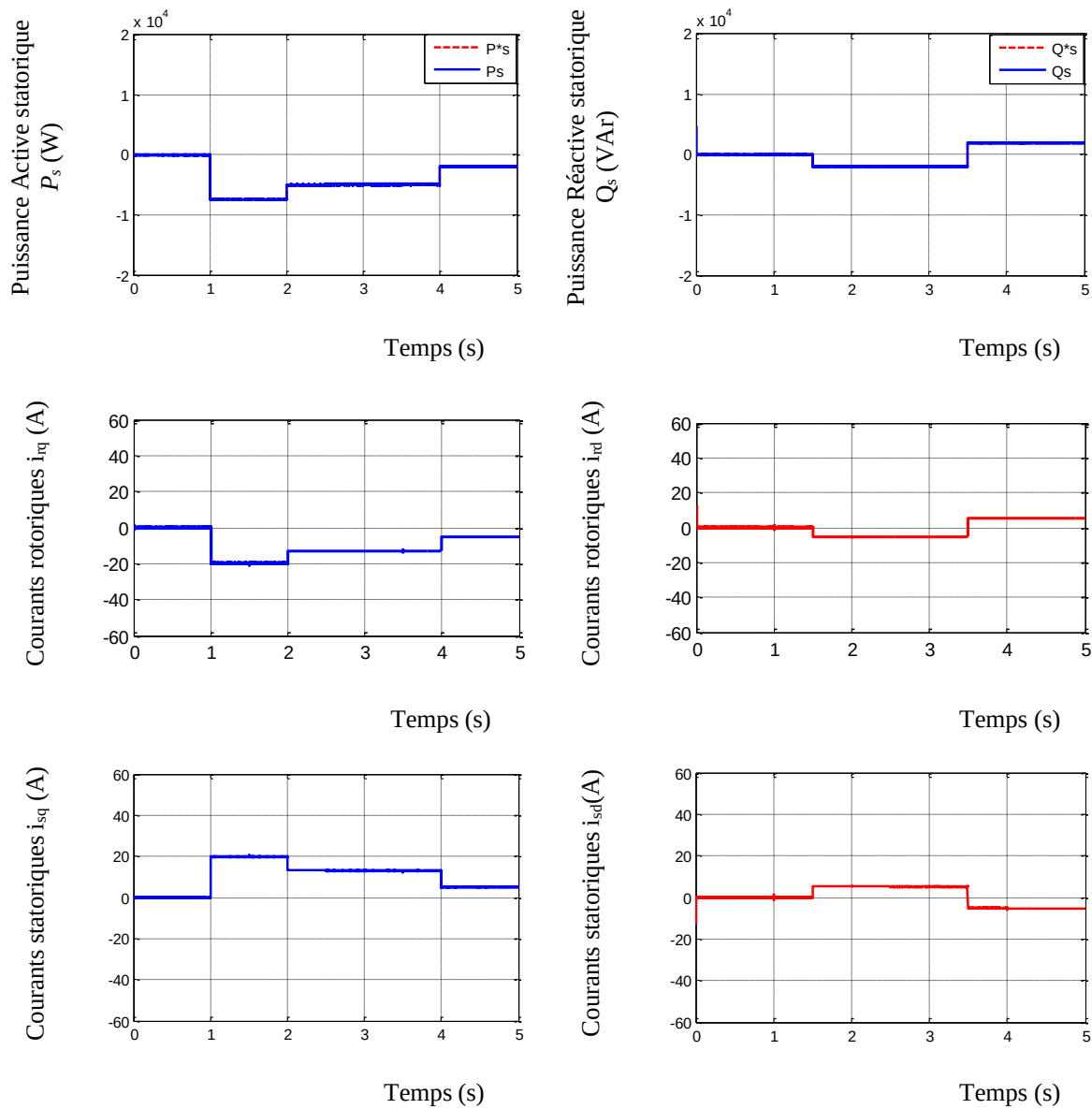


Figure IV.1: Schémas générale de la commande directe par STA.

IV.7. Résultats de simulation de la commande (HOSTSMC)

Afin d'évaluer les performances de la commande par mode glissant d'ordre supérieur utilisant l'algorithme super-twistingSTA appliquée au système de conversion de l'énergie éolienne à base de la GADAd 7,5 KW , un ensemble de simulation a été effectué avec le logiciel Matlab/Simulink. Le schéma synoptique de la simulation réalisée est présenté sur la figure (IV.1). Les différents résultats de simulation du comportement du système global sous MATLAB/Simulink sont donnés par les figures ci-dessous.



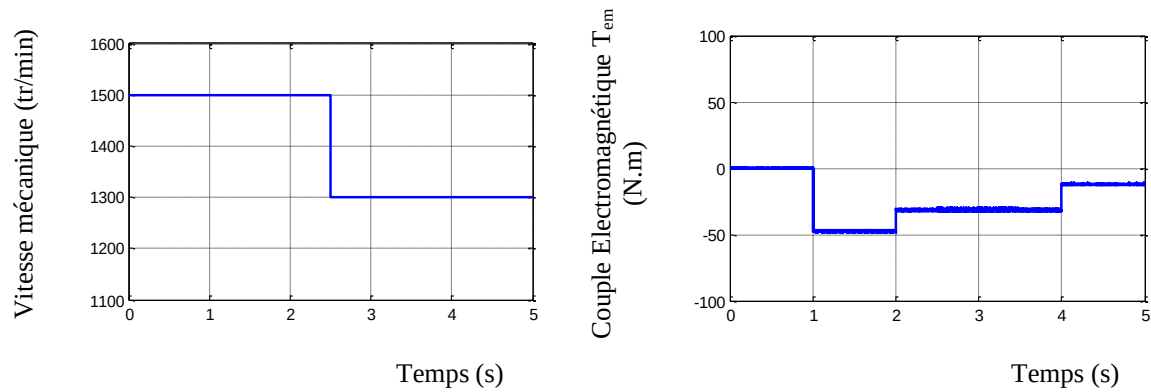


Figure IV.2: Résultats de simulation de la commande directe par des contrôleurs STA.

IV.7.1. Discussions

Nous remarquons que les résultats de la commande STA sont plus performants que ceux de la commande PI., Aussi, ces résultats montrent également que l'utilisation de cette commande permet de maintenir les puissances statoriques active et réactive aux valeurs recherchées, de même qu'un bon suivi de consigne avec une rapidité et une précision remarquables, tout en observant l'apparition du phénomène de chattering, figure (IV.2).

IV.8. Conclusion

L'application de l'algorithme Super-Twisting à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation constitue une solution élégante et performante pour la conversion d'énergie éolienne. Ce chapitre a démontré rigoureusement que :

- ❖ **La modélisation de la DFIG** en repère de Park orienté flux statorique permet d'obtenir un système découplé avec une dynamique affine en la commande.
- ❖ **L'application du STA** conduit à une commande continue, robuste, convergeant en temps fini, sans nécessiter la mesure des dérivées des surfaces.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire s'inscrit dans la problématique de l'amélioration des performances de régulation des puissances active et réactive statorique d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) intégrée dans un système éolien. Face aux limitations des commandes classiques, notamment la sensibilité aux variations paramétriques et aux perturbations externes, nous avons proposé une approche basée sur l'algorithme super-Twisting, une technique avancée de commande par modes glissants d'ordre supérieur.

Dans un premier temps, nous avons établi une modélisation complète de la chaîne de conversion éolienne, incluant la turbine, la génératrice et les convertisseurs de puissance, tout en mettant en évidence les couplages entre les puissances active et réactive ainsi que les principales sources d'incertitudes. Cette modélisation a servi de support à la conception de notre stratégie de commande.

Ensuite, nous avons développé l'algorithme super-Twisting, choisi pour sa capacité à éliminer le phénomène de *chattering* tout en conservant les avantages fondamentaux des modes glissants, à savoir la robustesse face aux perturbations et la convergence en temps fini. Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande super-Twisting assure un découplage efficace entre les puissances, une excellente poursuite des consignes, ainsi qu'une grande robustesse face aux variations des paramètres internes de la GADA et aux fluctuations de la vitesse du vent.

La comparaison avec une commande PI classique met clairement en évidence la supériorité de l'approche proposée, tant en régime permanent (précision maintenue, ondulations réduites) qu'en régime transitoire (temps de réponse plus court, dépassements quasi nuls). Ces résultats confirment que l'algorithme super-Twisting constitue une alternative pertinente et performante pour la régulation des puissances dans les systèmes éoliens à base de GADA.

En conclusion, l'approche par algorithme Super-Twisting s'avère être une solution performante et fiable pour l'optimisation des systèmes éoliens à base de GADA. Elle garantit une injection d'énergie de meilleure qualité sur le réseau électrique tout en prolongeant la durée de vie du matériel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : **T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi**, « Wind Energy Handbook », 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2011 .
- [2] : **BOUSSAID, S., & GRELLET, G.**, « Génératrices asynchrones à double alimentation pour l'énergie éolienne, Éditions Techniques de l'Ingénieur ».
- [3] : **BELTRAN B., AHMED H., BENBOUZID M. E. H.**, « High-Order Sliding Mode Control of Variable Speed Wind Turbines », Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, n°9, pp. 3314–3321, 2009.
- [4] : **Khelfat Lotfi**, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée ». Mémoire de master en électrotechnique, Université Badji Mokhtar –Annaba, juin 2017.
- [5] : **Boubakeur Asma**, « Etude et Modélisation d'une chaîne éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) ». Mémoire de master en électrotechnique, Université Salhi Ahmed_Naama , 2020.
- [6] : **Maataoui Lakhdar**, « Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée ». Mémoire de master en électrotechnique, Université Badji Mokhtar –Annaba, juin 2017.
- [7] : **Mr. Kadid Ilyes Lotfi**, « Modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éoliens ». Master en électrotechnique. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès , Juin 2018.
- [8] : **V. Courtesuisse** , « 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 et Métiers, 2008.
- [9] : **F. Poitier**, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTES, 2003.
- [10] : **N. Laverdure**, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [11] : **Mesai Ahmed Hamza** « Commande de la machine asynchrone à double alimentation- apport des techniques de l'intelligence artificielle ». Mémoire de Fin d'Etudes en Génie Electrique, Université Djilali Liabes, Sidi bel-abbès , 2017.
- [12] : **Latreche Mohammed Tahar**, « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien ». Mémoire Magister en Électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 24 /06 /2012

-
- [13] **Metatla Samir**, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA ». Mémoire de magister d'école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009
 - [14] **:Cherfia Naim**, « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens ». Mémoire Magister en Électrotechnique. Université Mentouri-Constantine, 2010.
 - [15] **:Guy Cuntz**, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edisud, Aix-en-Provence, 2001, www.edisud.com
 - [16] **-P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM
 - [17] **:Almeida R**, « *Improving power system dynamic behavior through doubly fed induction machines controlled by static converter using fuzzy control* », IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4):1942-1950.
 - [18] **:Mezouar A**, « *Décomposition et réduction de modèles des procédés électromécaniques : application à la commande des machines asynchrones* », Doctorat en Electrotechnique, université Djillali liabes Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2006.
 - [19] **:Brice B**, « *Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur* », docteur de l'université de Bretagne occidentale sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne, 2010.
 - [20] **: Segulier G**, F.Larbrique, R.Bausiere, « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance* », volume 4, 2^e édition revue et augmentée, Editions technique et documentation, Lavoisier, Paris 1995.
 - [21] **: Belgacem Kh**, « *Etude et mise en œuvre de lois de commande à structures variables par mode de glissement d'un moteur asynchrone à induction* », Thèse de Magister en Génie Electrique, ENSET, ORAN, 2009
 - [22] **:Dendouga A**, « *Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation* », thèse de doctorat, université de Batna, 2010.
 - [23] **: Elaimani S**, « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, 2004.
 - [24] **: 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.

- [25] : **Hasse K**, « *Zur dynamic drehzahlgeeregelter antriebe mit stromrichtegespeisten asynchron-kurzschlusslaufer-machinen* », Ph. D. Dissertation, TH Darmstadt, 1969.
- [26] :**UTKIN, Vadim I.**« *Sliding modes in control and optimization*. Springer Science & Business Media, 1992 »..
- [27] :**EMELYANOV, Stanislav V.** « *Automatic Control Systemswith Variable Structure*. Nauka, Moscou, Russie, 1967 ».

Annexe A

Grandeurs nominales et paramètres du système éolien [22].

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

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

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

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

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	$V = 15 \text{ m / s}$