



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ECHANID HAMMA LAKHDAR-EI OUED



FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de:

MASTER ACADEMIQUE

OPTION: Machine Electrique

THEME

*Commande d'un système éolien
utilisant une machine asynchrone
doublement alimentée MADA*

Présenté par:

- GHANEM MOUHAMMED
- GAID TAREK
- GURRAH AMARA

Encadré par :

Dr. TRIAA FATIMA

Année universitaire :2022 / 2023

REMERCIEMENTS



Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux pour nous avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Louanges et remerciements à **ALLAH** qui nous a permis aujourd'hui de nous rassembler pour soutenir ce modeste travail.

Nous remercions chaleureusement mon encadreur, **Dr. TRIJAFATIMA EZAHRA** pour sa patience, sa disponibilité et bienveillance, ses remarques et ses conseils, et surtout pour sa confiance.

Nous voudrions exprimer nos sincères reconnaissances à Mr **CHERIF BENOUR**, pour son aide et ses conseils.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Nous tenons à remercier monsieur: **Dr. Hichem SERHOUD** pour ses conseils.

Nous tenons à remercier profondément tous les enseignants et Administrateurs du département Génie Electrique et Sans oublier bien évidemment mes camarades de promos (2022-2023) qu'ils ont démontré à nos égards durant ces deux années.

Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

DÉDICACES



Dédicaces

À mon cher père Omar!

À la plus belle création de Dieu sur terre à la précieuse grand-mère Salima!

À ma chère mère Najat!

À ma chère grand-mère Hafsa!

À mon cher grand-père Taher!

À mon défunt grand-père Mahmoud!

À tous mes frères, tantes, oncles, tantes et enfants!

À tous mes amis et collègues pour leur compagnie et nos bons moments ensemble!

À tous les étudiants en 2022-2023!

À toute la famille de Ghanem et Dia!

MOUHAMMED

Dédicaces

À la mémoire e de mon défunt père.

*À la plus belle créature que Dieu a créer sur
terre,,,*

*À cet source de tendresse, de patience et de
générosité,,,*

À ma mère ouerida !

À ma grande mère

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

*À tous mes amis et collègues pour leur compagnie
et bons moments passées ensemble.*

À tous les étudiants de la promotion 2022/2023

*À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force
de continuer*

TAREK

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon encadreur «Treaafatimaezzahra » Pour la qualité de son encadrement:

*Mes parents, grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices; ils ont pu créer
le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

La famille.

Tous mes amis et collègues.

Tous mes enseignants de département d'électrotechnique.

AMARA

RÉSUMÉ

ملخص

ABSTRACT



Résumé

Ce projet vise à aborder et à surveiller le problème de l'une technique de commande vectorielle et à la façon de l'appliquer et de l'intégrer dans le système de conversion d'énergie aérobie, qui contient à son tour une machine asynchrone à double alimentation. Cette technologie s'est avérée efficace pour modifier la structure des systèmes et améliorer considérablement l'énergie produite. L'objectif de ce travail est d'appliquer cette stratégie pour contrôler l'échange entre la puissance active et réactive du résident en alimentant le rotor par un transformateur bidirectionnel. Les résultats obtenus à partir de la simulation numérique montrent l'intérêt accru au cours de la période récente de ce contrôle de divers systèmes énergétiques.

Mots clés: Machine asynchrone à double alimentation, Commande vectorielle, contrôle des puissances

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى معالجة ورصد مشكلة تقنية التحكم الشعاعي وكيفية تطبيقها ودمجها في نظام تحويل الطاقة الهوائية، والذي يحتوي بدوره على آلة تغذية مزدوجة غير متزامنة. أثبتت هذه التكنولوجيا فعاليتها في تغيير هيكل الأنظمة وتحسين الطاقة المنتجة بشكل كبير. الهدف من هذا العمل هو تطبيق هذه الاستراتيجية للتحكم في التبادل بين القدرة الفعالة والرجعية للساكن من خلال تزويد الدوار بمحول ثنائي الاتجاه. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من المحاكاة العددية الاهتمام المتزايد خلال الفترة الأخيرة بالتحكم في أنظمة الطاقة المختلفة.

الكلمات المفتاحية: آلة لا متزامنة ذات تغذية مزدوجة، التحكم الشعاعي، التحكم في القدرة.

Abstract

This project aims to address and monitor the problem of a vector control technique and how to apply it and integrate it into the aerobic energy conversion system, which in turn contains an asynchronous dual feed machine. This technology has proven effective in changing the structure of systems and significantly improving the energy produced. The objective of this work is to apply this strategy to control the exchange between the resident's active and reactive power by supplying the rotor with a bidirectional transformer. The results obtained from numerical simulation show the increased interest over the recent period in controlling various energy systems.

Keywords: doubly-fed induction Machine, oriented flux control, power control.

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes

Figure (I.1) :Schéma d'une éolienne horizontal.....	7
Figure (I.2) :Eléments constituant une éolienne.....	7
Figure (I.3) :Eolienne à rotor Savonius	8
Figure (I.4) :Eolienne à rotor Darrieus	9
Figure (I.5) :Eoliennes à axe horizontal.....	10
Figure (I.6) :Les différents types d'éoliennes.....	10
Figure (I.7) :Machine asynchrone à rotor bobiné et à rotor à cage.....	13
Figure (I.8) :Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.....	14
Figure (I.9) :Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable...	15
Figure (I.10) :Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.....	16
Figure (I.11) :Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par action sur le glissement.....	16

Chapitre II : Modélisation d'un système éolienne

Figure (II.1) :Structure de la chaîne éolienne globale basée sur une MADA.....	19
Figure (II.2) :Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	19
Figure (II.3) :Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.....	21
Figure (II.4) :Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.....	21
Figure (II.5) :Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.....	22
Figure (II.6) :Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	25

Figure (II.7) :caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage.....	26
Figure (II.8) :MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor.....	27
Figure (II.9) :MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs	28
Figure (II.10) :Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.....	28
Figure (II.11) :Représentation de la MADA dans system biphasé et triphasé.....	32
Figure (II.12) : Modèle de PARK pour la MADA.....	34
Figure (II.13) :Le schéma block de (GADA).....	37
Figure (II.14) :Allure du courant I_{ds} (A).....	38
Figure (II.15) :Allure du courant I_{qs} (A).....	38
Figure (II.16) :Allure du courant I_{dr} (A).....	38
Figure (II.17) :Allure du courant I_{qr} (A).....	38
Figure (II.18) :Le couple électromagnétique C_{em}	38
Figure (II.19) :Allure du flux ϕ_{dr} (Wb).....	38
Figure (II.20) :Allure du flux ϕ_{qr} (Wb).....	39
Figure (II.21) :Allure du flux ϕ_{ds} (Wb).....	39
Figure (II.22) : Allure du flux ϕ_{qs} (Wb).....	39
Figure (II.23) :Allure de Puissance active de stator (W).....	39
Figure (II.24) : Allure de Puissance réactive de stator (Var).....	39
Figure (II.25) : Allure de Puissance active de rotor (W).....	39
Figure (II.26) : Allure de Puissance réactive de rotor (Var).....	40
Figure (II.27) :Allure de courant statorique (A).....	40
Figure (II.28) : Allure de courant rotorique (A).....	40
Figure (II.29) : Allure du tension statorique (V)	40
Figure (II.30) : Allure du tension rotorique (V).....	40

Figure (II.31) :Onduleur de tension triphasé.....	41
Figure (II.32) : Le schéma block d'onduleur	43
Figure (II.33) :Allure de la tension V_{an}	43
Figure (II.34) :Allure de la tension V_{bn}	43
Figure (II.35) :Allure de la tension V_{cn}	44
Figure (II.36) :Allure de signal de proteuse et signaux de référence (V_{as} , V_{bs} , V_{cs}).....	44
Figure (II.37) :Le schéma block de l'onduleur triphasé à MLI.....	44
Figure (II.38) :Allure de La tension de sortie d'une phase de l'onduleur.....	45
Figure (II.39) :Le schéma block de redresseur a diode.....	45
Figure (II.40) : Les tensions de sortie de redresseur	45
Figure (II.41) :Schéma de la turbine éolienne.....	48
Figure (II.42) :Schéma bloc de Le coefficient de puissance.....	49
Figure (II.43) :Coefficient de puissance C_p en fonction de lamda pour $\beta: 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$.	49
Figure (II.44) :Schéma block du modèle de la turbine.....	52
Figure (II.45) :Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....	53
Figure (II.46) :Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....	53
Figure (II.47) :Schéma block du modèle de la turbine sur Matlab.....	54
Figure (II.48) :Allure de la vitesse mécanique $\Omega_{méc}$ (Rad/s).....	54
Figure (II.49) :Allure de la vitesse de la turbine Ω_t (Rad/s).....	55
Figure (II.50) : Allure de Couple électromagnétique C_{em} (N.m).....	55
Figure (II.51) : Le couple aérodynamique $C_{aéro}$ (N.m).....	55
Figure (II.52) :Allure de couple développé par la turbine C_t	55
Figure (II.53) : Allure de puissance captée par la turbine P_t (W).....	56

Figure (II.54) : Allure de coefficient de puissance maximale CPmax.....	56
Figure (II.55) : Allure de Landa optimale λ_{opt}	56
Figure (II.56) : Allure de la vitesse de turbine avec sa référence.....	56

Chapitre III: La commande vectorielle de la MADA

Figure (III.1) : Principe de la commande vectorielle.....	60
Figure (III.2) : Orientation du flux statorique sur l'axe d.....	61
Figure (III.3) : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	64
Figure (III.4) : Schéma block de la commande directe.....	65
Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande indirecte.....	65
Figure (III.6) : Système réguler par un PI.....	66
Figure (III.7) : Schéma block de la commande vectorielle.....	67
Figure (III.8) : Allure du courant Ids (A).....	68
Figure (III.9) : Allure du courant Iqs (A).....	68
Figure (III.10) : Allure du courant Idr (A).....	68
Figure (III.11) : Allure du courant Iqr (A).....	69
Figure (III.12) : Le couple C_{em} (N.m).....	69
Figure (III.13) : La vitesse (Rad/s).....	69
Figure (III.14) : Allure du flux ϕ_{dr} (Wb).....	69
Figure (III.15) : Allure du flux ϕ_{qr} (Wb).....	70
Figure (III.16) : Allure de Puissance active (W).....	70
Figure (III.17) : Allure de Puissance réactive (Var).....	70
Figure (III.18) : Allure de courant statorique (A).....	70
Figure (III.19) : Allure de courant rotorique (A).....	71
Figure (III.20) : Zoom de courant statorique i_s (A).....	71

Figure (III.21) : Zoom de courant rotorique i_r (A)..... 71

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

Tableau (I.1) : La puissance et l'échelle prélevée au vent.....	29
------------------------------------------------------------------------	-----------

Chapitre II : Étude et modélisation de la MADA

Tableau (II.2) : Classification et comparaison de différentes variantes de la MADA.....	34
------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

Liste des Abréviations

- Isd***: Courant statorique sur l'axe d (A)
Isq: Courant statorique sur l'axe q (A)
Ird: Courant rotorique sur l'axe d (A)
Irq: Courant rotorique sur l'axe q (A)
isa, isb, isc : Courants statoriques (A)
ira, irb, irc : Courants rotoriques (A)
Vsd: Tension statorique sur l'axe d (V)
Vsq: Tension statorique sur l'axe q (V)
Vrd: Tension rotorique sur l'axe d (V)
Vrq: Tension rotorique sur l'axe q (V)
Vsa, Vsb, Vsc :Tensions d'alimentation des phases statoriques (V)
Vra, Vrb, Vrc :Tensions d'alimentation des phases rotoriques (V)
Rs(Ω) : Résistance statorique par phase,
Rr(Ω) : Résistance rotorique par phase,
Ls(H) : Inductance cyclique statorique,
Lr(H) : Inductance cyclique rotorique,
Rs1(Ω), Rs2(Ω) : Résistance statorique étoile1 & étoile 2
Ls1 (H), Ls2 (H): Inductances statoriques
Rr1(Ω) : Résistance interne du rotor
Rr2 (Ω) : Résistance externe du rotor
Lr (H) : Inductance du rotor
Lr1(H) : Inductance rotorique de la cage interne
Lr2 (H) : Inductance rotorique de la cage externe
Ms (H) : Inductance mutuelle entre deux enroulements au stator,
Mrr(H) : Inductance mutuelle entre deux enroulements au rotor,
Msr(H) : Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor),
ls(H) : Inductance de fuite statorique par phase,
lr(H) : Inductance de fuite rotorique par phase,
 σ : Coefficient de dispersion ou (de Blondel) :
 $T_s = L_s/R_s$ (s) : Constante de temps électrique au stator,

$T_r = L_r/R_r$ (s) : Constante de temps électrique au rotor,
C : capacité du condensateur dans l'étape continue
C_p : coefficient de puissance
C_{p_max} : coefficient de puissance maximale
C_t : coefficient de couple développé par la turbine
S: diamètre de la turbine
v : vitesse du vent
 β : angle de calage des pales
 β_{opt} : angle de calage correspondant à C_{p_max}
 λ : vitesse spécifique de l'aéroturbine
 λ_{est} : λ estimée
 λ_{opt} : λ optimale, correspondant à C_{p_max}
 ω_m : vitesse de rotation électrique de la machine électrique
 ω_s : pulsation du réseau
 Ω_m_{nom} : vitesse de rotation nominale de la machine électrique
 Ω_t : vitesse de rotation de la turbine
G: rapport de multiplication
P_r : puissance active transmise par le rotor de la machine électrique
P_s : puissance active transmise par le stator de la machine électrique
P_t : puissance captée par la turbine
P_v : puissance contenue dans le vent sous forme d'énergie cinétique
Q_s : puissance réactive statorique
Q_r : puissance réactive transmise par le rotor
R : rayon de la turbine
I, i : Courant (A)
P : Nombre de paires de pôles,
J (kg .m²) : Moment d'inertie,
f (N.m.s/ rd) : Coefficient de frottement visqueux,
C_e (N .m.) : Couple électromagnétique,
C_r (N .m) : Couple de charge (résistant),
C_t (N .m.) : Couple de la turbine,
 θ_m (rd) : Position angulaire du rotor par rapport au stator,
 θ_s (rd) : Position angulaire du stator par rapport à l'axe (*d*) ,

θ_r (**rd**) : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d) ,

$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$ (**Wb**) : flux magnétiques au stator,

Φ_s (**Wb**) : Vecteur de flux magnétique au stator,

$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$ (**Wb**) : flux magnétique au rotor,

Φ_r (**Wb**) : Vecteur de flux magnétique au rotor,

Φ_m (**Wb**) : Flux de référence nominal

Indices :

s : Indice des axes correspondant au stator

r : Indice des axes correspondant au rotor

a, b, c : Indices correspondant aux trois phases a, b, c

s1, s2 : Indices correspondant au stator 1, stator 2.

r1, r2 : Indices correspondant au rotor 1, rotor 2.

TABLE
DES MATIÈRES



Table des Matières

Remerciements.....	II
Dédicaces.....	IV
Résumé / ملخص / Abstract.....	VIII
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux.....	XVI
Liste des abréviations.....	XVII
Introduction générale.....	2

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes

I.1. Introduction	5
I.2. Histoire et développement de l'énergie éolienne	5
I.3. Définition de l'énergie éolienne	6
I.4. Les différents composants d'une éolienne	7
I.5. Les différents types d'éoliennes	8
I.6. L'éolienne à axe vertical	8
I.6.1. Rotor Savoniu.....	8
I.6.2. Rotor Darrieus.....	9
I.7. Eoliennes à axe horizontal.....	9
I.8. La puissance disponible et la puissance prélevée au vent.....	10
I.9. Les Générateurs asynchrones.....	13
I.9.1. Généralités.....	13
I.9.2. Principe de fonctionnement.....	13
I.9.3. Générateur asynchrone à cage d'écureuil (auto excité)	14

I.9.4. Générateur asynchrone à double alimentation (MADA).....	15
I.10. Conclusion.....	16
Chapitre II: Modélisation d'un système éolienne	
II.1. Introduction	18
II.2. Présentation de la machine asynchrone double alimentation.....	19
II.3. Classification des machines à double alimentation.....	20
II.3.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné.....	21
II.3.2. Machine à double alimentation en cascade.....	21
II.3.3. Machine à double alimentation cascadée à un repère.....	22
II.3.4. Machine à double alimentation sans balais.....	22
II.3.5. Machine à double alimentation à reluctance variable.....	22
II.3.6. Machine à double alimentation TANDEM	22
II.3.7. Comparaison de différentes variantes de la machine à double alimentation.	23
II.4. Principe de fonctionnement MADA.....	23
II.4.1. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA.....	24
II.5. Les Différentes stratégies de commande de la MADA.....	26
II.5.1. Commande de la MADA par un seul onduleur.....	26
II.5.2. Commande de la MADA par un redresseur alimentant deux onduleurs en parallèle.....	28
.....	
II.6. Avantages et inconvénients de la MADA.....	29
II.6.1. Avantages de MADA.....	29
II.6.2. Inconvénients de la MADA.....	30
II.7. Domaines d'application de la MADA.....	30
II.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	31
.....	
II.8.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé	31

II.9. Les équation électrique de la MADA.....	32
II.9.1. Les équations magnétiques sous forme matricielle.....	32
II.9.2.L'équation mécanique.....	33
II.10. Représentation de la MADA dans le système biphasé	34
II.10.1. Transformation de PARK.....	34
II.10.2. Choix de référentiel	34
II.10.3. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d,q)	36
II.10.4. Simulation le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).....	37
II.10.4.1.Le schéma équivalent.....	37
II.10.4.2.Les résultats de simulation GADA.....	37
II.10.5.Modélisation de l'onduleur de tension triphasé.....	41
II.10.5.1. Définition.....	41
II.10.5.2.La modélisation.....	41
II.10.5.3.Le schéma équivalent.....	43
II.10.5.4.Les résultats de simulation Onduleur.....	43
II.10.6. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI.....	44
II.10.6.1. Le schéma équivalent.....	44
II.10.6.2.Les résultats de simulation.....	45
II.10.7.Modélisation du redresseur a diode.....	45
II.10.7.1.Les résultats de simulation du redresseur.....	45
II.11.Modélisation de la partie mécanique.....	46
II.11.1.Quelques définitions.....	46
II.11.2.Hypothèses simplificatrices.....	46
II.11.3.Modélisation du vent.....	47

II.11.4.Modélisation de la turbine.....	47
II.11.5.Modélisation du multiplicateur.....	50
II.11.6.Modélisation de l'arbre.....	51
II.11.7.Le suivi de point de puissance maximum (MPPT)	52
II.11.7.1. Définition.....	52
II.11.7.2. Les différents types de MPPT.....	52
II.11.7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	52
II.11.7.4. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	53
II.11.7.5.Les résultats de simulation	54
II.12.Conclusion.....	57
Chapitre III:La commande vectorielle de la MADA	
III.1.Définition.....	59
III.2. Principe de la commande vectorielle.....	59
III.3. Avantage et inconvénient.....	60
III.4. Orientation du flux statorique.....	61
III.4.1.Relation entre les courants statoriques et rotoriques.....	62
III.4.2.Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques.....	62
III.4.3.Relation entre tension rotorique et courant rotorique.....	63
III.5. Synthèse des régulateurs PI.....	66
III.6. Modélisation la commande vectorielle sur MATLAB.....	67
III.6.1.Les résultats de simulation de commande vectorielle.....	68
III.6.2.Interprétation des résultats.....	72
III.7.Conclusion.....	72
Conclusion générale	74

Références bibliographiques.....	76
-----------------------------------------	-----------

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale

*L*a production d'énergie électrique est un défi important pour les années à venir, avec l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques. Cette évolution, laisse présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, car une consommation excessive des ressources naturelles réduit les réserves de façon dangereuse pour les générations futures.

Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les énergies renouvelables qui sont issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur le secteur éolien, qui semble être l'un des secteurs les plus prometteurs avec un taux de croissance mondial très élevé. Si le secteur des "grandes éoliennes" (fermes à haute énergie, sites marins) est en expansion, l'idée de décentralisation de l'énergie en produisant de petites quantités de produits localisés proches des besoins) est devenue de plus en plus présente. Notre étude se concentre également sur l'utilisation de machines asynchrones dans le système éolien. La plupart des éoliennes installées aujourd'hui sont équipées d'une centrale électrique double asynchrone. Cela permet aux travaux à grande échelle d'ajuster la vitesse du vent et d'utiliser autant de puissance que possible pour tout son vent, de développer des éoliennes et d'améliorer l'efficacité de conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournies. [1]

L'objectif de ce travail, est de réaliser un modèle permettant d'étudier un système de conversion de l'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double puissance. Pour atteindre ces objectifs, la thèse comprend trois chapitres:

Le premier chapitre donne un aperçu de l'énergie éolienne, de la façon de la découvrir et des domaines de son utilisation. Nous avons également abordé ses composants et appris à

connaître ses types. Nous avons également examiné de manière simplifiée les types de générateurs.

Le deuxième chapitre fournit des définitions de plusieurs machines électriques et la modélisation des équations électriques de MADA. Il fournit également des simulations avec les résultats de MADA, en plus de la modélisation simple d'onduleur, MLI, Redresseur, et enfin donné un modèle de la partie mécanique de la chaîne de conversion utilisée (vent et turbine éolienne).

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par la turbine éolienne.

I. Généralités sur les systèmes éoliens



Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes

I.1.Introduction

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie éolienne pour déplacer les bateaux, mouliner le grain ou pomper l'eau. Cette source d'énergie est maintenant utilisée pour produire de l'électricité. L'énergie éolienne est en plein développement industriel depuis plusieurs années. Elle présente de nombreux avantages : Premièrement, c'est une énergie renouvelable respectueuse de l'environnement qui contribue à améliorer la qualité de l'air et à lutter contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise ses propres ressources et contribue ainsi à l'indépendance énergétique et à la sécurité d'approvisionnement.

Enfin, le démantèlement des systèmes et l'élimination des déchets produits peuvent être réalisés sans difficultés majeures et les sites peuvent être réutilisés à d'autres fins. Cependant, des difficultés subsistent : la gestion technique de la production du réseau électrique, certains impacts environnementaux (avifaune, paysage, bruit) et l'aménagement du territoire [2].

Dans ce chapitre, nous examinons les éoliennes et leur évolution dans le temps, les concepts physiques qui régissent leur fonctionnement, puis donnons un aperçu des différentes configurations possibles des éoliennes et des convertisseurs associés.

I.2.Histoire et développement de l'énergie éolienne

Depuis l'Antiquité, les éoliennes ont converti l'énergie éolienne en énergie mécanique. Aujourd'hui encore, on trouve des éoliennes associées à des pompes à eau, principalement pour le drainage des zones humides ou, au contraire, pour l'irrigation des zones sèches ou pour abreuver le bétail. Historiquement, en 1888, Charles F. Brush a construit une grande éolienne pour alimenter sa maison, avec batteries pour le stockage. Le vent, source traditionnelle d'énergie verte, a été utilisé pendant plusieurs siècles pour propulser les navires (il y a environ 3000 ans), pour alimenter les moulins (environ 200 000 éoliennes en Europe au milieu du XIXe siècle). Âge). La première éolienne « industrielle » pour la production d'électricité a été mise au point en 1890 par le Danois Poul Lacour pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Au cours des années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 unités en 1908.

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Le vent est principalement causé par le mouvement des masses d'air chaud et froid. Le soleil réchauffe les masses d'air proches du sol, elles s'éclaircissent et s'élèvent.

Des masses d'air froid se précipitent pour combler ce vide afin de rétablir l'équilibre créé par les vents locaux. Le même principe s'applique à plus grande échelle entre les masses d'air polaires (froides) et équatoriales (chaudes) des calottes glaciaires.

Ce phénomène est également lié à la rotation de la terre et se forme donc avec les vents dominants.

Le vent est de l'air en mouvement et, comme tout corps en mouvement, on peut lui attribuer une énergie cinétique en fonction de sa masse (m) et de sa vitesse (v). La masse d'air est exprimée comme le volume occupé (V) en mètres cubes multiplié par la densité (ρ) en kilogrammes par mètre cube.

Pour le vent qui entraîne une éolienne, le volume occupé dépend de la surface balayée par le rotor. La puissance éolienne d'une éolienne est la quantité d'énergie cinétique qui traverse le rotor par seconde.

Cependant, les éoliennes modernes n'ont commencé à convertir de grandes quantités d'énergie contenue dans le vent en électricité qu'au cours des 40 dernières années.

Les éoliennes modernes sont de plus en plus compétitives avec les sources traditionnelles de production d'électricité, non plus des technologies expérimentales, mais des dispositifs disponibles sur le marché. Vous pouvez en installer un seul ou en combiner plusieurs pour former un parc éolien. L'une des certitudes de la conversion de l'énergie éolienne en électricité est que l'air n'est pas un liquide épais [3].

L'énergie éolienne est une source d'énergie dépendante du vent. Le soleil chauffe la terre de manière inégale, créant des zones de températures et de pressions atmosphériques différentes dans le monde. Les mouvements de l'air, appelés vent, résultent de ces différences de pression. Cette énergie permet de produire de l'électricité dans des éoliennes, également appelées aérogénérateurs, en utilisant la puissance du vent.

I.4. Les différents composants d'une éolienne

Généralement, l'éolienne est constituée d'une hélice, une nacelle et d'une tour.

- L'hélice est constituée de pales qui convertissent l'énergie présente dans le vent en mouvement rotatif.
- Le vaisseau spatial est la partie où l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un générateur. Dans la nacelle se trouvent également des systèmes de contrôle et de freinage pour les vents forts.
- Mât et fondations pour nacelle et rotor Doit supporter les différentes charges pouvant survenir. Le mât est plus ou moins haut (dépend de la voiture et de la vitesse du vent à récupérer). Il peut généralement atteindre 10 à 100 m de hauteur.

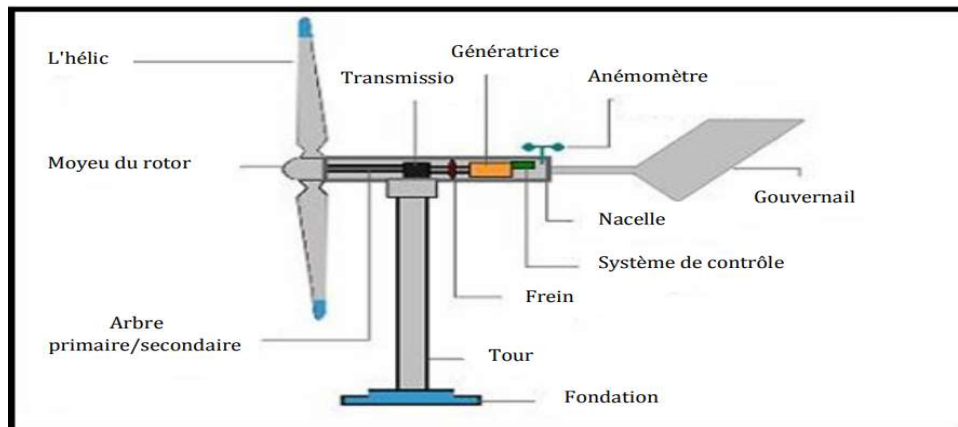


Figure (I.1) : Schéma d'une éolienne horizontale.

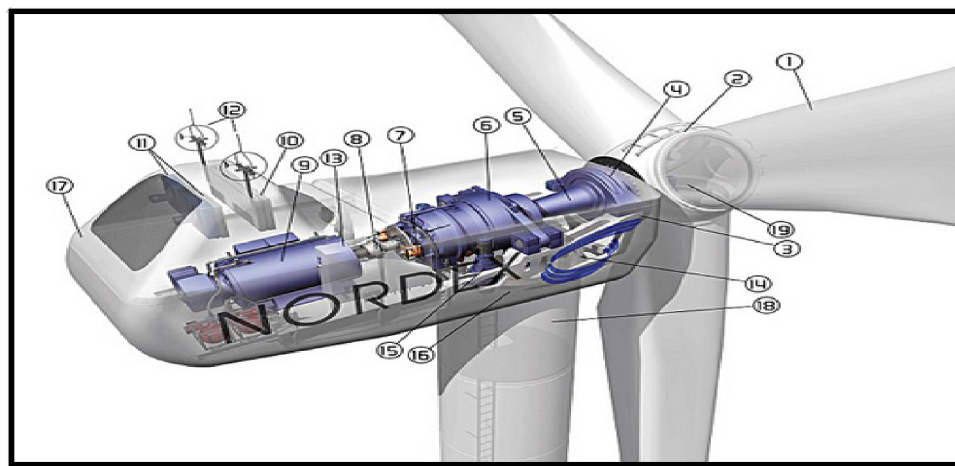


Figure (I.2) : Éléments constituant une éolienne.

1. Les pales, 2. Le moyeu, 3. La turbine, 4. Le rotor, 5. L'arbre de rotor, 6. Le multiplicateur, 7. Le rein de disque, 8. L'accouplement flexible du générateur, 9. Le générateur asynchrone à refroidissement, 10. Le radiateur de refroidissement, 11. Le ventilateur, 12. Le système de mesure du vent, 13. Le système de commande, 14. Le circuit hydraulique, 15. Le système d'orientation, 16. Châssis, 17. Gouvernail, 18. Tour, 19. Nez conique.

I.5. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent se classer en deux catégories selon l'axe de rotation du rotor (voir figure I.6)

I.6. L'éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont très rares et peu connues car moins performantes. Leur conception présente l'avantage que la boîte de vitesses, le générateur et les commandes sont posés directement sur le sol, sont simples, durables et nécessitent peu d'entretien. Deux types de rotors sont disponibles :

I.6.1. Rotor Savonius

Composé de deux demi-cylindres décalés. Le flux d'air s'approchant de la pale qui lui fait face est dévié par le profil semi-cylindrique et dirigé vers l'autre pale. Grâce à cette technique, l'éolienne Savonius démarre avec une vitesse de vent plus faible que les autres.

Le prototype Savonius ne génère jamais d'électricité car la vitesse du rotor est trop faible. Les éoliennes Savonius ont l'avantage de fonctionner dans toutes les directions du vent, ce qui est très adapté aux vents forts.



Figure (I.3) : Eolienne à rotor Savonius.

I.6.2. Rotor Darrieus

Il est surtout connu pour son éolienne à axe vertical qui ressemble à un fouet géant. Cette disposition empêche la voiture de se pencher dans la direction du vent. Elle présente deux avantages : un fonctionnement extrêmement silencieux et 50 % de puissance en plus qu'une éolienne à axe horizontal de même taille. Ce type d'éolienne peut fonctionner comme un générateur et peut être mis à la terre, et il est également difficile à démarrer en comparaison. Éolienne de type Savonius et a un faible rendement.



Figure (I.4) : Eolienne à rotor Darrieus.

I.7. Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éoliennes présente généralement un nombre de pâles compris entre 1 et 3 et peut développer des puissances élevées. Sa structure capte le vent en hauteur mieux qu'au voisinage du sol ce qui permet d'obtenir une plus grande vitesse de rotation. Le générateur et le système de commande sont logés dans la nacelle au sommet du mât. Ce type d'éolienne nécessite un système d'orientation des pâles.

Deux configurations sont possibles : les éoliennes « amont » et les éoliennes « aval » selon que les pâles sont situées ou non du côté du mât exposé au vent [4] (figure 1.5).

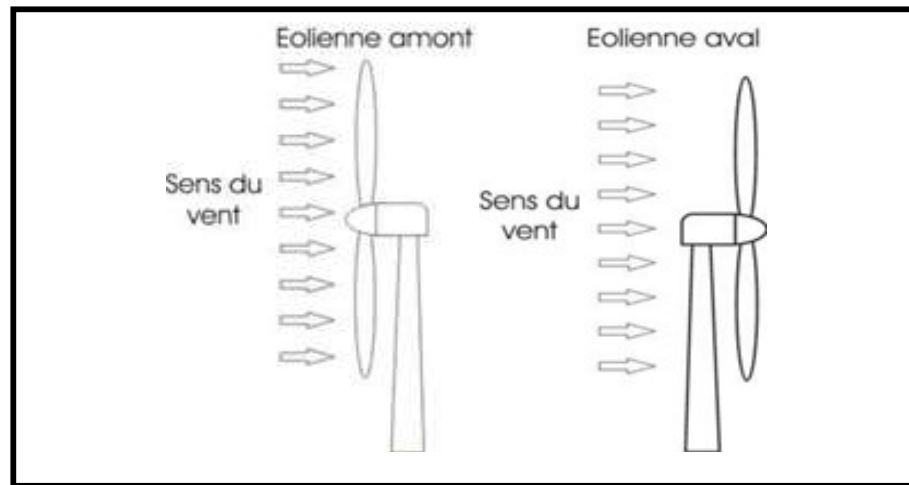


Figure (I.5) :Eoliennes à axe horizontal.

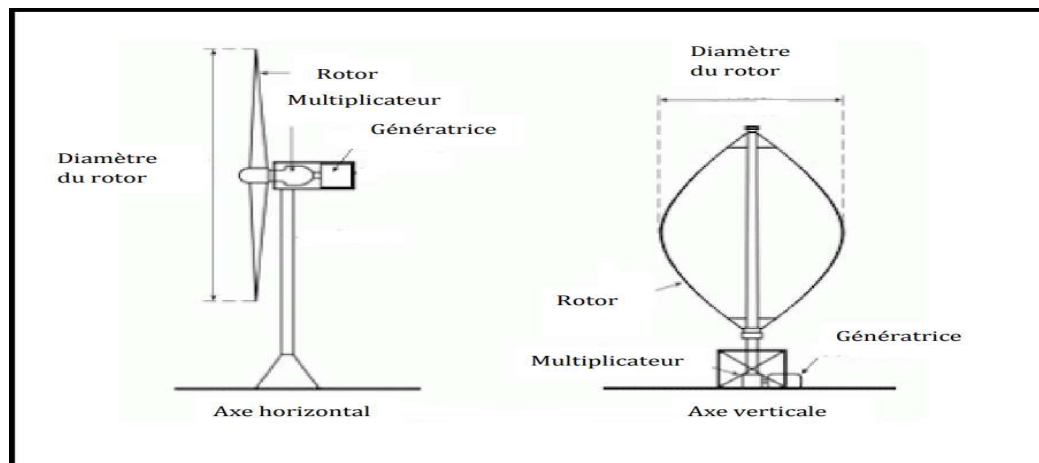


Figure (I.6) :Les différents types d'éoliennes.

I.8.La puissance disponible et la puissance prélevée au vent

Puissance disponible et énergie éolienne Les éoliennes à grande vitesse ont un nombre de pales assez réduit, généralement entre 2 et 4 pales. Ils sont le plus souvent utilisés pour produire de l'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins de poids qu'une éolienne lente de même puissance nominale) et de leur rendement élevé. Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines en fonction de la puissance délivrée et du diamètre de leur hélice. A titre de comparaison : la puissance de l'unité de la centrale nucléaire est d'environ 1400 MW.

Tableau (I.1) : La puissance et l'échelle prélevée au vent.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40KW
Moyenne	12 à 45m	40 à 100 KW
Grande	46 m et plus	Plus de 1 MW

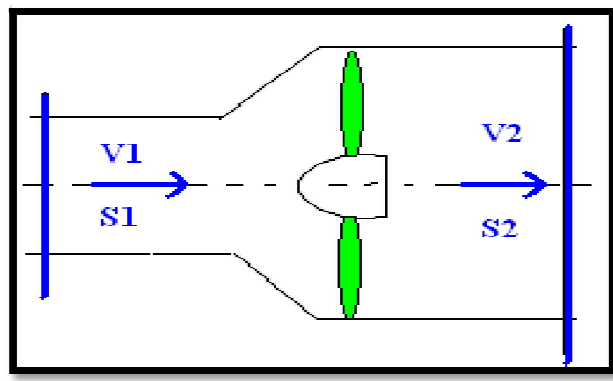
La loi de la variation de la vitesse du vent V en fonction de la hauteur h est donnée par l'expression suivante:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (I.1)$$

v_0 : Vitesse en m/s à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol.

α : Coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4.

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 .



L'énergie ne peut être obtenue qu'au détriment de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Cela permet au liquide veineux de s'écouler à travers les omoplastes au fur et à mesure qu'il se dilate.

Soit V la vitesse de l'air à l'intersection de l'éolienne et soit S la surface balayée par les pales du rotor. L'égalité qui explique l'incompressibilité de l'air et la constance du débit s'écrit:

$$S_1 \times V_1 = S \times V = S_2 \times V_2 \quad (I.2)$$

Par ailleurs d'après le théorème d'Euler, la force exercée par les pales sur l'air en mouvement est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à :

$$F = \rho \times Q(V_1 - V_2) = \rho \times S \times V(V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

Et la puissance développée par la force F (c'est-à-dire par l'aéromoteur) dont le point d'application se déplace à la vitesse V par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P = F \times V = \rho \times S \times V^2(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

Ainsi la puissance maximale susceptible d'être recueillie s'exprime par

$$P_{max} = \frac{16}{27} \times \rho \times S \times V^3 \quad (I.5)$$

C'est la formule de Betz.

Avec:

ρ : densité de l'air, environ $1,3 \text{ KG/m}^3$.

S : surface balayée par l'hélice en m^2 .

V : vitesse du vent en m/s.

P : puissance en Watts.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P = 0,2 \times D^2 \times V^3 \quad (I.6)$$

D : diamètre de l'hélice en mètres

I.9. Les Générateurs asynchrones

I.9.1. Généralités

Le moteur à induction couplé à un variateur de vitesse est de loin le type de moteur le plus couramment utilisé dans les applications nécessitant un contrôle de la vitesse et du déplacement de la charge. Quant au moteur à induction lui-même, sa popularité est due au faible entretien, à la simplicité de la conception, à la standardisation et à la robustesse. Il existe deux types de machines à induction : la machine à induction à cage d'écureuil et la machine à induction à rotor bobiné.

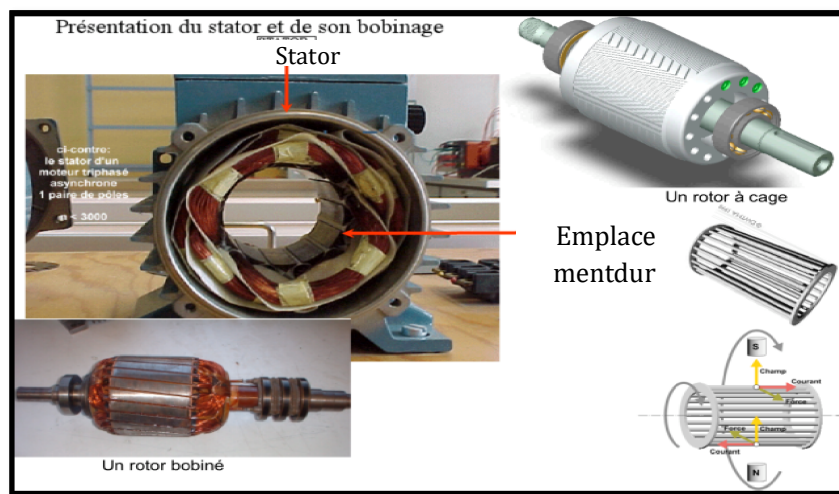


Figure (I.7) : Machine asynchrone à rotor bobiné et à rotor à cage.

I.9.2 Principe de fonctionnement

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances (<500kW), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les ballasts sous forme de grandeurs alternatives de fréquence

gf. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs. Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

I.9.3 Générateur asynchrone à cage d'écoreuil (auto excité)

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [5].

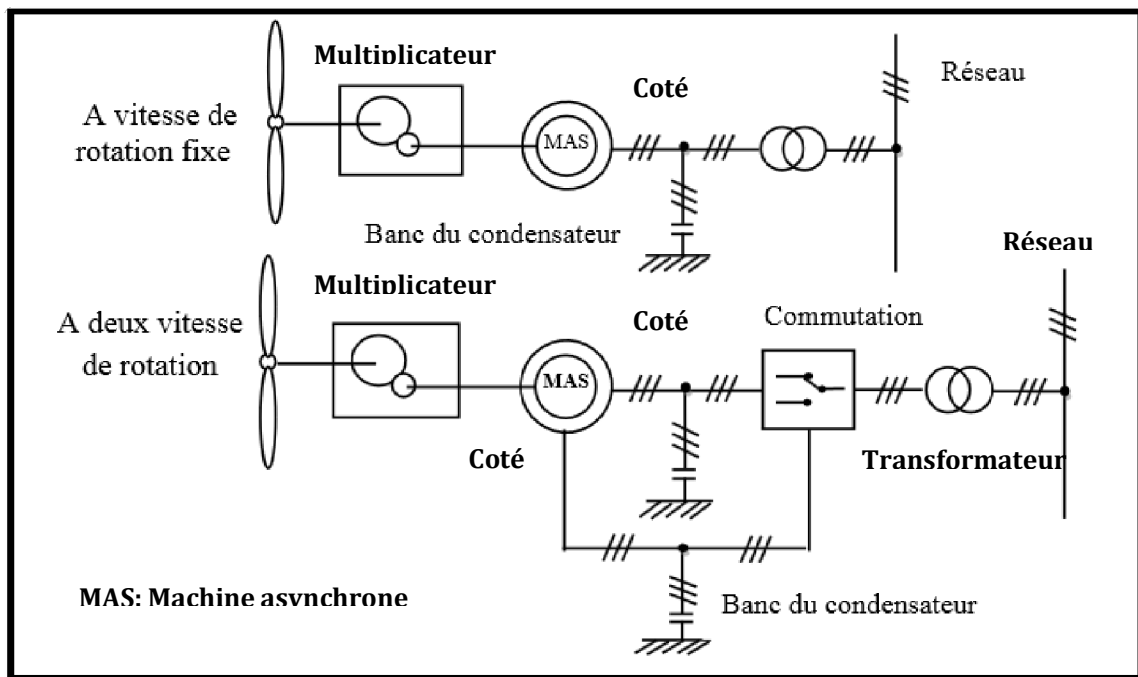


Figure (I.8) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage.

Une autre structure consiste à utiliser un convertisseur de fréquence, mais cette solution est généralement coûteuse (convertisseur de fréquence capable de transférer la puissance et le multiplicateur de vitesse) et est donc très rarement utilisée, comme le montre la Figure I.9.

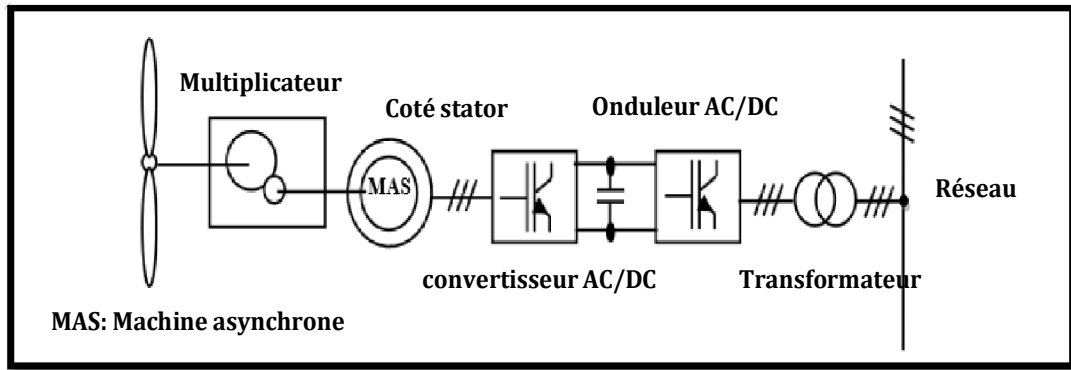


Figure (I.9) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.9.4 Générateur asynchrone à double alimentation (MADA)

Avec les générateurs asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes dans l'éolien à vitesse variable. Le stator du générateur est connecté directement au réseau, le plus souvent avec un transformateur. Au lieu d'un rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones disposent d'un rotor bobiné dont la commande électronique assure un changement de glissement. La chaîne du rotor permet alors de faire fonctionner l'unité à des vitesses variables dans une plage de vitesse dépendant du type et de la taille de la chaîne du rotor.

La figure I.10 montre la technologie (Optislip de Vestas) qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance du rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs [5].

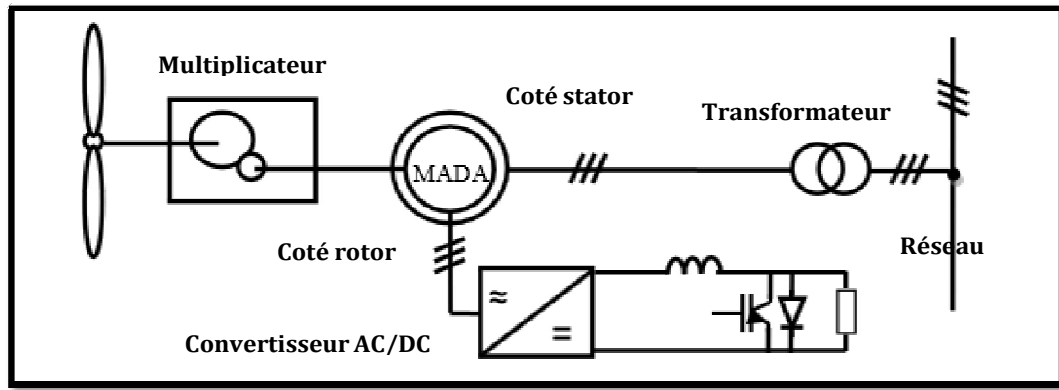


Figure (I. 20) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.

Une autre solution utilise l'interface de l'électronique de puissance, qui se compose de deux convertisseurs (onduleurs réversibles basés sur des éléments semi-conducteurs IGBT ou IGCT contrôlés par modulation de largeur d'impulsion PWM). La structure de cette technologie et les mesures de contrôle associées sont présentées dans la figure ci-dessous [5].

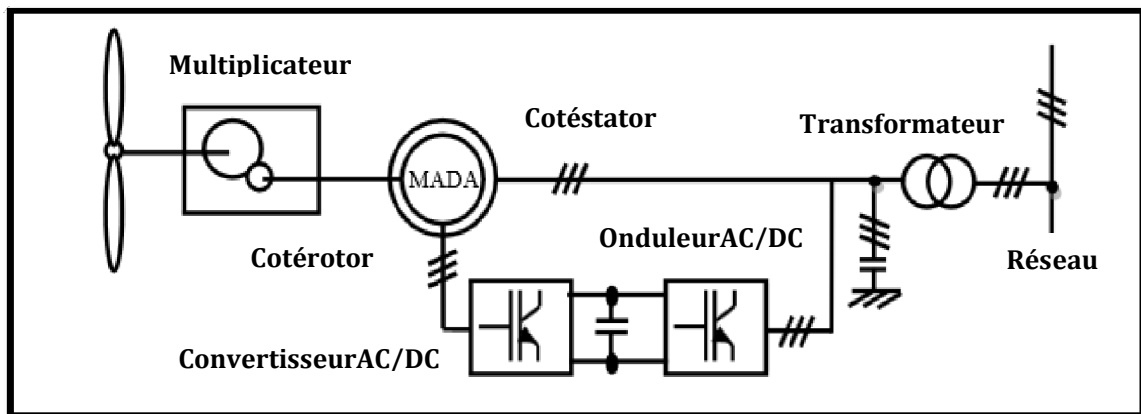


Figure (I. 31) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par action sur le glissement.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des différentes éoliennes utilisées dans l'industrie d'aujourd'hui pour produire de l'électricité. Afin de mieux comprendre le fonctionnement des éoliennes, depuis la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'éolienne (loi de Betz), nous avons clairement décrit les différents composants de l'éolienne et les modes de régulation la vitesse de rotation qu'utilisaient les génératrices et leurs diagrammes.

II. Modélisation d'un système éolienne



Chapitre II : Modélisation d'un système éolienne

II.1. Introduction

Les machines asynchrones sont principalement utilisées dans l'industrie en raison de leur fiabilité et de leur simplicité de construction. Ils occupent le domaine de la conversion d'énergie électromécanique pendant plus de 80 ans. Leur dynamique non linéaire est un problème assez compliqué car très difficile à contrôler. Actuellement, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation. Ces derniers, grâce au développement des dispositifs d'électronique de puissance et à l'avènement des techniques modernes de contrôle, représentent une solution idéale pour les variateurs de vitesse de forte puissance, l'avantage de ces machines étant de travailler à très basse vitesse [6]. L'utilisation possible du MADA est étudiée depuis une dizaine d'années [7]. La combinaison de machines asynchrones à double alimentation avec des convertisseurs de puissance permet différentes stratégies de contrôle et constitue un avantage supplémentaire lors de l'utilisation de ces machines [8]. L'alimentation à fréquence variable du circuit rotorique permet d'alimenter le stator avec une fréquence constante même lorsque la vitesse change. [9]

Maintenant que nous avons la modélisation électrique et mécanique, nous devons sélectionner et modéliser le générateur. Machine asynchrone double face (MADA) à rotor bobiné, ce type de machine est utilisé comme générateur dans la plupart des projets éoliens car il présente de grands avantages de travailler intégré au système éolien, la génératrice asynchrone double face lui permet de fonctionner sur une large gamme de vitesses de vent et à la pour obtenir la puissance maximale possible pour chaque vitesse de vent.

L'objet de ce chapitre est de réaliser une étude théorique d'une machine asynchrone à double alimentation, son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, leurs avantages et inconvénients, et d'évaluer les performances fournies par cette machine. Nous démontrerons également sa modélisation dans un châssis de parc avec deux alimentations à fréquence variable, l'une alimentant le stator et l'autre alimentant le rotor.

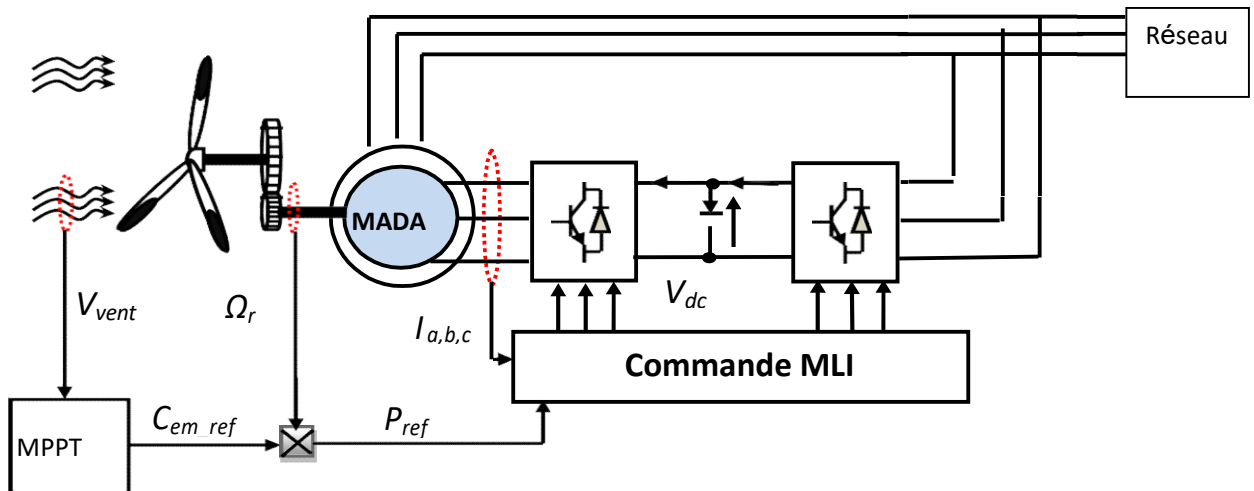


Figure (II.1) : Structure de la chaîne éolienne globale basée sur une MADA.

II.2. Présentation de la machine asynchrone double alimentation

La première apparition de cette machine remonte à 1899 ; ce n'est pas une nouvelle structure mais une nouvelle façon de se nourrir. MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné entraînée par deux armatures ; il possède un stator similaire aux machines triphasées classiques (asynchrones ou synchrones). Son rotor n'est plus une cage d'écurieil à jeter dans le bout de papier, mais se compose de trois enroulements en étoile, dont les extrémités sont reliées à des anneaux conducteurs, contre lesquels les balais frottent lorsque la machine tourne. La figure ci-dessous montre la structure d'une machine asynchrone à double alimentation. [10]

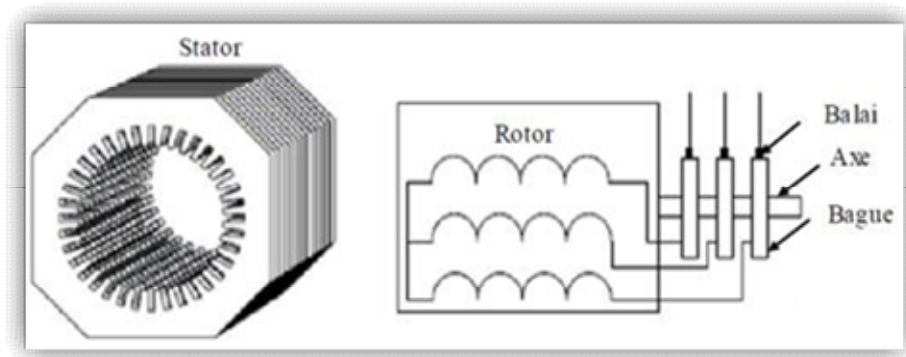
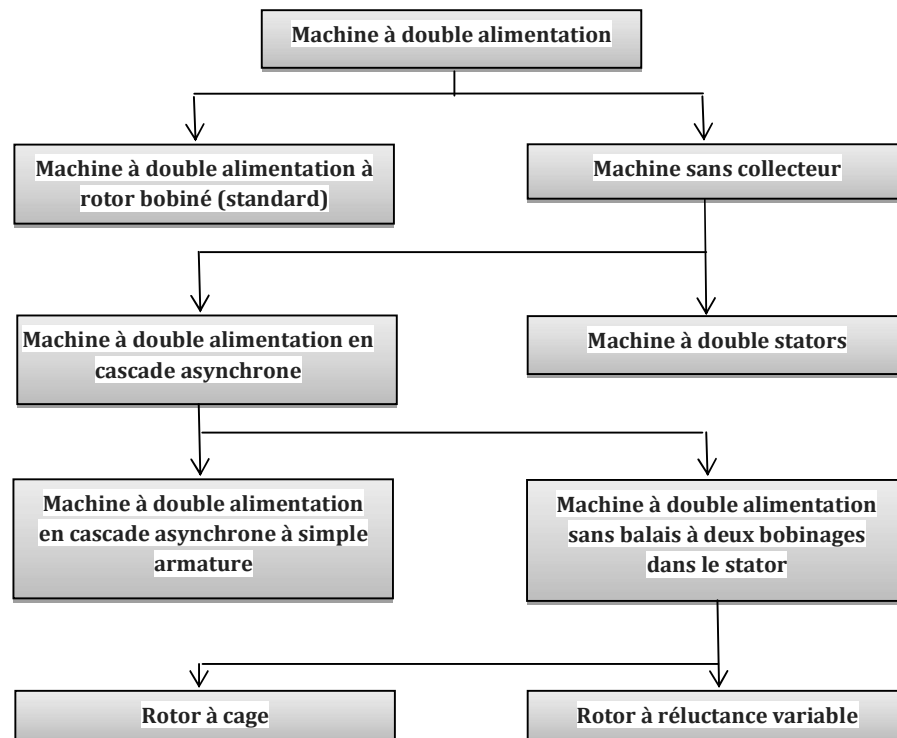


Figure (II.2) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans cette machine, les enroulements du stator sont alimentés par le secteur et les enroulements du rotor par un convertisseur de fréquence, ou généralement deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes. [11] Ce type de machine nécessite une source à piston unique capable d'alimenter les deux côtés de la machine, ce qui est un avantage majeur notamment dans les domaines des variateurs de vitesse et des générateurs où le glissement est modifié en combinant les convertisseurs de puissance sur le bidon être stator, rotor ou les deux à la fois. Elle dépend essentiellement du facteur technique et économique de la construction. [12]

II.3. Classification des machines à double alimentation

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation. [12]



Classification des machines à double alimentation

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus narratives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous. [13]

II.3.1 Machine à double alimentation à rotor bobiné :

C'est une machine asynchrone occupée par un système à balais annulaires, dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé, le rotor est relié à son propre onduleur (machine asynchrone simple à double alimentation), la figure en montre une représentation synoptique Catégorie MADA. [13]

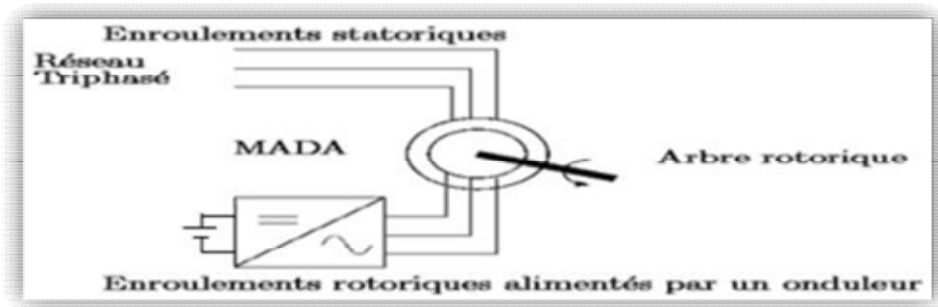


Figure (II.3) : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

II.3.2 Machine à double alimentation en cascade

Si une machine à double alimentation est constituée de deux machines asynchrones à double alimentation dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement (machine à induction à cascade à double alimentation), la figure montre un schéma de fonctionnement de deux machines asynchrones à rotor bobiné, autour d'un système biocarburant pour obtenir. Les enroulements du stator sont connectés à deux sources de tension triphasées. [13]

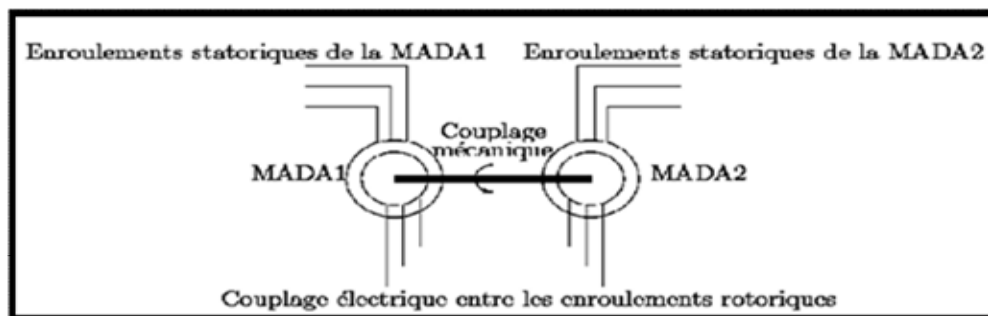


Figure (II.4) : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

II.3.3 Machine à double alimentation cascadée à un repère

Il s'agit de deux machines à cage d'écureuil dont l'axe du rotor est identique. Les barres du rotor sont croisées entre les deux machines. Une machine a le stator connecté au réseau, l'autre à l'onduleur (cascade de puissance à double induction à châssis unique) [8].

II.3.4 Machine à double alimentation sans balais

C'est une machine très proche de la précédente, sauf que cette fois-ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil. (brushless doubly fed machine). La figure présente le schéma de principe de ce type de machine. [13]

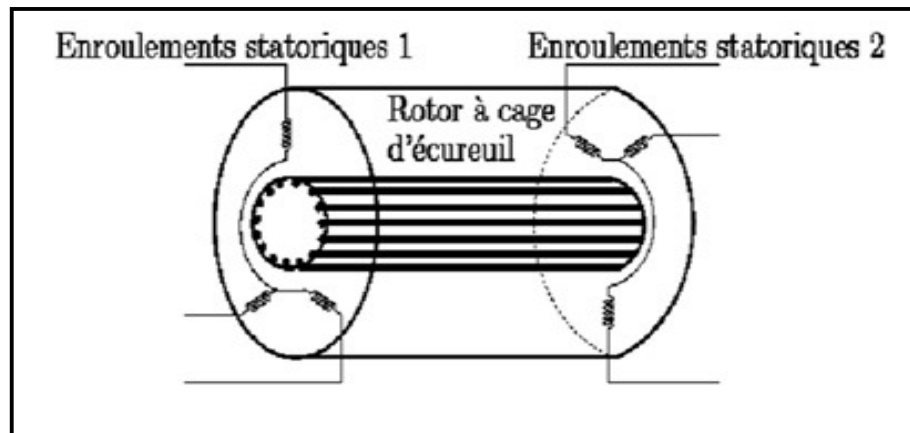


Figure (II.5) : Schéma de principe de deux machines asynchrones reliées mécaniquement et électriquement par le rotor.

II.3.5 Machine à double alimentation à reluctance variable

Est une machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à reluctance variable. Elle est nommée doubly fed reluctance machine.

II.3.6 Machine à double alimentation TANDEM

C'est une machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques: l'un est fixe, l'autre peut être tournant. Ainsi, l'on constate que sous la même dénomination, plusieurs configurations et constructions de MADA sont possibles.

II.3.7. Comparaison de différentes variantes de la machine à double alimentation

Le tableau classe et compare brièvement les variantes les plus attractives de la machine à double alimentation dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont basés sur : la complexité de la conception de la machine, la puissance gérée par l'onduleur connecté à la machine, et la stratégie de contrôle. [12]

Type de la machine à double alimentation	Construction de machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobiné	Etablie	Dépend de la Vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	Difficile	Comme la machine a rotor bobiné	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine sans balais	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine a rotor bobiné	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobine
Machine à réluctance variable	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine a rotor bobiné	comme la machine à rotor bobine

Tableau (II.1) : Classification et comparaison des différentes variantes de la MADA.

A ce jour, et avec les développements récents de l'électronique de puissance et des micro-ordinateurs, la machine asynchrone à double bobinage reste la machine la plus attractive selon de nombreux chercheurs en raison de son adéquation à divers domaines d'application. C'est parce qu'il a une conception solide et simple par rapport aux autres types.

II.4. Principe de fonctionnement MADA

Pour le fonctionnement normal d'une machine asynchrone à l'état stationnaire, les vecteurs de force magnétomotrice du stator et du rotor doivent être spatialement stationnaires l'un par rapport à l'autre. Et en supposant que le vecteur résultant fmm des enroulements du

stator tourne dans l'espace de avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$ et que le rotor tourne avec une vitesse ω ; Pour vérifier cette condition il faut alors que le vecteur f_{ms} des bobinages du rotor tourne par rapport au rotor à une vitesse m_{gl} telle que [6] :

$$m_{gl} = m_s - m_r = m_s g \quad (II.1)$$

Où : g est le glissement et m_{gl} est la vitesse angulaire du glissement. Si la vitesse machine est inférieure à la vitesse synchrone, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; Sinon, si la vitesse est supérieure à la vitesse synchrone, les sens sont opposés [14].

Pour que le vecteur résultant de f_{ms} tourne par rapport au rotor, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence définie par $m_{gl} = 2\pi f_r$; Soit [6] :

$$f_{ro} = f g \quad (II.2)$$

II.4.1 Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor [15]. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrone, il y'a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA .

Lorsque la machine fonctionne comme un moteur, l'énergie est fournie par le réseau. Si la vitesse est inférieure à la marche synchrone, la "puissance de glissement" est renvoyée au réseau, c'est une cascade sous-synchrone (quadrant 1).

En fonctionnement moteur hypersynchrone (quadrant 2), une partie de la puissance prélevée sur le réseau parvient au rotor où elle est transformée en puissance mécanique.

En fonctionnement en générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par l'appareil qui la commande est une puissance mécanique. En mode hyposynchrone (quadrant 3), une partie de la puissance circulant dans le stator est réabsorbée dans le rotor. En fonctionnement hypersynchrone (quadrant 4), toute la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau avec pertes. Une partie de cette puissance est transmise par la turbine. [15, 16]

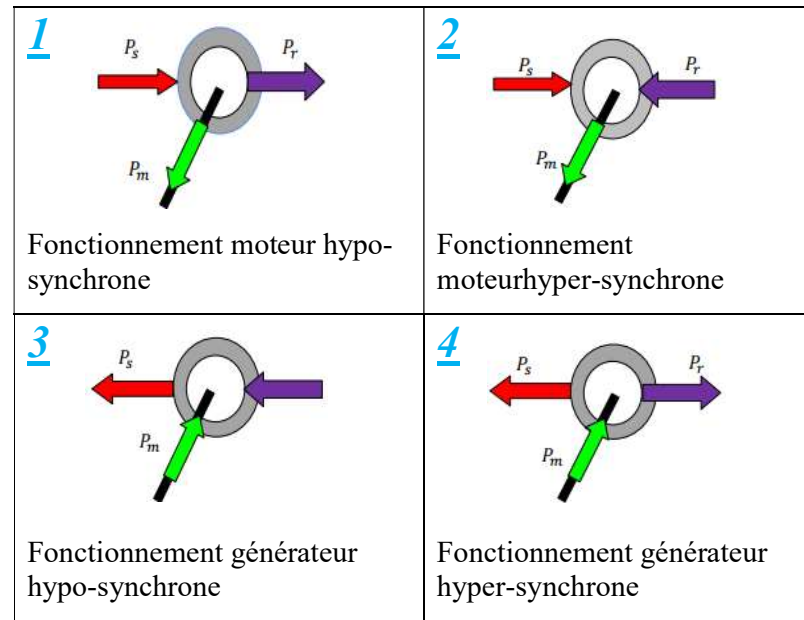


Figure (II.6) : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

P_s : La puissance transitant par le stator

P_r : La puissance transitant par le rotor

P_m : La puissance mécanique

Pour les applications éoliennes, on s'intéresse aux quadrants 3 et 4. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en dessous ou au-dessus de la vitesse synchrone (qui est un compromis entre taille et réducteur quarts de travail), la machine peut générer entre 0,7 et 1 ch.3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est donc choisi de telle sorte qu'il ne transmette que la puissance de glissement, i. H maximum fois la puissance nominale de la machine, il est donc moins massif, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins onéreux et génère moins d'interférences que lorsqu'il est placé entre les secteurs et le stator de la machine à paniers. [9, 15]

La figure (II.6) montre les caractéristiques de génération optimales pour deux types de machines (rotor à cage d'écureuil avec convertisseur et MADA) dans une éolienne à des fins de comparaison. Nous constatons que si la machine à cage d'écureuil peut générer de la puissance à très bas régime, elle est légèrement supérieure à la machine synchrone. MADA

ne produit qu'à partir de 1000 rpm afin de ne pas agrandir le rotor du convertisseur. La puissance totale générée par MADA est la somme de la puissance du stator et du rotor. [15]

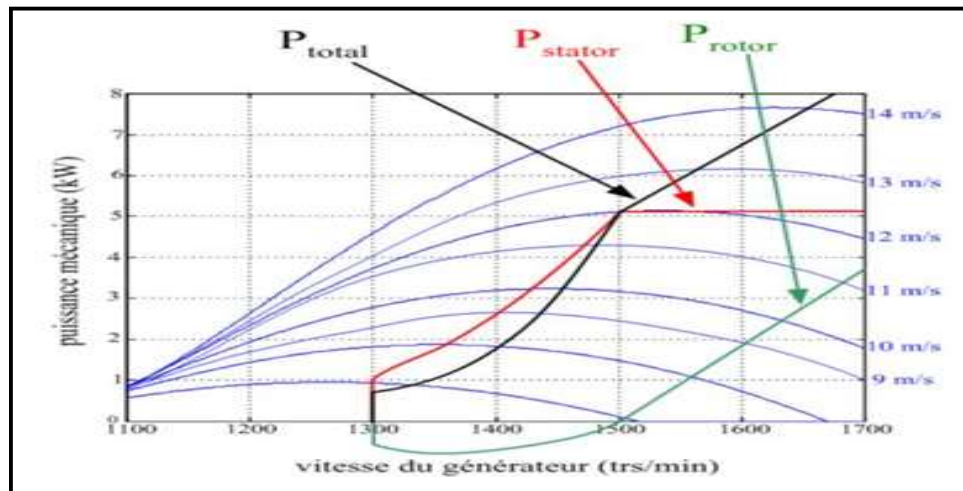


Figure (II.7) : caractéristique de production d'énergie optimale de la MADA et de la machine à cage.

La puissance totale générée par MADA est la somme de la puissance du stator et du rotor. Cependant, la puissance du rotor est négative au moment de la synchronisation, donc MADA produit légèrement moins que la machine à cage d'écurie. Synchronisation mise à part, cependant, la figure montre que MADA est capable de générer de la puissance à travers le rotor jusqu'à 1900 tr/min. [15]

II.5. Les Différentes stratégies de commande de la MADA

La structure de la machine asynchrone à double alimentation présente l'avantage de permettre de commander les variables de la machine, telle que, la puissance, la vitesse, le couple. Cette commande est réalisée par plusieurs méthodes et structures ; selon le mode de fonctionnement, la variable à commander et le domaine d'application. [6]

II.5.1 Commande de la MADA par un seul onduleur

C'est la stratégie la plus simple et la plus utilisée dans les applications industrielles, cette structure est illustrée par la figure suivante [17]:

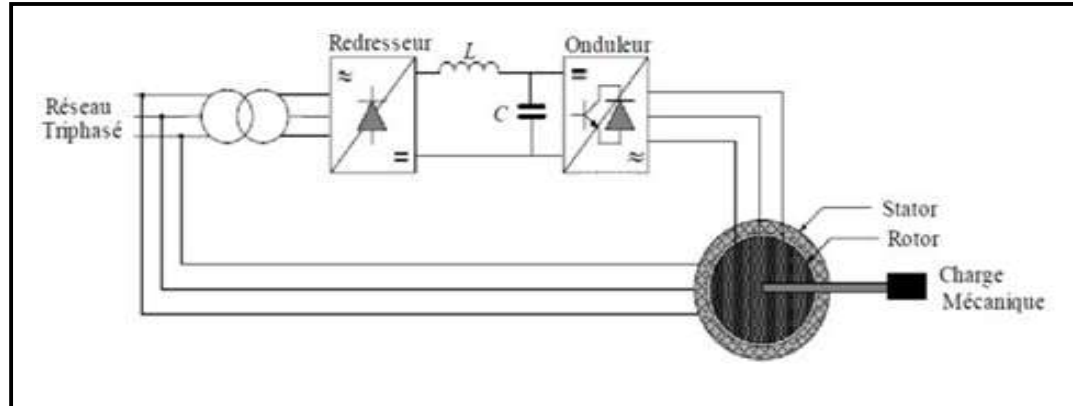


Figure (II.8) : MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor.

Dans cette structure de commande, la MADA est alimentée à son stator par le réseau, tandis que le rotor est alimenté à travers un système de conversion qui comporte un redresseur, un filtre et un onduleur. Cette structure est appelée aussi la cascade hyposynchrone. Elle permet de contrôler la puissance active et réactive statorique à la fois en régime permanent et transitoire [18]. La machine dans ce cas peut fonctionner en moteur ou générateur, mais l'application la plus courante est l'utilisation dans les systèmes de production d'énergie électrique notamment les systèmes éoliens et hydrauliques. On va étudier sa modélisation d'alimentation de cette commande dans le chapitre qui suit [6].

Commande de la MADA par deux onduleurs:

Cette structure de commande consiste en une MADA alimentée par deux onduleurs, l'un au stator et l'autre au rotor. Elle peut prendre deux formes équivalentes [13, 18, 19] :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas, c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés.

La première forme de cette stratégie de commande est illustrée par la figure suivante [17] :

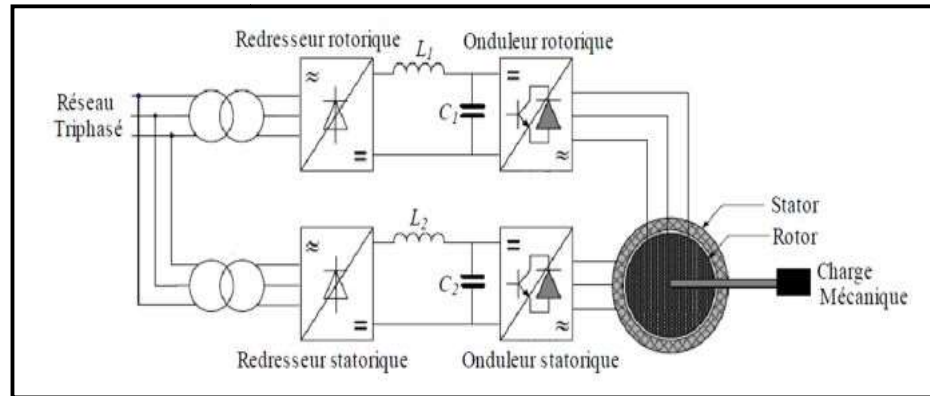


Figure (II.9) : MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs.

Cette structure est évidemment la structure la plus générale du système. Les deux redresseurs ont une source d'alimentation commune qui est le réseau triphasé [13].

II.5.2. Commande de la MADA par un redresseur alimentant deux onduleurs en parallèle

Sa structure est semblable à la précédente, sauf que les onduleurs sont alimentés par un seul redresseur. Cette structure est représentée par la figure suivante [6] :

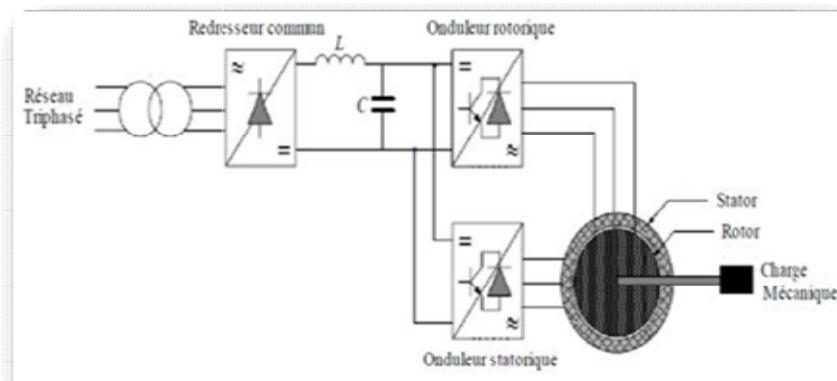


Figure (II.10) : Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.

Ces deux dernières structures de commande sont utilisées généralement dans le fonctionnement en moteur, pour les applications de traction électrique [13].

II.6. Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

II.6.1. Avantages de MADA

Les principaux avantages de MADA sont :

- L'accès au stator et au rotor offre la possibilité de différents degrés de liberté pour un bon contrôle du transfert de puissance et du facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération d'énergie ou d'injection dans les bobinages de la machine [6].
- Possibilité d'augmenter la plage de variation de vitesse autour de la vitesse synchrone. De plus, l'utilisation de la commande vectorielle en combinaison avec une technologie de commande moderne permet d'atteindre le couple nominal sur une large plage de vitesse [9, 17].
- Chez MADA, le circuit du rotor peut être contrôlé par un convertisseur de fréquence avec une puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur à rotor à commutation élevée est utilisé pour obtenir des performances dynamiques élevées en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de l'efficacité [6].
- L'utilisation de MADA permet de réduire la taille du variateur d'environ 70% en modifiant la vitesse en agissant sur la fréquence d'alimentation des bobinages du rotor. De ce fait, ce dispositif est bon marché et, contrairement à la machine asynchrone à cage, ne consomme aucune puissance réactive et peut également servir de fournisseur [9].
- En fonctionnement générateur, l'alimentation à fréquence variable du circuit rotorique permet d'alimenter le stator avec une fréquence constante, même avec des changements de vitesse. Cette opération représente MADA dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisés comme une alternative sérieuse aux machines synchrones conventionnelles [9].
- Son application est privilégiée du fait de la possibilité de réguler la vitesse de rotation en agissant sur les résistances du circuit rotorique et du fait de la possibilité de démarrer sans avoir à consommer de forts courants du réseau [6].

- Fonctionnement d'urgence en cas de panne d'un des deux onduleurs, plus souple qu'une machine d'injection [17].

II.6.2 Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, MADA est une machine asynchrone ; ainsi, le premier inconvénient est que sa structure n'est pas linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. De plus, les inconvénients suivants peuvent être mentionnés :

- ✓ Le marché traditionnel a été conquis par Caged SAM, qui est très bien documenté et bien connu, et la nouveauté peut faire peur [13].
- ✓ Elle est plus lourde qu'une cage MAS de même résistance. L'aspect multi-convertisseur augmente le nombre de convertisseurs et donc le prix [13].
- ✓ Plus de convertisseurs sont utilisés (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) que la machine à cage d'écurueil (un redresseur et un onduleur) [17].
- ✓ Tester cette machine à un autre défaut, et c'est la stabilité, surtout en boucle ouverte. Dans une machine asynchrone classique, ceci est assuré par la dépendance fondamentale de l'autorégulation, qui met en œuvre l'accrochage de la vitesse avec la fréquence statorique. Ainsi, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor se synchronisent. Mais dans le cas de la machine à induction à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. Par conséquent, une certaine synchronisation entre eux est nécessaire pour assurer la stabilité de la machine [6].

II.7. Domaines d'application de la MADA

Précisément en raison de ces nombreux avantages, la machine asynchrone à double alimentation occupe actuellement une place importante dans les applications industrielles. En fait, le DFID en mode générateur est largement utilisé dans les applications d'énergie renouvelable, en particulier dans les éoliennes [10].

De plus, le fonctionnement du générateur présente le DFID comme une alternative sérieuse aux machines synchrones conventionnelles dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisés, tels que B. [7] :

- Groupes électrogènes à bord de navires ou d'aéronefs ;
- groupes hydrauliques à débit et vitesse variables ;
- Groupes électrogènes dont la réduction de vitesse permet une réduction significative de la consommation de carburant pendant les périodes de faible consommation.

MADA peut également être utilisé dans d'autres applications importantes qui nécessitent des couples de démarrage élevés tels que : B. [13] :

- métallurgie avec bobinage et débobinage.
- Traction, en particulier dans des applications telles que le trafic urbain ou la propulsion marine.
- Et enfin l'application pour les plates-formes aériennes, les ascenseurs, les monte-charges, etc....

Il convient de noter que les applications du MADA dans les moteurs sont relativement limitées, principalement les systèmes de traction électrique et de pompage.

II.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

II.8.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé

La machine asynchrone à double alimentation est constituée d'un stator fixe et d'un rotor cyclique mobile. Le stator comporte trois enroulements connectés en étoile ou en triangle, alimentés par un système de tension triphasé, qui détermine la création d'un champ magnétique rampant dans l'entrefer de la machine (THÉORÈME DE FERRARIS). Le champ lié au stator est $\Omega_s = \omega_s/p$, où ω_s est la pulsation du réseau d'alimentation et p est le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine a un enroulement triphasé avec le même nombre de paires de pôles que le stator couplé en étoile. Une machine asynchrone à double alimentation dans un système tournant et biphasé.

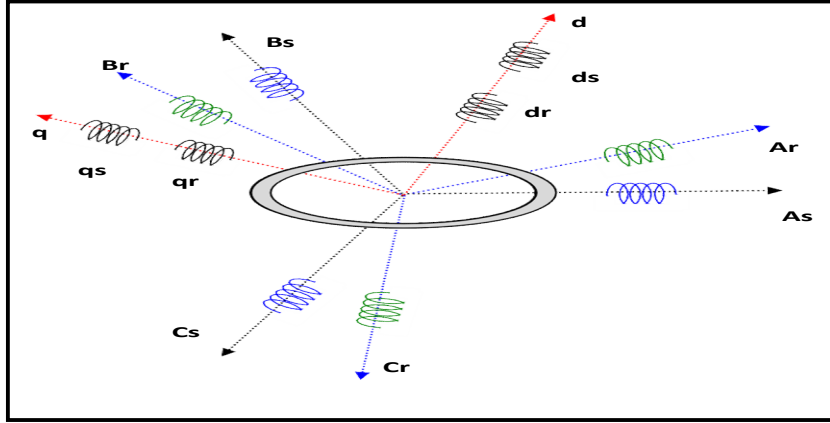


Figure (II.11) : Représentation de la MADA dans system biphasé et triphasé.

II.9. Les équation électrique de la MADA

A partir de la loi de Faraday, on a :

$$\frac{d\Phi}{dt} = V - R \cdot i \quad (\text{II.3})$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve:

- pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s \cdot i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s \cdot i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s \cdot i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

- pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r \cdot i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r \cdot i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r \cdot i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II.9.1. Les équations magnétiques sous forme matricielle

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [I_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{SA} \\ \Phi_{SB} \\ \Phi_{SC} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{rA} \\ \Phi_{rA} \\ \Phi_{rC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$[l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ \cos \theta_r & & \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

II.9.2. L'équation mécanique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$Cem = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec:
$$Cem = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

D'autre part nous avons l'équation du mouvement qui est donnée par :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = Cem - Cr - f_g \cdot \Omega \quad (\text{II.14})$$

Les équations différentielles décrivent le fonctionnement de cette machine sont en fonction de θ_r (système à résolution différentielles).

L'application de la transformation de park, s'avère nécessaire, cette dernière appliquée aux courants, tensions, et aux flux pour obtenir des équations différentielles à des coefficients constants.

II.10. Représentation de la MADA dans le système biphasé

II.10.1. Transformation de PARK

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions, et aux flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (V_a) statorique et le système d'axe (d-q).

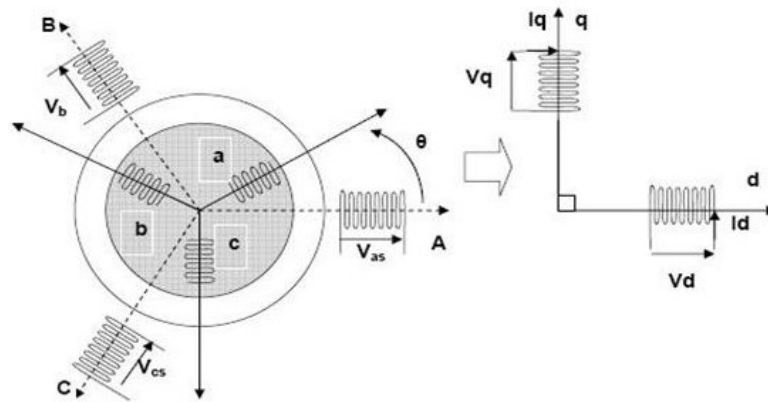


Figure (II.12) : Modèle de PARK pour la MADA.

II.10.2. Choix de référentiel

En générale le dernier est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues. Le système d'axe lié au champ tournant à l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les grandeurs variables sont traitées comme des grandeurs continues [21].

Ainsi que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations, il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante ce qui simplifie considérablement les calculs [22].

En plus, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander [21].

Nous avons trois orientations possibles du repère d-q

1- repère d-q lié au stator : $\theta_{\text{coor}} = 0$

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire et utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation., est caractérisé par la relation suivante :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dz} \\ V_{qx} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega M & R_r & \omega L_r \\ -\omega M & 0 & -\omega L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

2- repère d-q lié au rotor : $\theta_{\text{coor}} = \omega_m$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il est caractérisé par la relation suivante :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -M & R_r & -L_r \\ M & 0 & L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

3- repère d-q lié au champ tournant : $\theta_{\text{coor}} = \omega_s$

Ce référentiel n'importe aucune simplification aux équations de la machine, il est caractérisé par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s, \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s \quad (\text{II.19})$$

Tel que : g est le glissement

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -g\omega_s M & R_r & -g\omega_s L_r \\ g\omega_s M & 0 & g\omega_s L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Donc pour le passage du système triphase au système biphasé on utilise la matrice $P(\theta)$:

$$P(\theta) = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

L'angle θ dans la matrice de Park $P(\theta)$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et $(\theta_s - \theta_r)$ pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part:

$$P(\theta)^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

II.10.3. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d,q) :

Dans notre travail nous avons adopté le référentiel lié aux champs tournants, le système d'équations différentielles de la machine est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor} \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_m) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En générale le dernier est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs de réglage deviennent continues.

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\
 V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{dr}
 \end{aligned}
 \tag{II.24}$$

En appliquant la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes (d.q.o) et ceux des axes (a.b.c) on obtient :

$$\begin{cases}
 [\Phi_{dqos}] = [A_P][\Phi_s] \\
 [\Phi_{dqor}] = [A_P][\Phi_r]
 \end{cases}
 \tag{II.25}$$

$$\begin{bmatrix}
 \Phi_{sd} \\
 \Phi_{sq} \\
 \Phi_{rd} \\
 \Phi_{rq}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 L_s & 0 & L_m & 0 \\
 0 & L_s & 0 & L_m \\
 L_m & 0 & L_r & 0 \\
 0 & L_m & 0 & L_r
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 i_{sd} \\
 i_{sq} \\
 i_{rd} \\
 i_{rq}
 \end{bmatrix}
 \tag{II.26}$$

II.10.4. Simulation le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

II.10.4.1. Le schéma équivalent

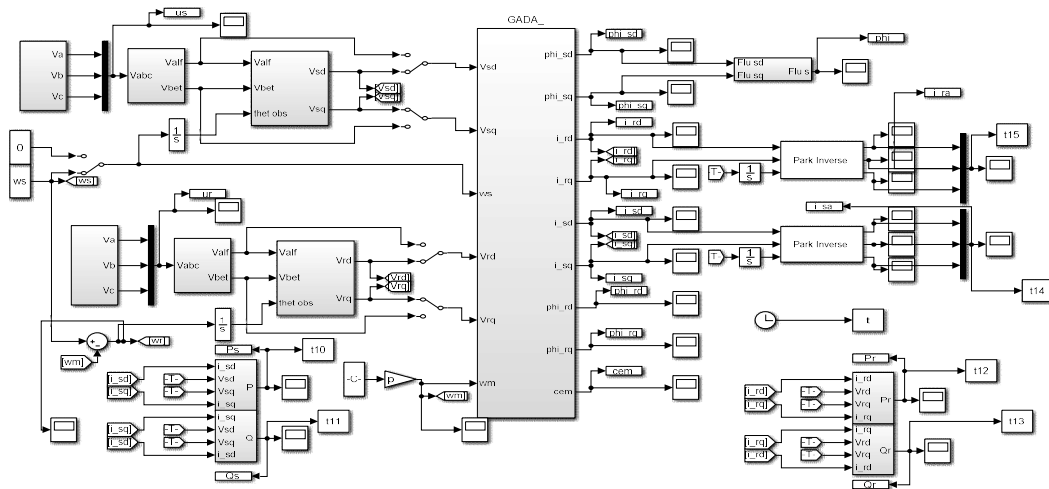


Figure (II.13) : Le schéma block de (GADA).

II.10.4.2. Les résultats de simulation GADA

A l'aide du logiciel MATLAB/simulink, la simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (repère (d, q))

lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une génératrice de puissance 2 Kw L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est de 50 Hz et d'amplitude 220 V et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12 V et une fréquence égale à 5 Hz. Les résultats de simulation de la génératrice asynchrone sont présentés sur les figure Suivants concernant respectivement les variables d'états : [Ids.Iqs.Idr.Iqr.Cem.Fdr.Fqr.Fds.Fqs.Ps.Qs.Pr.Qr.Is.Ir.Us.Ur].

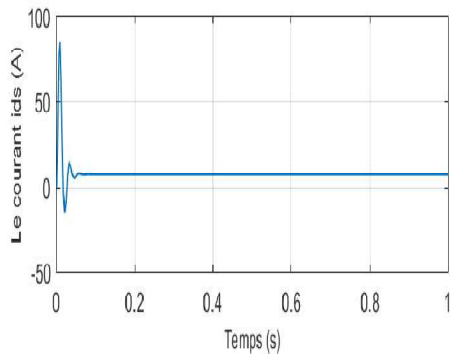


Figure (II. 14) : Allure du courant Ids (A).

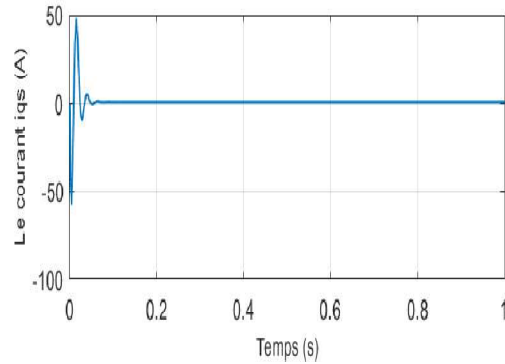


Figure (II. 15) : Allure du courant Iqs (A).

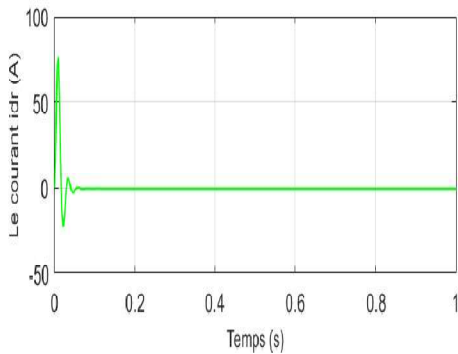


Figure (II. 16) : Allure du courant Idr (A).

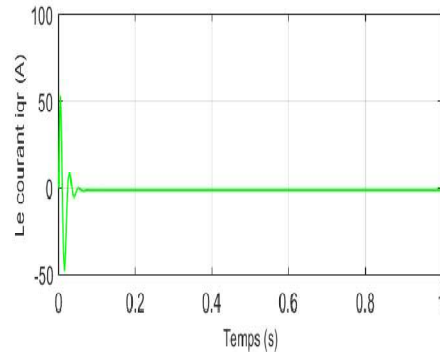


Figure (II. 17) : Allure du courant Iqr(A).

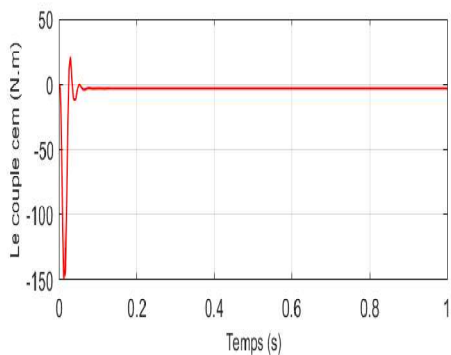


Figure (II. 18) : Le couple électromagnétique Cem.

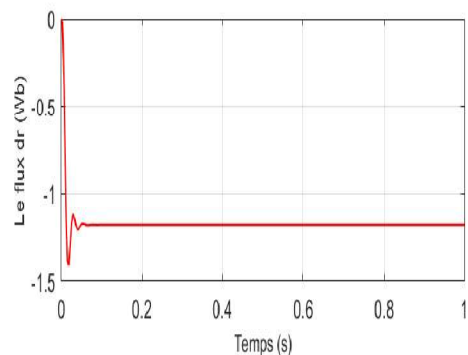


Figure (II. 19) : Allure du flux ϕ_{dr} (Wb).

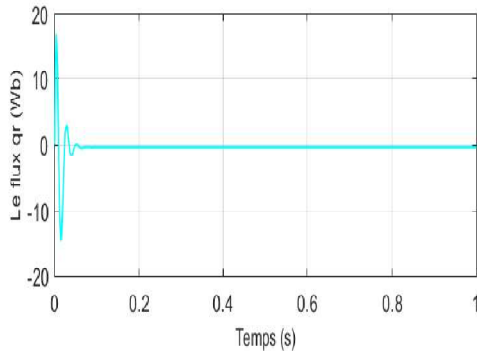


Figure (II. 20) : Allure du flux ϕ_{qr} (Wb).

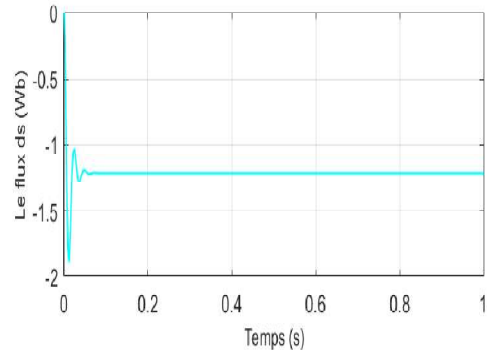


Figure (II. 21) : Allure du flux ϕ_{ds} (Wb).

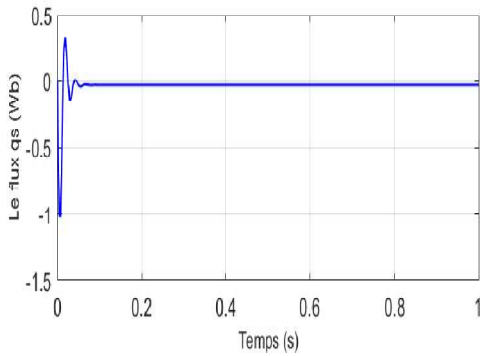


Figure (II. 22) : Allure du flux ϕ_{qs} (Wb).

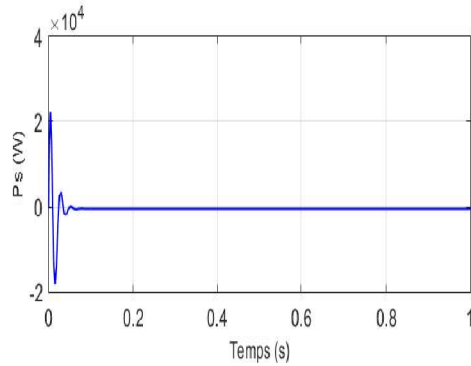


Figure (II. 23) : Allure de Puissance active de stator(W).

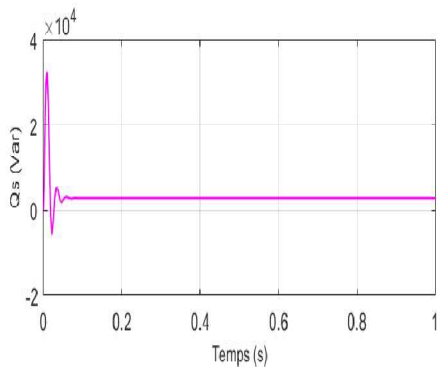


Figure (II. 24) : Allure de Puissance réactive de stator (Var).

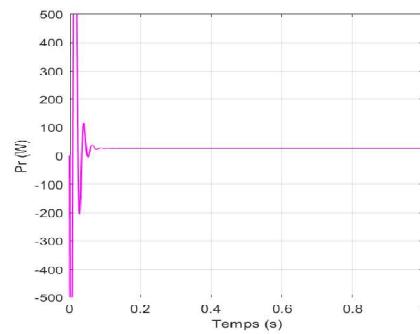


Figure (II. 25) : Allure de Puissance active de Rotor (W).

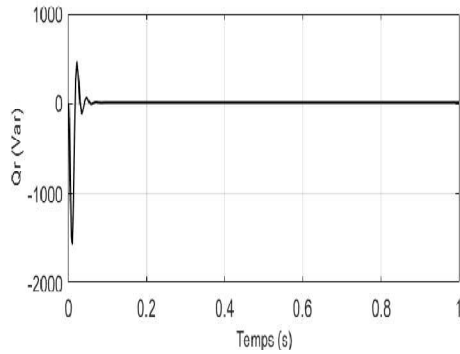


Figure (II. 26) : Allure de Puissance réactive de rotor (Var).

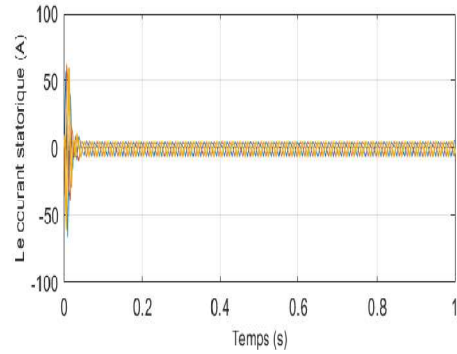


Figure (II. 27) : Allure de courant statorique (A).

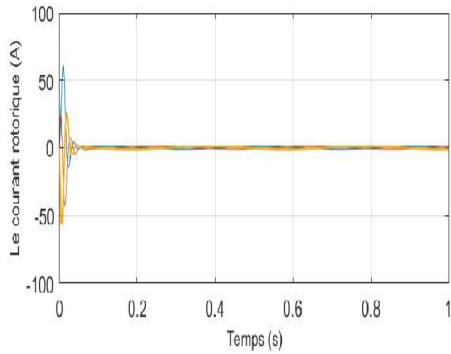


Figure (II. 28) : Allure de courant rotorique (A).

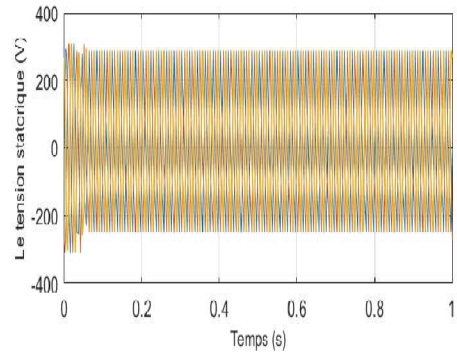


Figure (II. 29) : Allure du tension statorique (V).

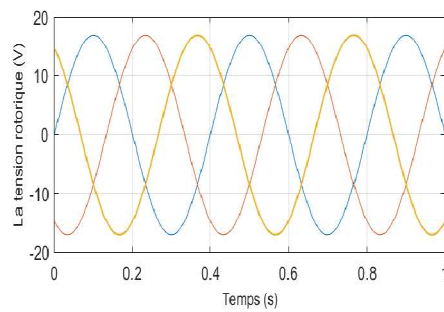


Figure (II. 30) : Allure du tension rotorique (V).

II.10.5. Modélisation de l'onduleur de tension triphasé

II.10.5.1. Définition

L'onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative. Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode montée en antiparallèle [23].

II.10.5.2. La modélisation

La modélisation a pour objectif de trouver une relation entre les quantités de contrôles, les quantités électriques de la partie alternée et les quantités électriques de la partie continue du convertisseur. [24] Pour cette modélisation, on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à $E/2$ connectés entre eux par un point noté n [23].

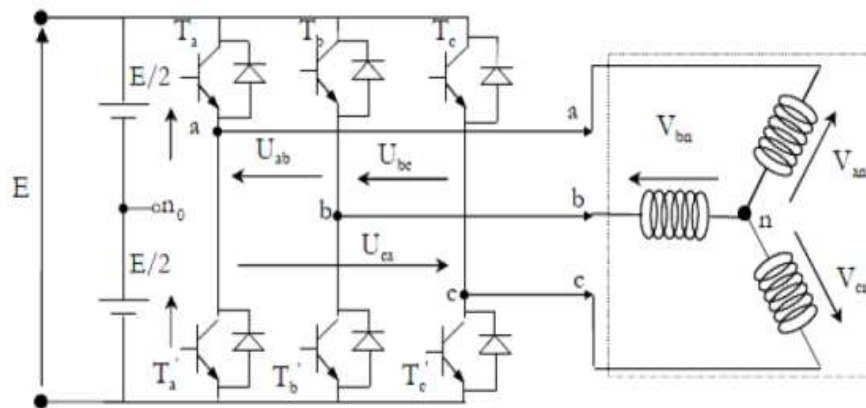


Figure (II. 31) : Onduleur de tension triphasé.

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- *- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- *- Les chutes de tension à leurs bornes sont négligeables.
- *- La charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile avec point neutre isolé n.

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors ; on a :

- * si $S_i=1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert.
- * si $S_i=0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Les relations donnant les tensions simples sont :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Les tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} forment un système de tension triphase équilibre alors:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.29})$$

Donc:

$$\begin{cases} V_{an} = 1/3(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = 1/3(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = 1/3(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

D'autre part:

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 :

$$\begin{cases} V_{an0} = V_{nn0} + V_{an} \\ V_{bn0} = V_{nn0} + V_{bn} \\ V_{cn0} = V_{nn0} + V_{cn} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = 1/3[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II.33})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits, On a :

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (\text{II.34})$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.35)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technologie de réglage triangulaire de la largeur de l'onde de poche (MLI), qui permet à son tour d'ajuster simultanément la fréquence et la tension de sortie effective.

II.10.5.4. Le schéma équivalent

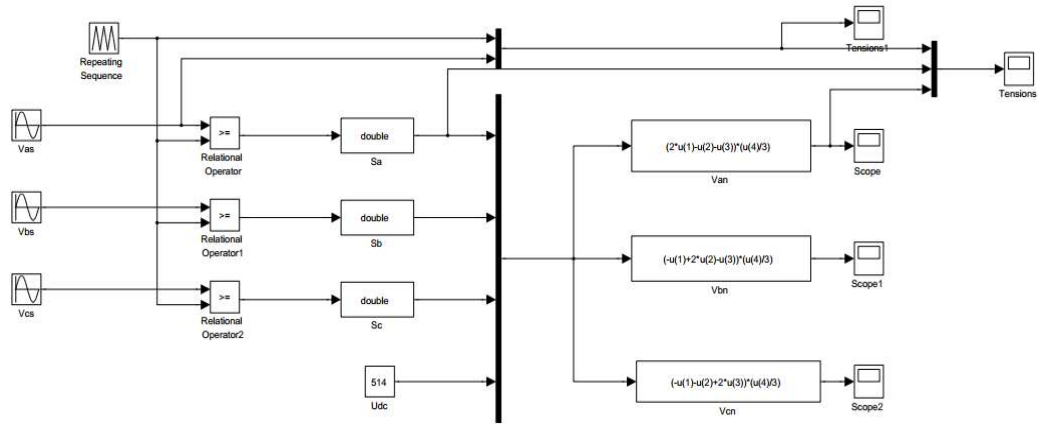


Figure (II. 32) : Le schéma block d'onduleur.

II.10.5.5. Les résultats de simulation Onduleur

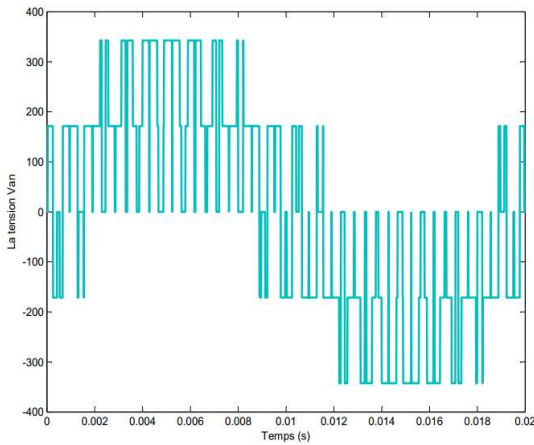


Figure (II. 33) : Allure de la tension Van.

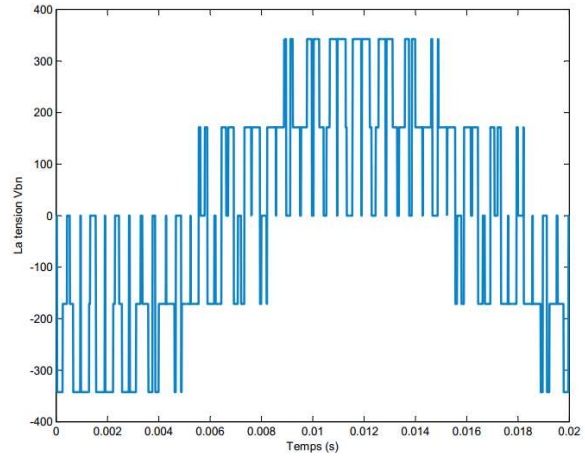


Figure (II. 34) : Allure de la tension Vbn.

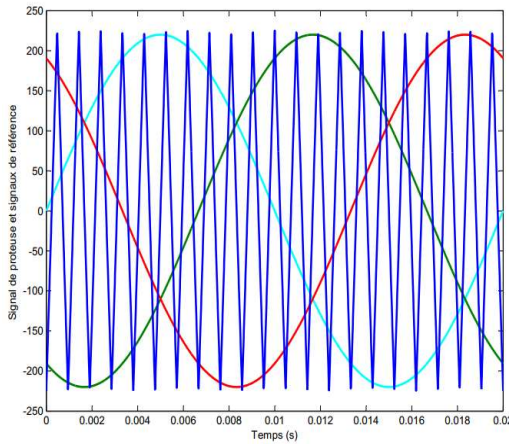


Figure (II. 36) : Allure de signal de proteuse et signaux de référence (Vas Vbs Vcs).

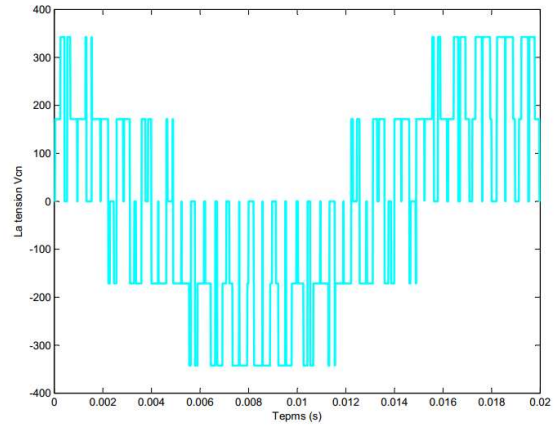


Figure (II. 35) : Allure de la tension Vcn.

II.10.6. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI

➤ La commande MLI :

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la technique d'origine analogique dite sinus-triangle. La modulation triangulaire-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersectée puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale avec une onde porteuse haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulaire-sinusoïdale.

II.10.6.1. Le schéma équivalent

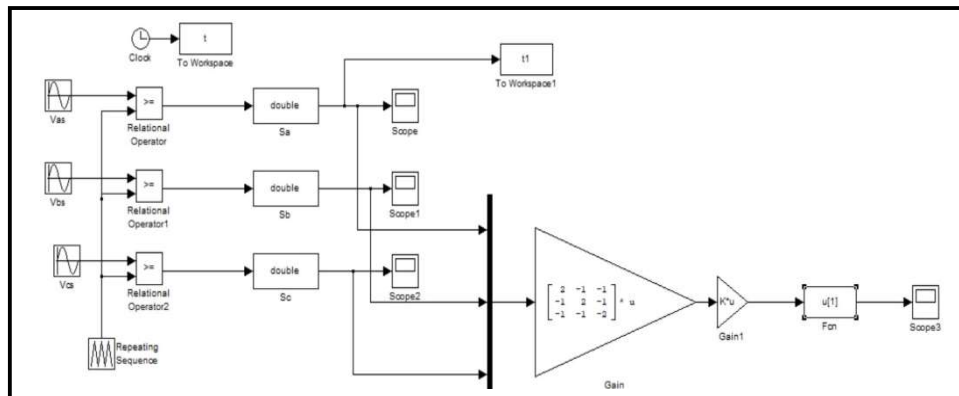


Figure (II. 37) : Le schéma block d'onduleur triphasé à MLI.

II.10.6.2. Les résultats de simulation

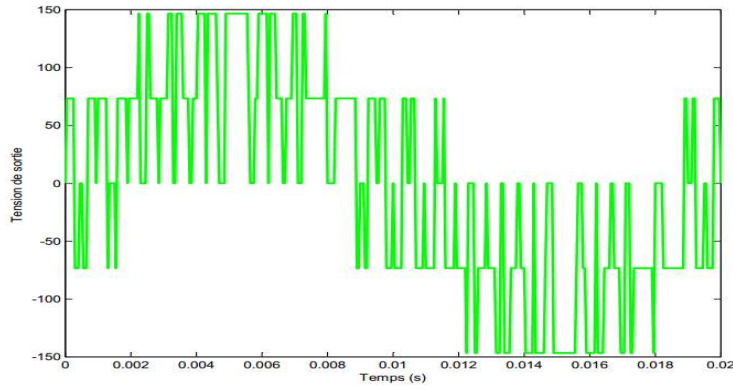


Figure (II. 38) : Allure de La tension de sortie d'une phase de l'onduleur.

II.10.7. Modélisation de redresseur a diode

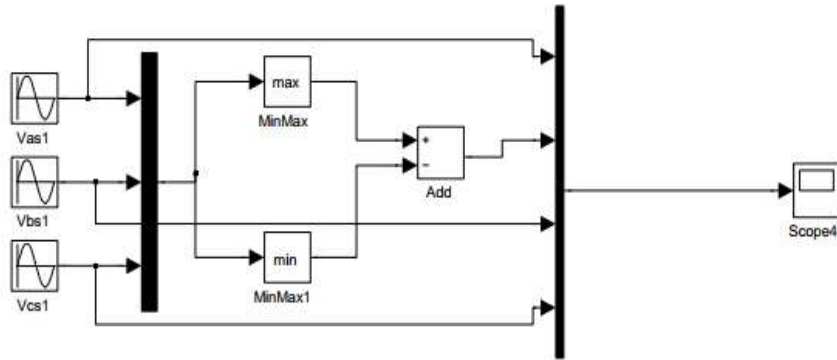


Figure (II. 39) : Le schéma block de redresseur a diode.

II.10.7.1. Les résultats de simulation de redresseur

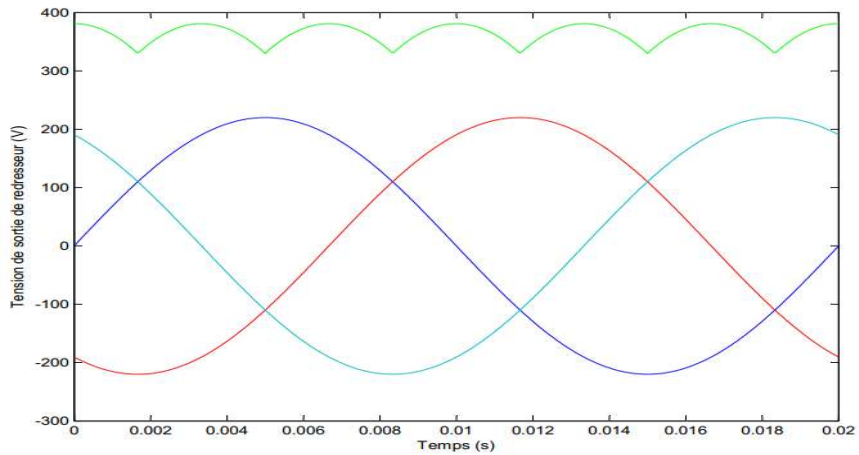


Figure (II. 40) : Les tensions de sortie de redresseur.

II.11. Modélisation de la partie mécanique

II.11.1. Quelques définitions

Le vent est l'air en mouvement dans l'atmosphère, et comme tout objet en mouvement, il doit être associé à l'énergie cinétique. C'est une fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si nous supposons que la densité de l'air est constante, alors nous pouvons dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse [24].

◆ La Vitesse du vent

La variabilité quotidienne de la vitesse du vent est due à des phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent change légèrement la nuit et le jour augmente lorsque le soleil se lève. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent de l'emplacement géographique et varient d'un endroit à l'autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres du vent à long terme peuvent décrire ces différences.

◆ La surface balayée par le rotor

Le rendement énergétique d'une éolienne dépend de la surface balayée par son rotor, donc de la longueur des pales. Cela découle de l'équation de puissance aérodynamique.

◆ La densité de l'air

L'énergie cinétique contenue dans un objet mouvant est proportionnelle à sa densité (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, la masse de l'air par unité de volume. En d'autres termes, plus l'air est dense, plus il est possible de récupérer de l'énergie grâce à l'éolienne.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique diminue légèrement à mesure que l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne [24].

II.11.2. Hypothèses simplificatrices

Pour modéliser la turbine éolienne on adopte les hypothèses suivantes:

- Les pales sont considérées de conception identique

- On considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée, alors nous pouvons considérer l'ensemble des pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.
- De par la conception aérodynamique des pales, leurs coefficients de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré.
- De même la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice [26].

II.11.3. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps $V = f(t)$. La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de la saison concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivant [23]:

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.36})$$

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent.

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k .

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k .

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

II.11.4. Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R_t Entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G voir la figure suivante [26]:

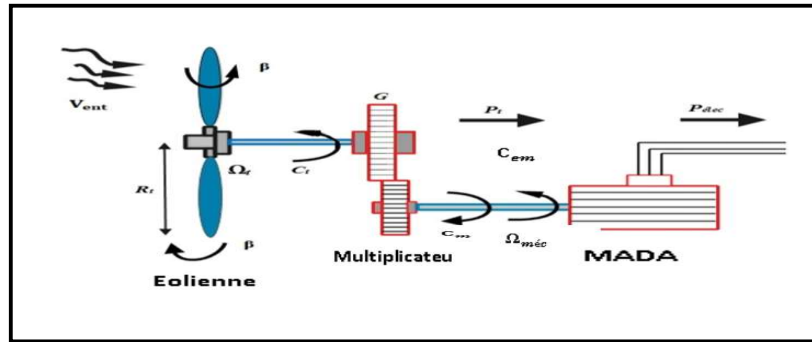


Figure (II. 41) : Schéma de la turbine éolienne.

La puissance P_v issue de l'énergie cinétique d'un vent incident d'une vitesse V_v , traversant une surface S_t , s'exprime par la relation suivante [26]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II.37})$$

Avec : $S_t = \pi R_t^2$

Le vent de vitesse v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_{tur} s'exprimant par :

$$P_{tur} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II.38})$$

Avec :

λ = La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

ρ = La masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).

S_t = La surface circulaire balayée par la turbine.

Ω_t = La vitesse de rotation de la turbine.

R_t = Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance est défini par le ratio de la puissance captée par la turbine sur la puissance de vent, il présente un maximum de $16/27=0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz [26].

- Le coefficient de puissance Cp :

$$C_p = \frac{P_{tur}}{P_v} \quad (II.39)$$

L'évolution du Cp dépend de l'angle d'orientation des pales β et de la vitesse spécifique lambda

L'expression utilisée est donné par :

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left[\left(\frac{A_2}{\lambda_i} - A_3\beta - A_4 \right) e^{\frac{A_5}{\lambda_i}} + A_6\lambda \right] \quad (II.40)$$

Avec : $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$, $A_1=0.5$, $A_2=116$, $A_3=0.4$, $A_4=5$, $A_5=-21$, $A_6=0.0068$

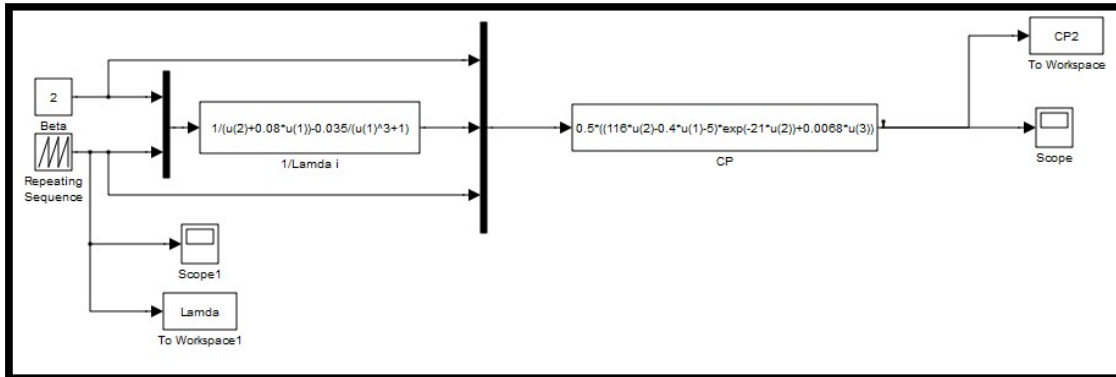


Figure (II. 42) : Schéma block de Le coefficient de puissance.

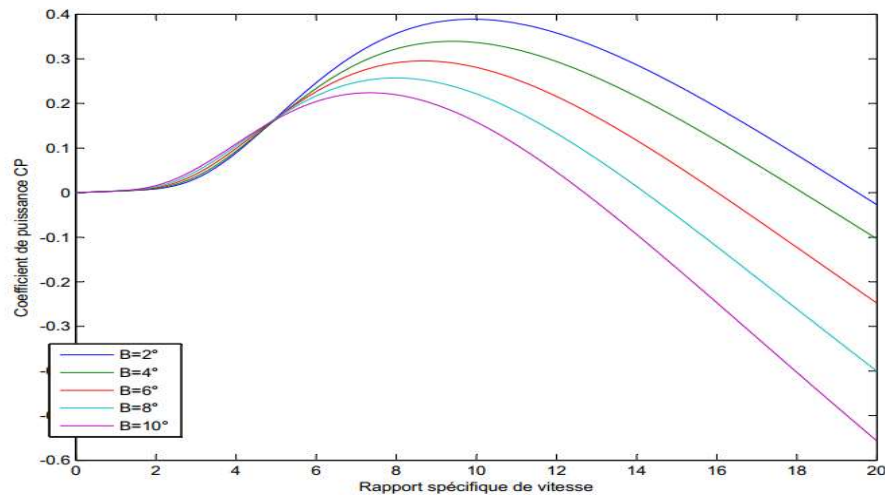


Figure (II. 43) : Coefficient de puissance Cp en fonction de lambda pour β:2°,4°,6°,8°,10°.

- La vitesse spécifique lamda :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (\text{II.41})$$

- Le couple de la turbine éolienne

L'expression du couple de la turbine est donnée par :

$$C_t = \frac{P_{\text{tur}}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S_t \cdot V_v^3 \quad (\text{II.42})$$

II.11.5. Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (rapide). Il est mathématiquement modélisé par les équations suivantes [27] :

- Le couple de générateur

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{II.43})$$

Avec :

C_g : Couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m).

C_t : Le couple développé par la turbine.

G : le gain du multiplicateur.

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice comme suivant :

- La relation entre les deux vitesse (turbine, générateur)

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{\text{méc}} \quad (\text{II.44})$$

Avec:

$\Omega_{\text{méc}}$: La vitesse mécanique de la génératrice.

Ω_t : La vitesse de la turbine.

II.11.6. Modélisation de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total $C_{méc}$ appliqué au rotor [23] :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (\text{II.45})$$

Avec:

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g$$

Et:

J: Inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

J_{tur} : Inertie de la turbine.

J_g : Inertie de la génératrice.

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

$$C_{méc} = C_g - C_{vis} - C_{em} \quad (\text{II.46})$$

Le couple des frottements visqueux C_{vis} on peut écrire comme suit :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (\text{II.47})$$

Avec:

f : Coefficient de frottement visqueux.

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure. II.44 peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice comme montre dans la figure (II.44) [28].

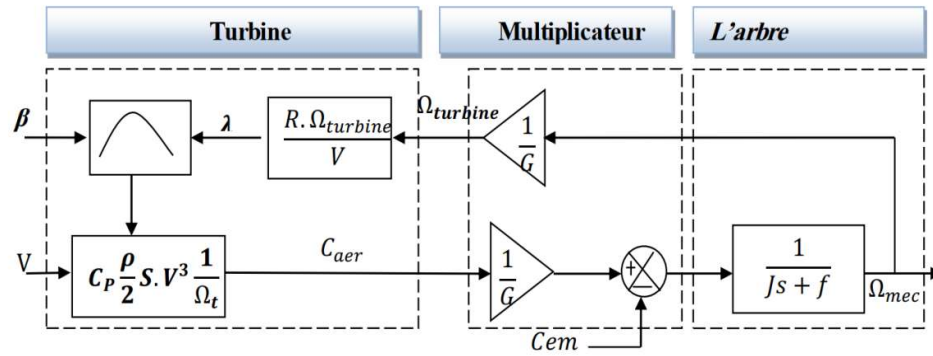


Figure (II. 44) : Schéma block du modèle de la turbine..

II.11.7. Le suivi de point de puissance maximum (MPPT)

II.11.7.1. Définition

Le suivi de point de puissance maximum power truck (MPPT) ou parfois simplement le suivi de point est une technique couramment utilisée avec les éoliennes et les systèmes solaires photovoltaïques (PV) pour maximiser l'extraction de puissance dans toutes les conditions [29]. Le MPPT a été créé pour avoir la meilleure connexion possible entre la source non linéaire et le réseau et ainsi toujours extraire le maximum de puissance [23].

II.11.7.2. Les différents types de MPPT

Il en existe plusieurs types, nous mentionnons deux types :

II.11.7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em_ref} . (c-à-d: $C_{em} = C_{em_ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine Ω_t qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la génératrice Ω_r , égale à Ω_t (pas de multiplicateur) est influencée par L'application de trois couples : le couple éolien C_g , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_r . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire[30] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - C_r) \quad (II.48)$$

Avec : J : l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice.

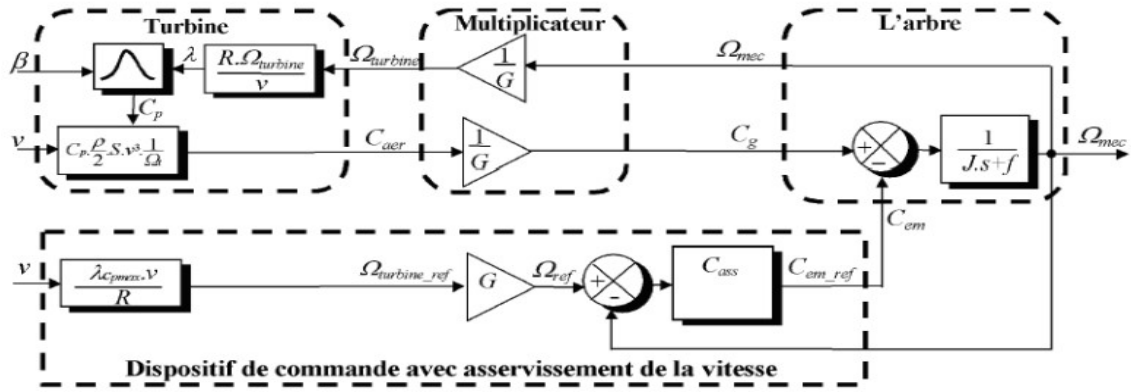


Figure (II. 45) : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

II.11.7.4. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine[30] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - C_r) = 0 \quad (II.49)$$

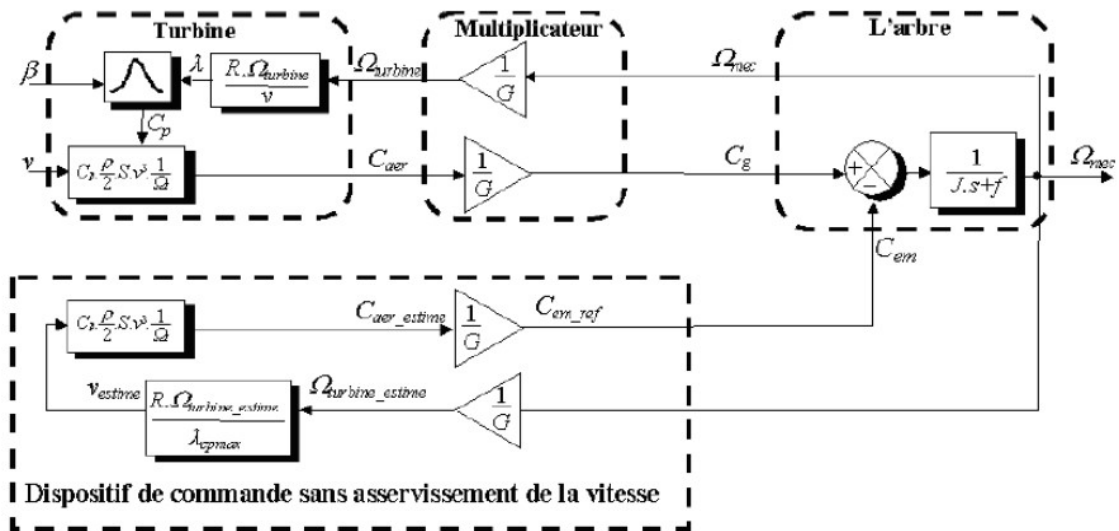


Figure (II. 46) : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

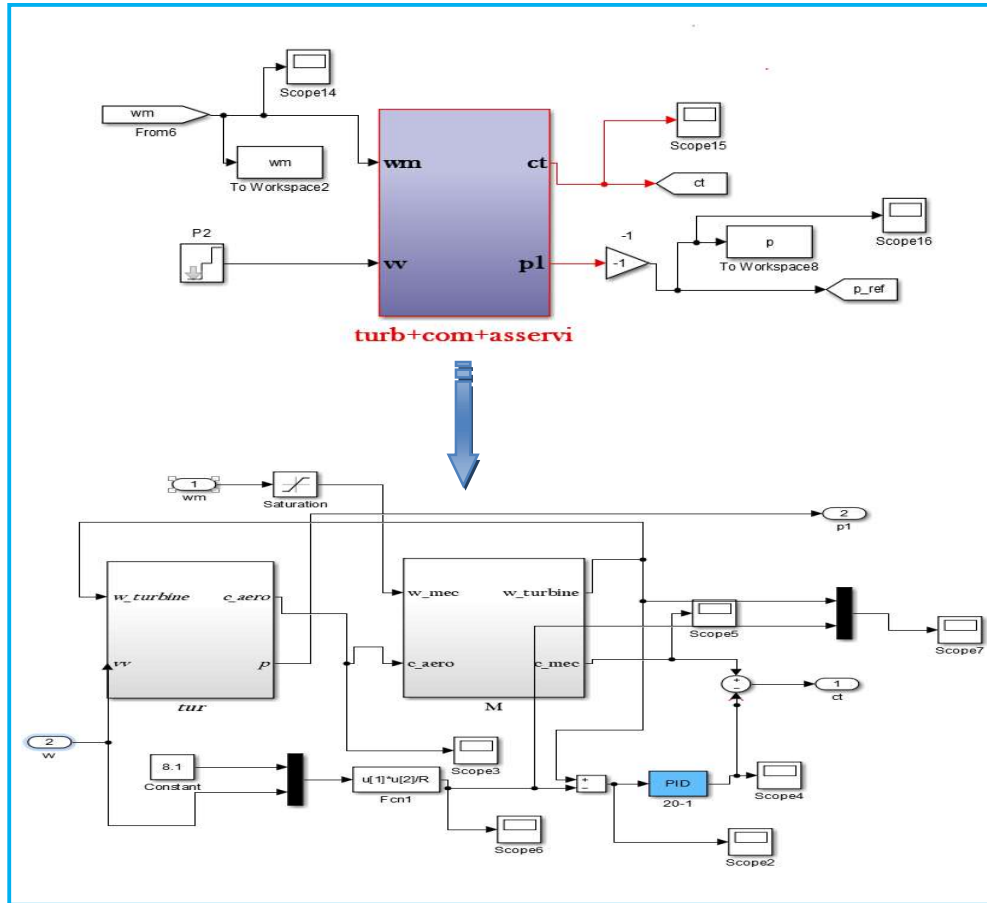


Figure (II. 47) : Schéma block du modèle de la turbine sur Matlab.

II.11.7.5. Les résultats de simulation

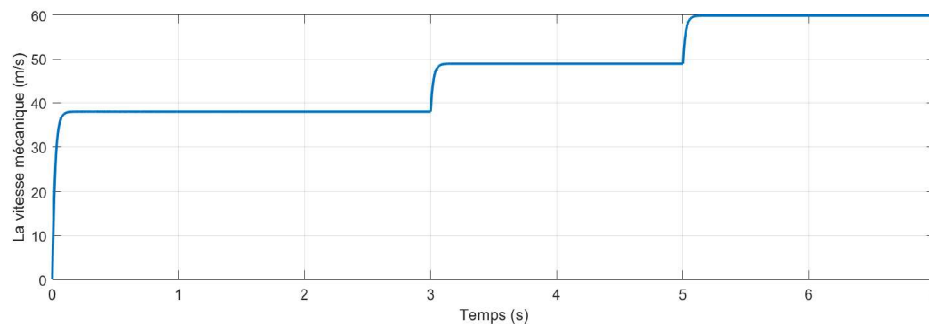


Figure (II. 48) : Allure de la vitesse mécanique $\Omega_{méc}$ (Rad/s).

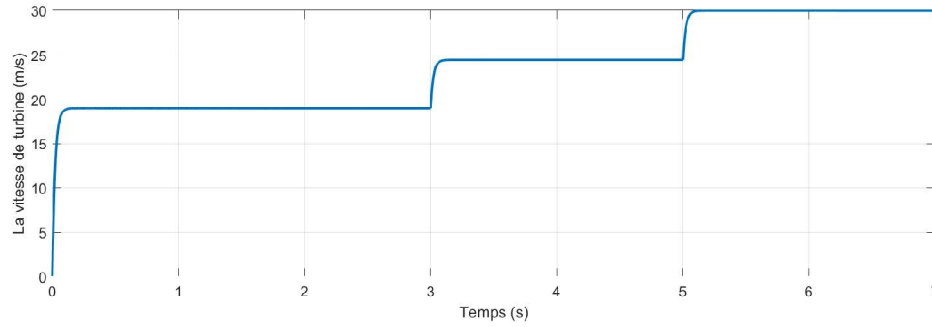


Figure (II. 49) : Allure de la vitesse de la turbine Ω_t (Rad/s).

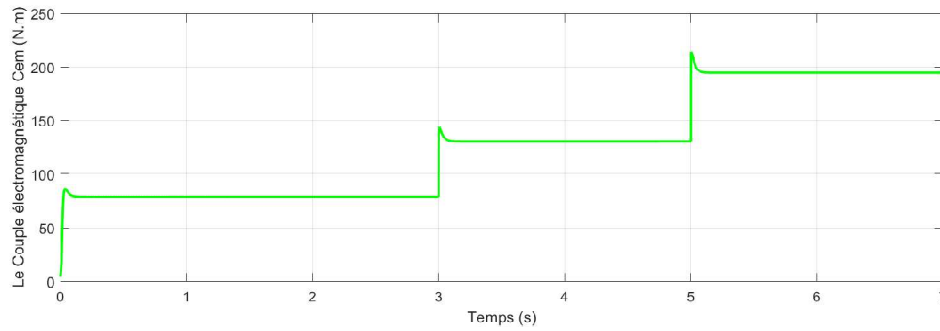


Figure (II. 50) : Allure de Couple électromagnétique Cem (N.m).

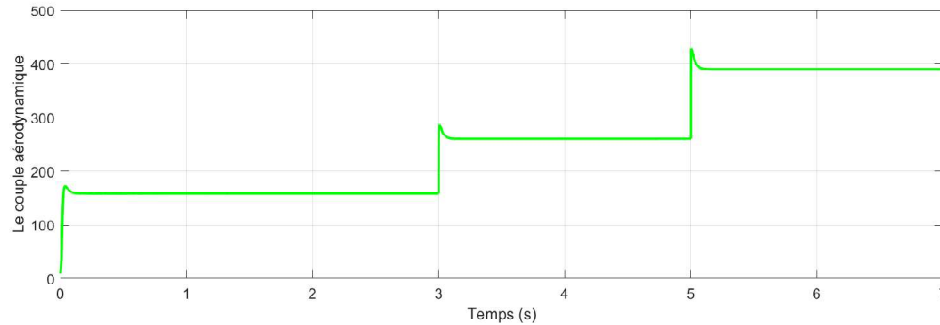


Figure (II. 51) : Le couple aérodynamique $Caéro$ (N.m).

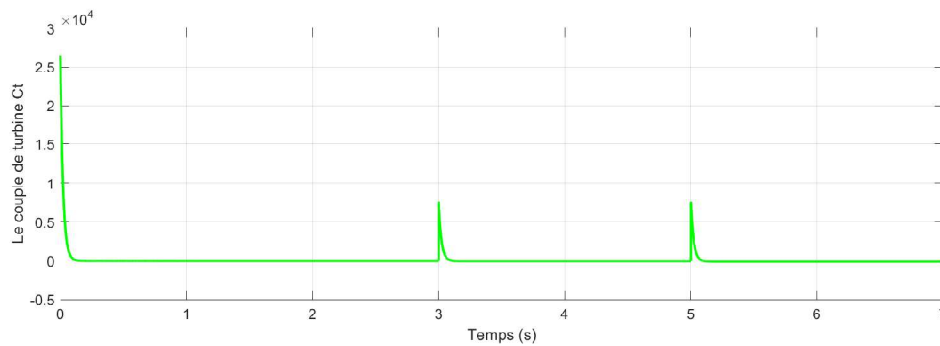


Figure (II. 52) : Allure de Couple développé par la turbine Ct .

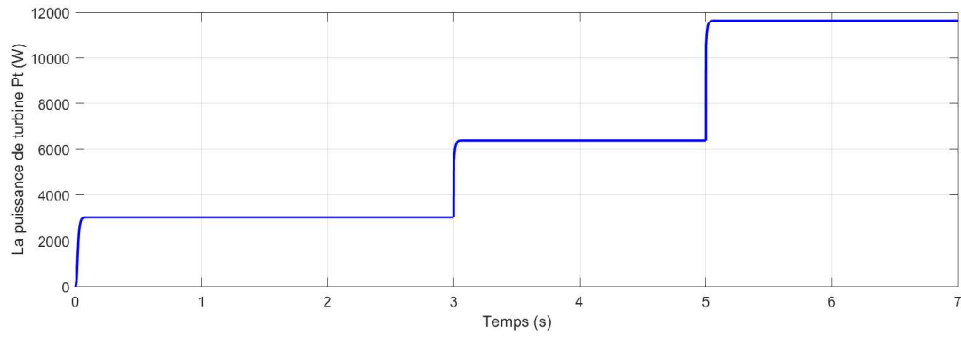


Figure (II. 53) : Allure de puissance captée par la turbine Pt (W).

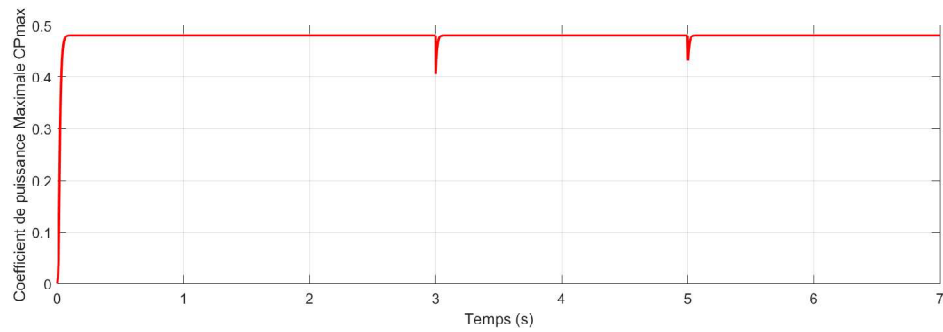


Figure (II. 54) : Allure de coefficient de puissance maximale CPmax .

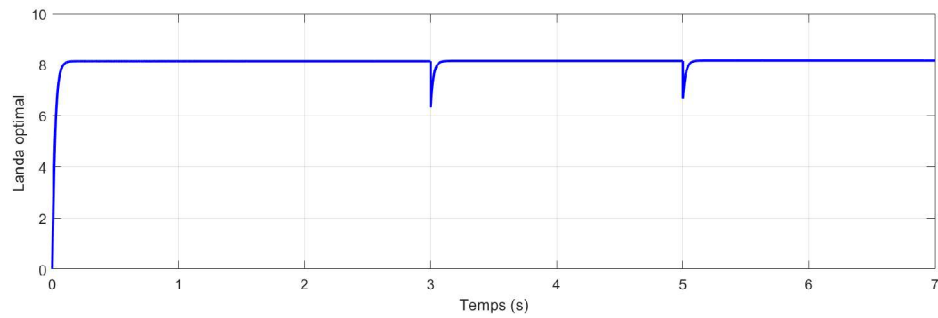


Figure (II. 55) : Allure de Landa optimale λ_{opt} .

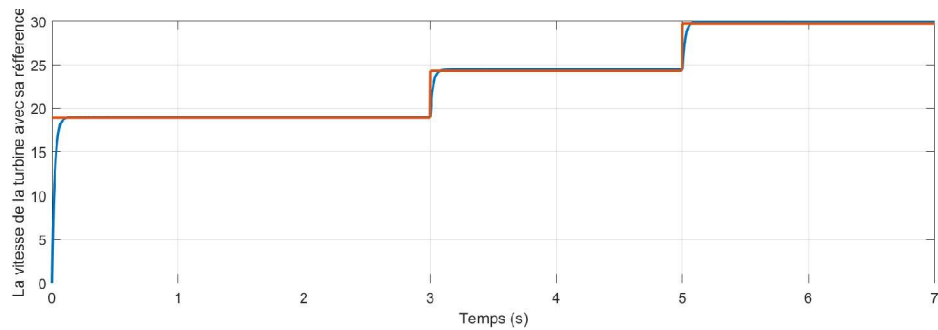


Figure (II. 56) : Allure de la vitesse de turbine avec sa référence .

II.12. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de la génératrice asynchrone doublement alimentée GADA. En plus des types de MADA, formes, méthodes de contrôle, leurs avantages et inconvénients, leurs domaines d'utilisation, puis nous avons touché à leurs équations électriques et mécaniques et les simulés en général. D'autre part, nous avons modélisé les différentes parties de la série de conversion de l'énergie éolienne, en simulant le coefficient de puissance et en extrayant la valeur grâce à laquelle nous obtenons les meilleurs résultats possibles. Enfin, nous avons modélisé MPPT pour tirer parti de la valeur la plus élevée possible.

III. La commande vectorielle de la MADA



Chapitre III : La commande vectorielle de la MADA

III.1. Définition

La commande des machines électriques fait depuis longtemps l'objet de quelques recherches et travaux, et diverses commandes ont été développés pour commander ces machines [26]. Pour les applications hautes performances telles que les variateurs de vitesse dans les systèmes de production d'énergie, le contrôle vectoriel des machines à double alimentation est une solution plus intéressante [30].

Contrôle vectoriel pour moteurs synchrones et asynchrones et onduleurs en général, par exemple dans le cas d'installations à haute tension courant continu. Il a été conçu à l'origine pour des applications nécessitant de bonnes performances du moteur : douceur de fonctionnement sur toute la plage de vitesse, couple maximum à vitesse nulle, bonne dynamique et accélérations et décélérations rapides. Cependant, cette technique devient de plus en plus populaire car elle permet également de réduire la taille des moteurs utilisés dans le système (nouveaux moteurs "brushless"), d'où son coût, et sa consommation électrique [29].

Dans ce chapitre, Nous modéliserons des équations qui relient la tension de rotation aux forces actives et réactives du cœur, afin de développer une série de commandes de puissance indépendantes, qui à leur tour nous aideront à contrôler le système de production d'énergie éolienne.

III.2. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances actives et réactives générées au stator de la machines. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique I_{qr} , et la puissance réactive dépend uniquement du courant I_{dr} [23].

Les principes de cette commande ont été élaborés dès 1972 par Blaschke, Son l'objectif est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante ou il y a un découplage naturel entre la grandeur comendant le flux, et celle lié au couple. Ce qui permet de contrôler indépendamment ces deux dernière grandeurs l'une par rapport à l'autre [26].

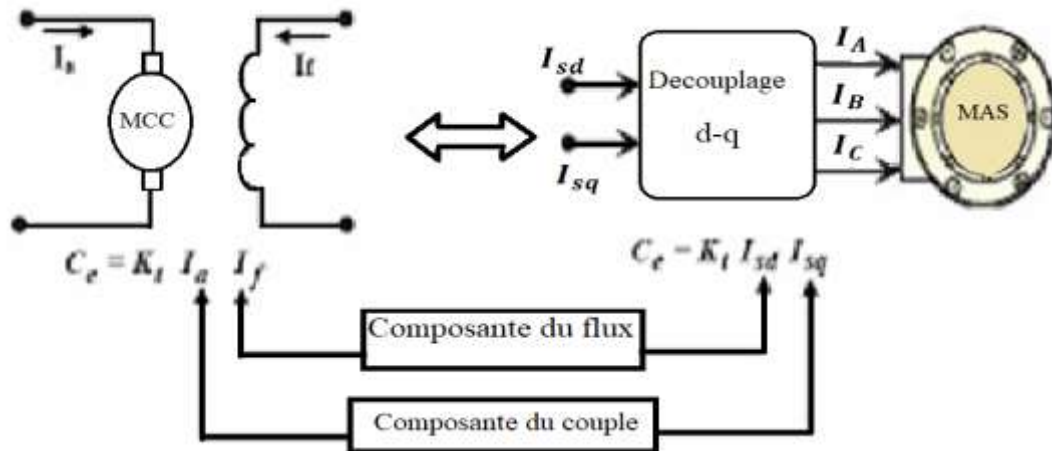


Figure (III.1) : Principe de la commande vectorielle.

III.3. Avantage et inconvénient

Avantage :

- ✓ Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- ✓ Elle est précise et rapide.
- ✓ Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- ✓ Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase [29].

Inconvénients :

- ✓ Coûteuse (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP.). Le processeur doit être capable de calculer l'algorithme environ toutes les millisecondes.
- ✓ Faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celles de la constante de temps rotorique.
- ✓ Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- ✓ De mauvais paramètres entraînent une erreur sur le couple.

Dans la commande vectorielle la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée cette analogie est représentée dans la figure III.1. Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d de repère de park suivant l'un du flux de la machine statorique, rotorique, ou entre fer aux choix afin d'obtenir un découplage flux courant et couple courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment de flux

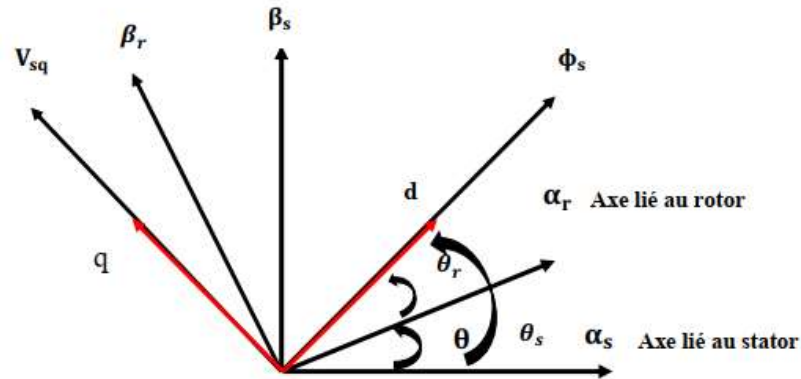


Figure (III.2) : Orientation du flux statorique sur l'axe d.

III.4. Orientation du flux statorique

Afin de réaliser la loi de commande nous choisissons d'orienter le flux statorique suivant l'axe d. Par conséquent nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s I_{sd} \\ V_{sq} &= R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} &= R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Avec $\omega_r = g\omega_s$ c a d $\omega_r = (\omega_s - \omega_m)$

Si on néglige la résistance R_s ce qui correspond à une hypothèse réaliste par rapport aux pertes pour le cas des machines de moyenne et forte puissance généralement employées dans le domaine dès la conversion de l'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [23].

$$\begin{aligned} V_{sd} &= 0 \\ V_{sq} &= V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{rd} &= R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \omega_r \varphi_{rd} \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} &= \varphi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 &= L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} &= L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{sq} &= L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

III.4.1. Relation entre les courants statoriques et rotoriques

A partir des équations, on peut ensuite écrire les équations reliant les courants statoriques aux courants rotoriques.

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

III.4.2. Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas donne

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En remplaçant les courants de stator en quadrature directe I_{sd} et I_{sq} avec leurs expressions, nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Il ressort de l'expression que le contrôle des puissances active et réactive au stator est indépendant. Avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près imposée par le réseau.

$$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \quad (\text{III.9})$$

III.4.3. Relation entre tension rotorique et courant rotorique

$$\begin{aligned} \varphi_{rd} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{V_s M}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} - \omega_r \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Où g est le glissement de la machine asynchrone et la pulsation rotorique :

$$\omega_r = g \omega_s \quad (\text{III.12})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} &= R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

La figure représente le schéma bloc illustrant la structure interne de la MADA.

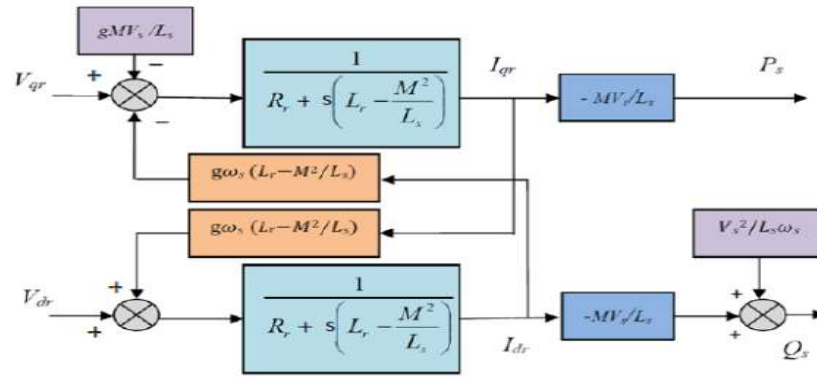


Figure (III.3) : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma montre les fonctions de transfert du premier ordre des deux axes qui relient les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Ce la permet de mettre en place un commande direct des puissances vu que l'influence des couplages près de chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur.

Les grandeurs de référence de ces régulateurs seront : la puissance active de l'axe du rotor q et la puissance réactive de l'axe du rotor d.

Le point de réglage de la puissance de réactive sera maintenu à zéro pour assurer un facteur de puissance du module du côté du stator afin d'améliorer la qualité de l'alimentation qui revient au réseau. Un réglage de puissance active devrait permettre de maintenir un facteur de puissance optimal de l'éolienne.

Ainsi, il existe deux façons pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la méthode, qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et interactives. Cette méthode sera appelée méthode directe parce que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [23].

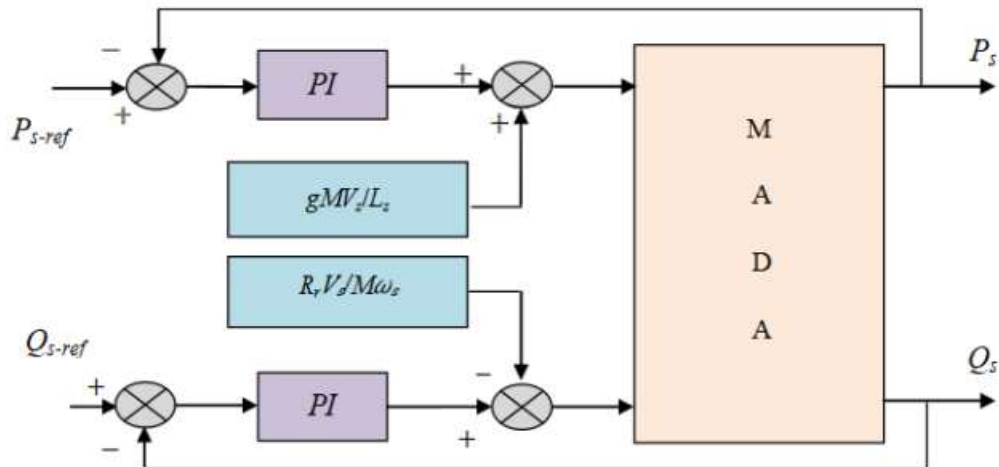


Figure (III.4) : Schéma bloc de la commande directe.

La deuxième méthode consiste à observer et à compenser les conditions d'appariement en mettant en œuvre un système avec deux anneaux de contrôle de puissance et des courants rotoriques.

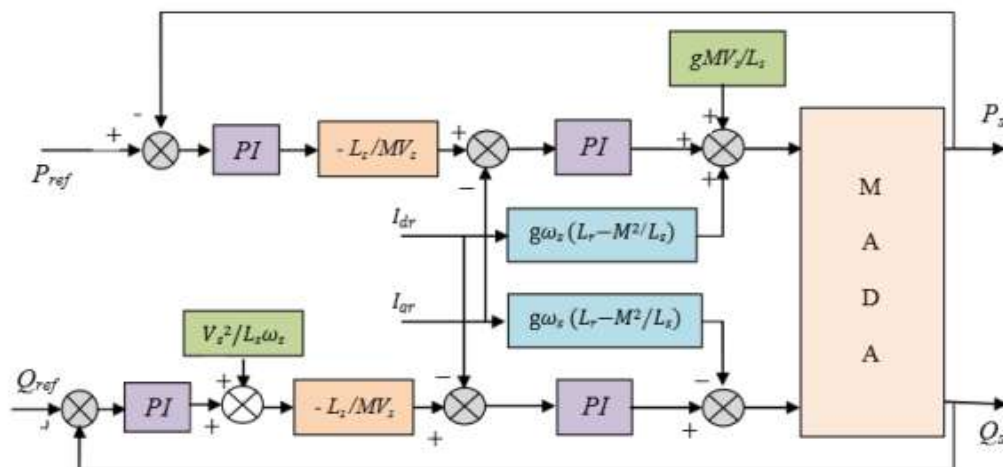


Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande indirecte.

III.5. Synthèse des régulateurs PI

Nous pouvons résumer le rôle des régulateurs de chaque axe dans l'élimination de l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Il offre de nombreux avantages, y compris la vitesse et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi que des performances acceptables à la régulation du système considéré. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle de forme simplifiée (MADA).

La figure montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI [23].

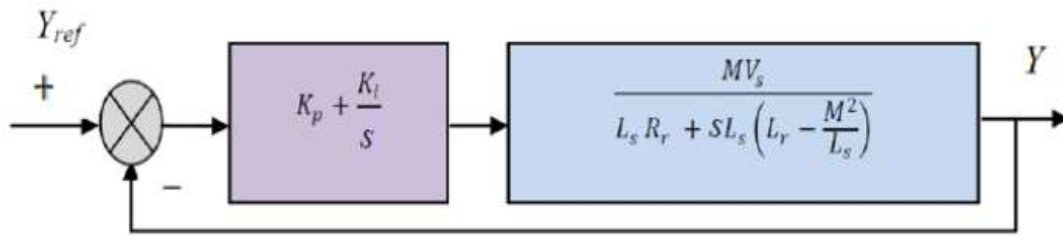


Figure (III.6) : Système régulé par un PI.

La fonction de transfert est de la forme :

$$K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.14})$$

Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure précédente. La fonction de transfert en boucle ouverte intégrant les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$\text{FTBO} = \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \right) \frac{\frac{M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (\text{III.15})$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.16})$$

Après la compensation, on obtient la fonction FTBO suivante :

$$FTBO = K_p \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} / s \quad (III.17)$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$FTBF = \frac{1}{1 + s\tau_r} \quad (III.18)$$

Avec :

$$*\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}$$

Le terme T désigne ici la constante du temps du système. On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{\sigma L_r}{T} \quad (III.19)$$

$$K_i = \frac{R_r}{T} \quad (III.20)$$

Avec :
$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}$$

III.6. Modélisation la commande vectorielle sur MATLAB

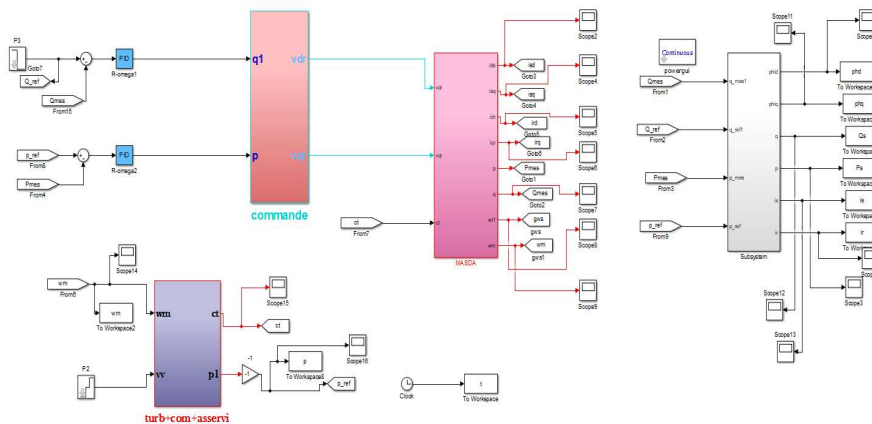


Figure (III.7) : Schéma block de la commande vectorielle.

❖ Dans cette simulation nous avons essayé de commander des échelons on a effectué le schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA en $t=7(s)$ avec une variation de la vitesse suivants :

- 0 → 3 : 39 m/s.
- 3 → 5 : 52 m/s.
- 5 → 7 : 62 m/s.

III.6.1. Les résultats de simulation de commande vectorielle

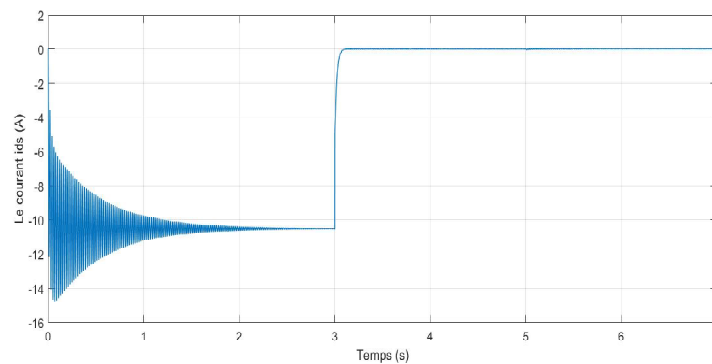


Figure (III. 8) : Allure du courant I_{ds} (A).

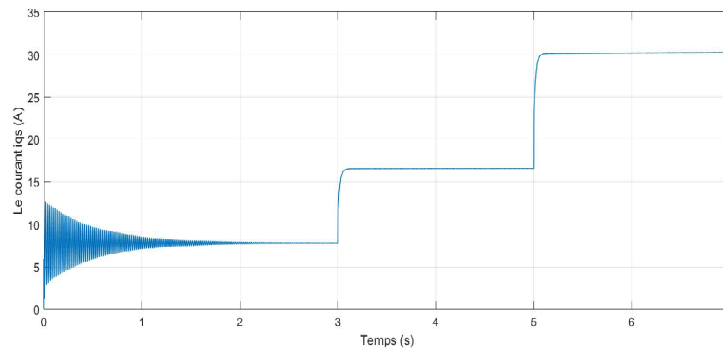


Figure (III. 9) : Allure du courant I_{qs} (A).

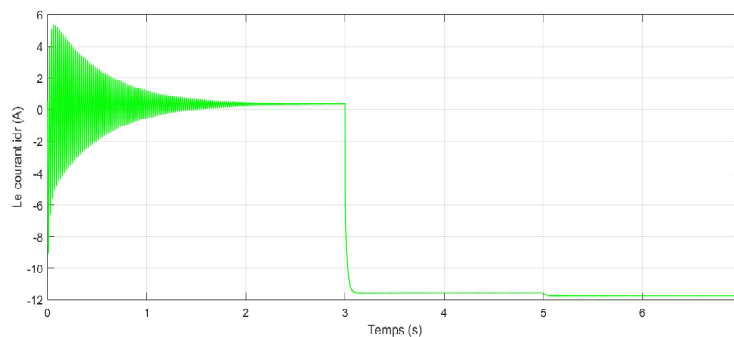


Figure (III. 10) : Allure du courant I_{dr} (A).

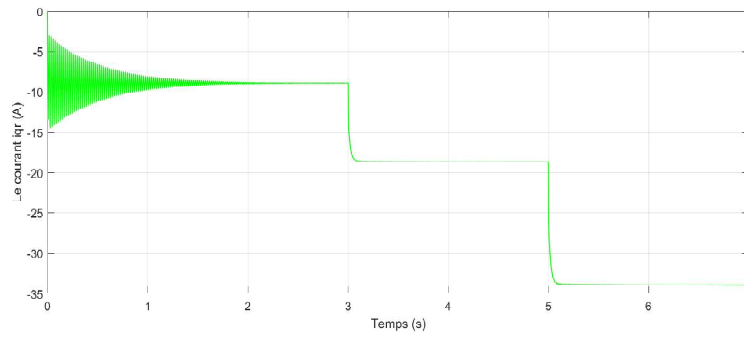


Figure (III. 11) : Allure du courant $I_{qr}(A)$.

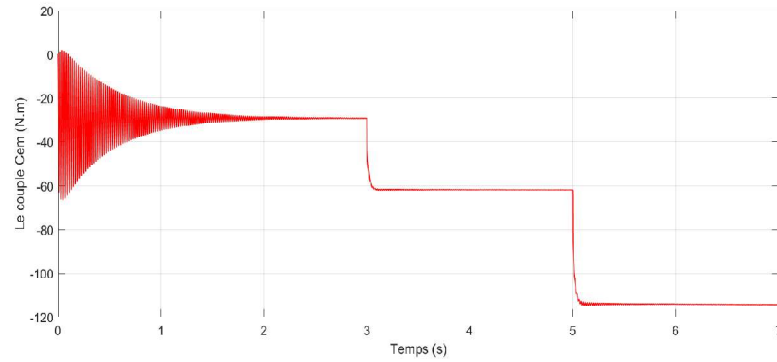


Figure (III. 12) : Le couple $C_{em}(N.m)$.

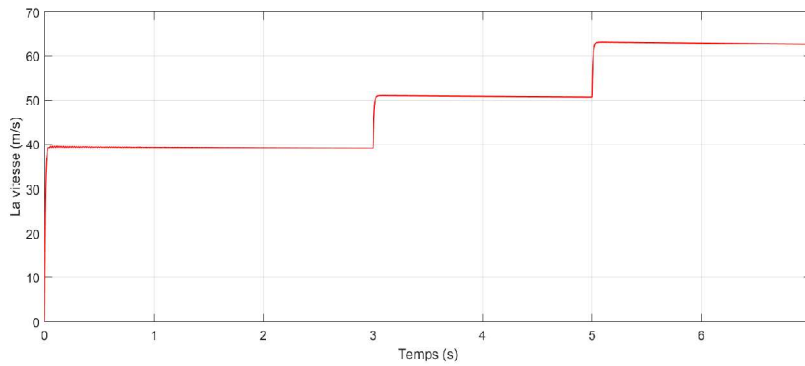


Figure (III. 13) : La vitesse (Rad/s).

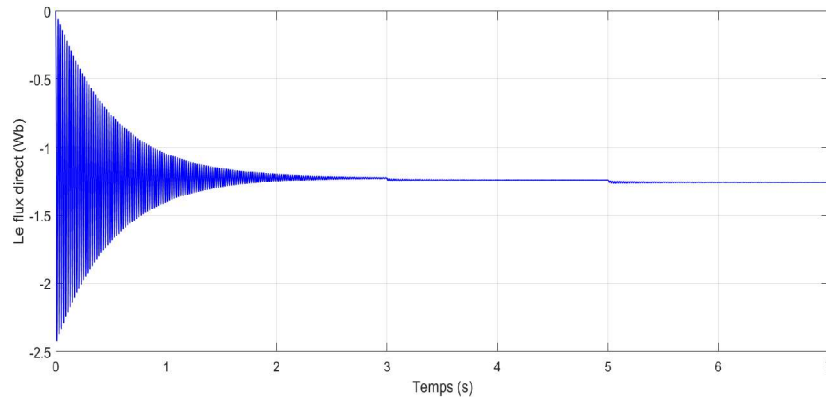


Figure (III. 14) : Allure du flux direct ϕ_{id} (Wb) .

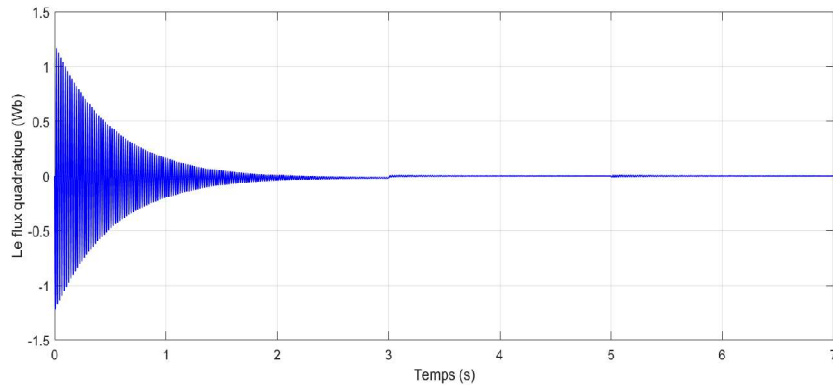


Figure (III. 15) : Allure du flux quadratique ϕ_{iq} (Wb).

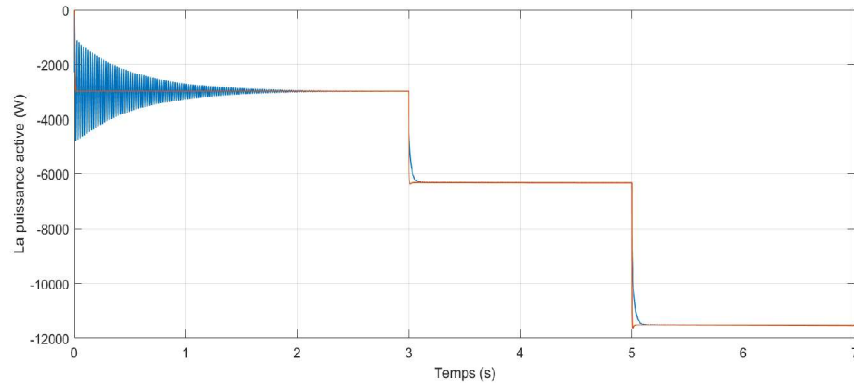


Figure (III. 16) : Allure de Puissance active (W).

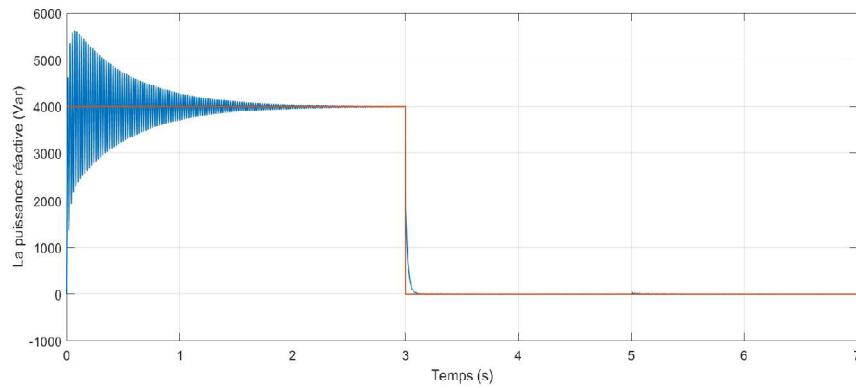


Figure (III. 17) : Allure de Puissance réactive (Var).

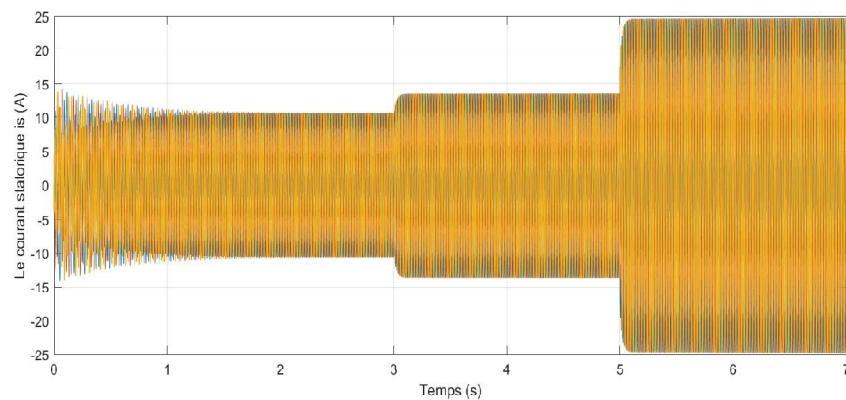


Figure (III. 18) : Allure de courant statorique (A).

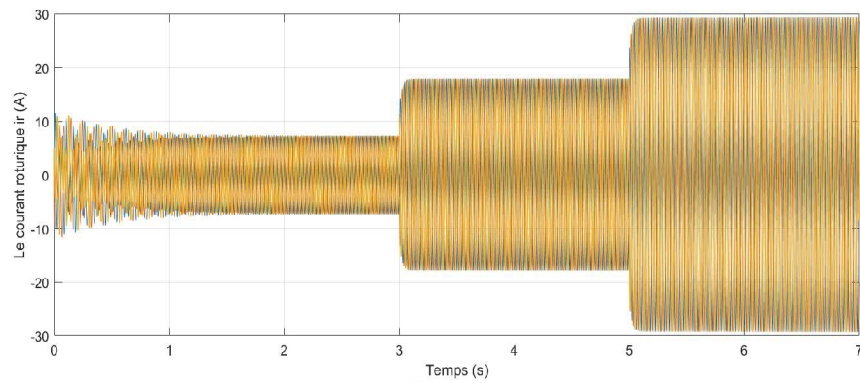


Figure (III. 19) : Allure de courant rotorique (A).

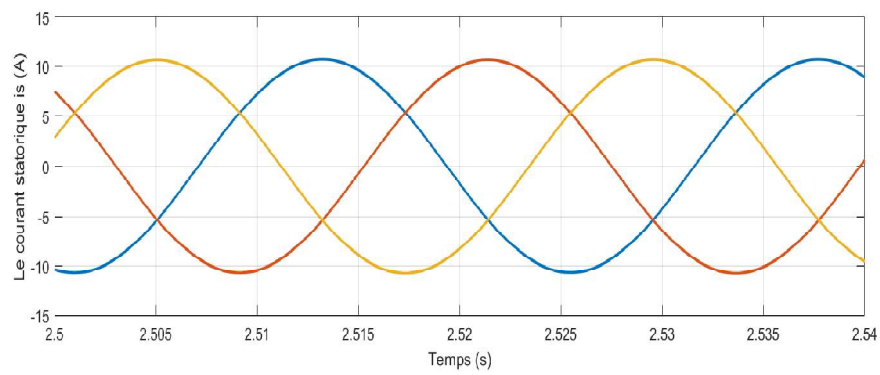


Figure (III. 20) :Zoom de courant statorique i_s (A).

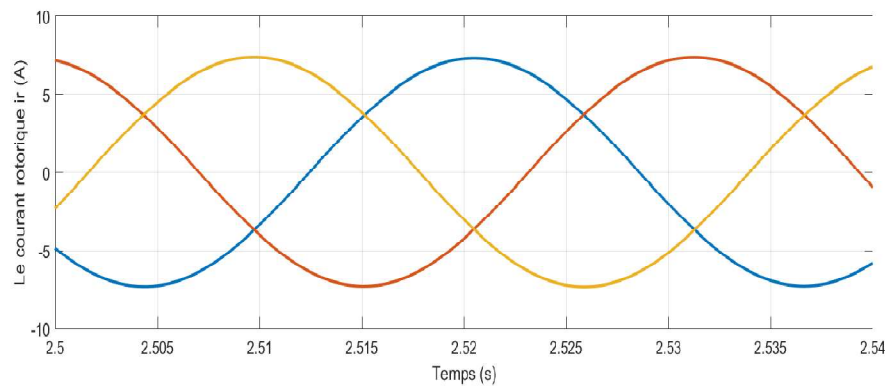


Figure (III. 21) : Zoom de courant rotorique i_r (A).

III.6.2. Interprétation des résultats

Les figures (III.16) et (III.13), montrent que la puissance active de la machine dans le régulateur Pi et la vitesse de vent si le vent augmente la puissance générée augmente, on remarque aussi in oscillation de le puissance autour de la référence.

La puissance réactive présenté sur la figure (III.17) est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le $\cos(\varphi)$), et les deux sont découplées entre eux (la puissance active est commandée par la composante I_{qr} , et la puissance réactive par le composante I_{dr}) présenté sue la figure (III.10) et (III.11).


III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposés le principe de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la machine asynchrone double alimentée au stator et au rotor via deux convertisseurs d'électronique de puissance à commande MLI visant à contrôler de manière indépendante le flux par rapport au couple [26]. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux rotorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active [30].

CONCLUSION GÉNÉRALE



Conclusion générale

 étudier, modéliser et contrôler le système de production d'énergie pneumatique. Pour ce faire, nous avons étudié la modélisation des différents composants de base de ce système afin de développer de nombreuses techniques de contrôle pour assurer la précision et la continuité des forces statiques de production tout en assurant la stabilité et la vitesse de poursuite. Ceci afin d'obtenir une grande efficacité du système et une qualité de production précise et optimale.

Dans le premier chapitre, nous avons fourni des généralités sur les étapes du développement de l'énergie éolienne, comment elle est détectée et produite à travers l'histoire, sa propagation, la façon dont elle est exploitée, ses types et ses différentes composantes, puis nous avons abordé les types de turbines et les différents types de générateurs et de machines utilisés dans le système éolien pour cela, nous avons choisi l'alimentation double non synchronisée de ces qualités opérationnelles.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fourni des généralités sur la machine à double alimentation non synchronisée et ses types, comme mentionné par ses avantages et ses inconvénients. Ensuite, nous avons abordé l'écriture de diverses équations électriques. Ensuite, nous les avons simulées dans le programme Matlab. Ceci est basé sur quelques hypothèses simplifiées dans ce modèle Autant d'énergie que possible pour extraire des résultats bons et efficaces. Nous avons également décrit la partie mécanique contenant la turbine et l'avons modélisée. Nous avons également construit un dispositif de contrôle MPPT pour assembler ceci afin de faire fonctionner les éoliennes avec un maximum d'énergie afin d'extraire des résultats bons et efficaces.

Dans le troisième chapitre, en va voir les Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance et la Commande vectorielle directe et indirecte, la régulation « on utilise un régulateur de type PI, et notre chapitre a également été consacré Au développement d'un modèle de contrôle indépendant des puissances statoriques actives et réactives à partir de la commande vectorielle du MADA avec flux statorique orienté.

RÉFÉRANCES

BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

1. **DH. Abdelhafidh et L. Laid et N. Fares**, *Etude et commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation MADA*, Mémoire de Master, Université Hamma Lakhdhar Eloued, (2018).
2. <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-energie-eolienne.pdf>
3. <http://www.iscience.ca/energieeo/ateliers/energieeolienneprincipes.php>
4. **S. Belekhal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla**, *Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne*, Mémoire de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine, (2010).
5. **C. Bennour**, *Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation*, Mémoire de l'Ingénieur, Université Mohamed Khider – Biskra, (2012).
6. **Y. Elbia**, *Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté*, Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, (2009).
7. **R. Azaizia**, *Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée par un Convertisseur Multi niveaux*, Mémoire de magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, (2008).
8. **F. Boumaref**, *Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation*, Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, (2009).
9. **F. Poitiers**, *Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne*, Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, (2003).
10. **N. Hamadi**, *Modélisation et commande des génératrices éoliennes*, Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, (2008).

11. N. Akkari, *Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation*, Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, (2010).

12. A. Dendouga, *Contrôle des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation DFIM*, Mémoire de doctorat en sciences et électrotechnique, Université de Batna, (2010).

13. P. E. Vidal, *Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation*, Thèse de doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, (2004).

14. M. Adjoudj, M. Abid, A. Aissaoui, Y. Ramdhani, H. Bounoua, *Commande par Mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation montée dans une éolienne*, Revue « Nature & Technologie » n° 34 02, (2010).

15. Y. Djeriri, *Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien*, Mémoire de magister en électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, (2009).

16. A. Chaiba, *Commande de la machine asynchrone a double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielles*, Mémoire de doctorat en électrotechnique, Université de Batna, (2010).

17. G. Sallom, *Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, (2007).

18. B. Francois, *La génératrice asynchrone à double alimentation modélisation et commande*, Master de recherche, Université de Lille1, (2010).

19. S. Khojet el Khil, *Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse & école Nationale d'Ingénieurs de Tunis, (2006).

20. H. Tamrabet, *Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une Machine Asynchrone*, thèse de magistère, Université de Annaba, (2006).

21. H. Camblong, *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*, Thèse de Doctorat, centre de Bordeaux, (2003).

22. R. Abdessamed et M. Kadjoudj, *Modélisation des machines électriques*, presses de l'université de Batna, (1997).

23. B. Soufiane et CH. Youssouf, *Commande des puissances actives et réactive d'une éolienne basée sur une génératrice asynchrone double alimentation*, Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, (2019).

24. S. Djema et N. Nasri, *Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation destinée à l'énergie éolienne*, Mémoire de Master en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2015).

25. K. Laid, *Contribution à l'Amélioration des Performances Des Systèmes Eoliens*, Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, (2018).

26. H. Sarah et B. Samah, *Commande d'une MADA totalement interfacée dédiée à un système éolien*, Mémoire de Master en électrotechnique Université Abderrahmane mira_bejaia, (2019).

27. B. Oussama et M. Mouhammed Walid, *Commandes d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans une chaîne éolienne*, Mémoire de Master Université Aboubeker Belkaïd– Tlemcen, (2017).

28. T. Fatma Zahra, *Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien*, Thèse de doctorat, Université Mouhammed khider-Biskra , (2018).

29. M. Housseem et S. Sidali, *Modélisation et Simulation d'une Turbine Eolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)*, Mémoire de master en énergie renouvelable, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, (2021).

30. B. Sofiane, *Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable*, Magister en Electrotechnique, Université Farhat Abbas – Setif, (2012).